
ADQUISICIÓN, TRATAMIENTO Y ANÁLISIS DE VIBRACIONES PARA LA HOMOLOGACIÓN DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS

TFG
GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DEL
DISEÑO (ETSID)

Curso académico: 2017-2018
Junio 2018

Autor: Carlos Aparisi Moscardó
Tutor: Jose Martínez Casas
Cotutora: Águeda Sonseca Olalla



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



AGRADECIMIENTOS

Primero, agradecer a mis padres, hermana, amigos, pareja y a todos los que en algún momento me apoyaron y llenaron de ánimo para poder llegar hasta aquí, también formáis parte de esto.

A mi tutor Jose y a los compañeros de Stadler Rafa y Dani, porque sin ellos no habría sido posible la realización de este trabajo.

Inspect every piece of pseudoscience and you will find a security blanket, a thumb to suck, a skirt to hold. What does the scientist have to offer in exchange?

Uncertainty! Insecurity!

Isaac Asimov

Índice

Parte I: Memoria

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Motivación	3
1.3. Objetivo	5
1.4. Resumen	6
2. Normativas vigentes	7
2.1. UNE-EN 14363	8
2.1.1. Objetivo	8
2.1.2. Resumen de la norma	8
2.2. UNE-EN 12299	11
2.2.1. Objetivo	11
2.2.2. Resumen de la norma	11
2.3. UNE-EN 13749	14
2.3.1. Objetivo	14
2.3.2. Resumen de la norma	14
3. Postprocesado de señales	16
3.1. Resumen	16
3.2. Documentación de medidas	18
3.3. Análisis general de señales	19
3.4. Análisis dinámica	23
3.4.1. EN14363	23
3.5. Análisis confort	25
3.5.1. EN 12299	25
3.6. Análisis fatiga	27
3.6.1. Bounce (Coeficiente β)	27
3.6.2. Roll (coeficiente α)	27
3.6.3. Amplitud de aceleración de daño equivalente (EN 13749)	28
4. Casos de estudio	29
4.1. Realización de las medidas	29
4.2. Ave Madrid-Valencia	31
4.3. Cercanías Valencia-Castellón	33
5. Resultados	35
5.1. Ave Valencia-Madrid	35
5.1.1. Análisis general de la señal	35
5.1.2. Análisis de dinámica AVE Valencia-Madrid	38
5.1.3. Análisis de confort AVE Valencia-Madrid	40
5.2. Cercanías Valencia-Castellón	42
5.2.1. Análisis general de la señal	42
5.2.2. Análisis de dinámica Cercanías Valencia-Castellón	45
5.2.3. Análisis de confort Cercanías Valencia-Castellón	47

6. Conclusiones	48
7. Proyectos futuros	49
8. Anexos	50
8.1. Anexo I → Canales y sensores de ensayo1	50
8.2. Anexo II → Conversor de .csv a .mat	50
8.3. Anexo III → Canales y sensores del AVE Valencia-Madrid	52
8.4. Anexo IV → Canales y sensores EN 14363 del AVE Valencia-Madrid	52
8.5. Anexo V → Canales y sensores EN 12299 del AVE Valencia-Madrid	52
8.6. Anexo VI → Canales y sensores Cercanías Valencia-Castellón	52
8.7. Anexo VII → Canales y sensores EN 14363 del Cercanías Valencia- Castellón	53
8.8. Anexo VIII → Canales y sensores EN 12299 del Cercanías Valencia- Castellón	53
8.9. Anexo IX → Trayecto Castellón-Valencia	53
8.10. Anexo X → Distriución de asientos y coches AVE S-112	54
Parte II: Planos	
II.I Plano S-112 AVE	56
Parte III: Presupuesto	
III.I Desglose de presupuestos	59
Parte IV: Pliego de condiciones	
IV.I Definición y alcance del pliego de condiciones	61
IV.II Documentos que componen el proyecto	61
IV.III Especificaciones técnicas	61
IV.III.I Figuras involucradas en el proyecto	61
IV.III.II Normativa	62
IV.III.III Sistemas de adquisición de datos	62
Referencias bibliográficas	63

Índice de figuras

1.	Fotografía aérea de la empresa Stadler Rail Valencia S.A.U	3
2.	Vehículo XP-1, primera generación del Virgin Hyperloop one system	4
3.	Zonas de ensayo	10
4.	Métodos de evaluación de la Comodidad Media y la Comodidad Continua	12
5.	Ejemplo de equipo de medida	16
6.	Axlebox AZ 1. PSDs	20
7.	Run_LEADING_3.mat. Canal Axlebox_AZ_1	21
8.	Run_LEADING_3.1.mat	22
9.	Run_LEADING_3.2.mat	22
10.	PSD Run_LEADING_3.1.mat	22
11.	Runnign safety ensayo1 según EN 14363	23
12.	Running safety ensayo1 → Resultados bogie	24
13.	Running safety ensayo1 → Resultados caja	24
14.	Ride characteristics ensayo1 según EN 14363	25
15.	Posición de los acelerómetros en caja del vehículo	26
16.	Resultados N_{MV} ensayo1	26
17.	Logotipo de la aplicación <i>Sensor Play</i>	29
18.	Pantalla principal de <i>Sensor Play</i>	29
19.	Datos recopilados mediante <i>Sensor Play</i>	30
20.	Línea de alta velocidad Madrid-Levante [11]	31
21.	Plano de cercanías de Valencia	33
22.	Fotografías del móvil usado para las medidas en el suelo de la caja del vehículo	34
23.	Histograma de velocidad trayecto AVE Valencia-Madrid	35
24.	Trayecto AVE Valencia-Madrid en Google Earth	36
25.	Señales y PSDs trayecto AVE Valencia-Madrid	37
26.	Running safety EN 14363	38
27.	Running safety Carbody acceleration AVE Madrid-Levante	39
28.	Running safety Carbody acceleration AVE Madrid-Levante	39
29.	Histograma de Velocidad Cabanyal Castellón	42
30.	Variación $ a_{x,y,z} $ en función de la velocidad	43
31.	Señal acelerómetros Cercanías Castellón	44
32.	Running safety Carbody acceleration Cercanías VLC-CST	45
33.	Running safety Carbody acceleration Cercanías VLC-CST	46
34.	Distribución de asientos serie 112 de Renfe	56
35.	Plano acotado serie 112 Renfe	57

Índice de tablas

1.	Tabla descriptiva Método Normal N_{MV}	12
2.	Índice de comodidad N_{MV}	13
3.	Documentación de Ensayo a modo de ejemplo del ensayo1	18
4.	Valores máximos absolutos del ACC_2 → Axlebox AZ 1	19
5.	Aceleraciones en bogie según Running safety ($\frac{m}{s^2}$)	24

6.	Aceleraciones en caja ensayo1 según Running safety ($\frac{m}{s^2}$)	24
7.	Ride characteristics ensayo1	25
8.	Resultados coeficiente β	27
9.	Resultados coeficiente α	27
10.	Aceleraciones de daño equivalente en bogie	28
11.	Aceleraciones de daño equivalente en axlebox	28
12.	Documentación de Ensayo 27/10/17 run 1 AVE Ida	32
13.	Documentación de Ensayo 27/10/17 run 2 AVE Vuelta	32
14.	Documentación de Ensayo 21/05/18 run 1	34
15.	Valores característicos de la señal run AVE_Ida	36
16.	Resultados running safety Carbody según EN 14363	40
17.	N_{MV} resultados análisis confort EN 12299	41
18.	Resumen señal Cercanías Castellón	42
19.	Resultados running safety Carbody según EN 14363	46
20.	N_{MV} resultados análisis confort EN 12299	47
21.	Presupuestos normas necesarias para el trabajo	59
22.	Presupuestos software	59
23.	Presupuestos hardware	59
24.	Presupuestos mano de obra	59
25.	Presupuesto total	59

PARTE I:
MEMORIA

1. Introducción

1.1. Antecedentes

La realización de este trabajo se centra en una parte muy amplia del análisis y posterior postprocesado de las señales de los vehículos ferroviarios (también referidos simplemente como vehículos de aquí en adelante), sirviendo, en parte, como pequeña guía introductoria para ingenieros principiantes interesados en este campo.

Si bien el hecho de ser tan amplio no permite un estudio exhaustivo de cada parte, podemos encontrar en la bibliografía especializada estudios relacionados con partes de este trabajo, los cuales nos permiten un entendimiento mucho más profundo de las distintas secciones que aquí se presentan.

En la tesis [1] encontramos un estudio en profundidad sobre el contacto rueda-carril. Las vibraciones producidas por esta interfaz así como las fluctuaciones de la fuerza de contacto provocada por las irregularidades del perfil de la misma son evaluadas por la normativa UNE-EN 14363 [2] (la cual se estudiará en este documento).

El autor propone un método para estimar los niveles de vibración y un modelo de propagación de vibraciones en la zona aledaña a la vía, al paso del vehículo. El método y el modelo desarrollados surgen de la comprensión del comportamiento dinámico de la interfaz rueda-carril.

También encontramos la tesina [3], la cual trata sobre la falta de normativa en ferrocarriles urbanos (tranvía y/o metro ligero), y como esto provoca la extrapolación de valores normativos aplicables a líneas de ferrocarril.

Esto causa que, debido a las claras diferencias entre ambas líneas de ferrocarril (urbano y convencional) tanto en carga por eje del vehículo como en velocidad de circulación, radio de curvatura del trazado, etc, se produzca una disminución en la eficiencia de los trabajos en cuanto al tiempo de ejecución y coste.

Esta tesis especifica un método para obtener las tolerancias geométricas de una vía, cumpliendo cierto nivel de confort. Este criterio de confort es el especificado en la norma UNE-EN 12299, donde se calcula el índice de comodidad media, y que será expuesto en este trabajo.

También encontramos en la bibliografía libros especializados [4] sobre la dinámica de vehículos ferroviarios. En este libro se cubren vastos aspectos del comportamiento del vehículo, desde la descripción de la estructura del tren de conducción, suspensiones, interfaz rueda-carril, ancho de vía, ruido y vibraciones de los vehículos etc, así como la evolución de las técnicas computacionales que son usadas en este campo.

Es un libro recomendado para ingenieros trabajando en la industria ferroviaria así como investigadores que estudien el comportamiento de este tipo de vehículos, siendo, sin embargo, también útil para aquellos que quieran ganar un conocimiento básico en este campo sin ser especialistas en este área. Se trata pues de un libro

1. INTRODUCCIÓN

muy completo y recomendable para especialistas o cualquiera que tenga interés en iniciarse en este campo.

De lo expuesto anteriormente, se observa que no existe en la literatura un trabajo que aglutine lo que se presenta en este proyecto. Por tanto, se espera que el trabajo aquí realizado pueda tomarse como una guía, cuya redacción y estructura sirva para que incluso una persona no especialista en el sector, sea capaz de entender los pasos que se llevan a cabo durante la evaluación de vehículos ferroviarios. Se trata pues de un documento que abarca desde la realización de medidas, pasando por el tratamiento de señales de ensayo y finalizando con el postprocesado según las distintas normativas del sector.

1. INTRODUCCIÓN

1.2. Motivación

Era julio, había finalizado tercero de carrera y me encontraba en una disyuntiva, ¿Disfrutar el tan ansiado verano o buscar unas prácticas para así completar mi formación universitaria? Me decidí por lo segundo.

Tras superar la entrevista en Stadler Rail Valencia S.A.U, me concedieron la cátedra en análisis y gestión de datos experimentales, dando la beca comienzo en septiembre, por lo que aún así podía disfrutar de la época estival.

Trabajar durante cuatro meses en esta reconocida empresa del sector me sirvió de un gran aprendizaje, por lo que con la ayuda de mi tutor me propuse realizar mi trabajo de final de grado en algo que estuviera relacionado con los vehículos ferroviarios.

En la figura 1 podemos apreciar una fotografía cenital de la empresa Stadler Rail en Valencia:



Figura 1: Fotografía aérea de la empresa Stadler Rail Valencia S.A.U

Actualmente, España es un país líder en el sector ferroviario, y más concretamente con la alta velocidad, tanto a nivel nacional destacando el AVE, como a nivel internacional con distintas adjudicaciones como la línea de alta velocidad ferroviaria Haramain, en la cual ha participado España (fase 2), que une las ciudades árabes de Medina y La Meca.

Este sector se encuentra en auge en todo el mundo y su modernización y mejora con propuestas como el Hyperloop (para el transporte de pasajeros y mercancías

Figura 1 bibliografía [5]

1. INTRODUCCIÓN

en tubos al vacío a alta velocidad) por parte de compañías del sector privado como SpaceX o el Hyperloop one Virgin es un hecho.

La imagen de la figura 2 muestra un diseño de la empresa Virgin para un moderno vehículo de alta velocidad:

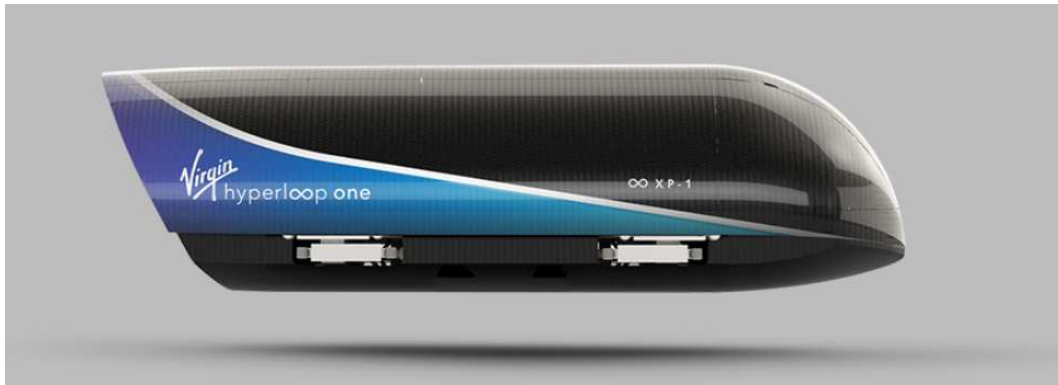


Figura 2: Vehículo XP-1, primera generación del Virgin Hyperloop one system

Si bien en Stadler Rail no he tratado datos de vehículos ferroviarios de alta velocidad, sino convencionales, está claro que este medio de transporte va a requerir de ingenieros que trabajen en todas las innovaciones que se están llevando a cabo y las que están por venir, y es por eso que me decidí a llevar a cabo este proyecto como trabajo de final de grado.

1.3. Objetivo

El objeto de este trabajo académico es el de presentar de manera ordenada todo el proceso que se realiza para llevar a cabo la evaluación y homologación de un vehículo ferroviario, desde la obtención de señales de ensayo hasta su posterior tratamiento y postprocesado.

Si bien tanto en el mundo laboral como académico además de datos experimentales también se usa software específico como VAMPIRE® o ADAMS/Rail®, el cual permite al usuario construir un modelo dinámico del vehículo a evaluar y estudiar su respuesta ante *inputs* de geometría real así como fuerzas externas, en este trabajo se ha optado por la obtención de medidas experimentales propias, para realizar así trabajo de campo.

Mediante el uso de las nuevas tecnologías que encontramos en los smartphones se obtendrán las distintas señales de los experimentos, a partir de las cuales se llevará a cabo el postprocesado y análisis de los diferentes estudios relacionados con la normativa ferroviaria.

La síntesis del objetivo del proyecto es, por tanto, la de presentar una guía que recoja desde la medición de señales de ensayo hasta el postprocesado de los datos y comprobación de las normativas en vigor, de manera que sirva a un ingeniero para iniciarse en este sector.

1.4. Resumen

De manera ordenada, se presenta a modo de resumen la exposición de las partes del proyecto.

Primeramente, se llevará a cabo una breve exposición de las distintas normas principales que se aplican tanto en normativa de dinámica, confort o requisitos estructurales.

La normativa aplicada (UNE-EN [7]) será brevemente desarrollada para que el lector tenga una comprensión básica, pero no se profundizará en detalles específicos ni en un estudio íntegro de la misma.

A continuación se explicará el tratamiento de las señales de ensayo. Desde la documentación de las medidas, pasando por los distintos análisis tanto de limpieza de señal como de postprocesado de las distintas normas.

Tras esto se presentaran los distintos casos de estudio, donde se aplicará lo anteriormente mencionado y se presentaran los resultados obtenidos.

Se concluirá el trabajo con las mejoras y/o proyectos futuros así como con las pertinentes conclusiones. Se incluirán los anexos y referencias bibliográficas necesarias al final del documento.

2. Normativas vigentes

Dentro del ámbito ferroviario existen multitud de normativas, las cuales se nutren unas de otras. En lo que a este trabajo respecta, se centra en tres de las normas principales:

- Dinámica → UNE-EN 14363 [2]
- Confort → UNE-EN 12299 [8]
- Integridad estructural → UNE-EN 13749 [9]

En todo el mundo se usan diferentes normativas, si bien es cierto que la normativa europea es un estándar de calidad internacional reconocido por todos los países.

Esta normativa la desarrolla el Comité Europeo de Normalización (CEN; al cual pertenecen 31 países) y que desarrolla los estándares europeos con la finalidad de mejorar el mercado único europeo.

Algunas normas desarrolladas por el CEN pueden tener referencias de normas ISO (Organización Internacional de Normalización), como por ejemplo es el caso de la EN 12299, donde encontramos alusiones a la ISO 2631.

Las normativas EN son de obligada aplicación por parte de los países miembros del CEN (entre los que se encuentra España), los cuales han de desarrollar su propia norma nacional siguiendo las directrices del estándar europeo. En el caso de España, estas normas son adaptadas por AENOR (Asociación Española de Normalización y Certificación), y pasan a ser normas UNE-EN de obligado cumplimiento.

2.1. **UNE-EN 14363**

2.1.1. **Objetivo**

En este postprocesado se analiza tanto la seguridad de bogie como de caja. La norma UNE-EN 14363 proporciona unos valores máximos de seguridad respecto a las distintas aceleraciones que puede sufrir el vehículo.

Esta norma es la adaptación de la EN 14363 (el estándar europeo desarrollado por el CEN), y todos los miembros CEN (entre los que se incluye España) tienen que hacer esta regulación sin ninguna modificación oficial en su país.

El objetivo de este documento es el de cuantificar la actuación del vehículo ferroviario bajo condiciones representativas de operación e infraestructura conocidas.

2.1.2. **Resumen de la norma**

Vehículos evaluados mediante este documento:

- Nuevos diseños.
- Vehículos que han sufrido modificaciones de diseño relevantes.
- Vehículos con cambios en sus condiciones de operación.

Con la experiencia de los años se ha demostrado que los vehículos que cumplen este estándar pueden operar de manera segura bajo condiciones más severas que bajo las que fueron evaluados.

Este estándar se dirige a cuatro aspectos:

1. Vehículos → Evaluación de las características de viaje para los vehículos ferroviarios. El documento explica los distintos criterios de aceptación para los distintos tipos de vehículos diseñados para operar en anchos de vía estándar.
2. Infraestructura → Se define el radio de curvatura para el cual el vehículo es evaluado.
3. Condiciones de la interfaz rueda-carril → Esta interfaz es el área de contacto entre las ruedas y los carriles, la cual está sujeta a altas tensiones. Este estándar contiene los requerimientos relacionados con el rango de conicidad equivalente necesario para la evaluación del vehículo.
4. Condiciones de operación → Este estándar requiere la combinación de velocidad y peralte admisible, además de las condiciones de carga para cada tipo de vehículo¹.

¹Aunque el estándar no es directamente aplicable para metros y tranvías, la evaluación de estos se puede llevar a cabo por analogía con este documento

2. *NORMATIVAS VIGENTES*

Actuaciones del vehículo que constan de métodos en la norma que permiten su evaluación:

1. Seguridad ante descarrilamiento en vías curvas → La existencia de vías curvas es fundamental, en las curvas el carril externo se encuentra elevado sobre el interno, fenómeno conocido como peralte. Se reducen fuerzas y la toma de la curva es más confortable para los pasajeros. También se puede dar en cambios de vía en intersecciones. Es una actuación de importante evaluación ya que pasando por vía curva, se incrementa el riesgo de descarrilamiento. Dependiendo del tipo de curvas presentes en la evaluación del vehículo, se definirán distintas zonas de ensayo, lo cual se expone en la figura 3.
2. Seguridad en movimiento bajo fuerzas de compresión longitudinales en curvas en forma de s → El riesgo de descarrilamiento provocado por fuerzas longitudinales pasando por un curva con forma de s se considera bajo para trenes convencionales, pero para ciertos trenes de carga puede ser más alto, por lo que en estos casos su evaluación es importante.
3. Evaluación del coeficiente torsional → Solamente será determinado si es requerido por los puntos 1 o 2.

$$c_t = \frac{M_t}{\beta} \cdot l \quad (1)$$

siendo M_t el momento torsional, β el ángulo de torsión y l la distancia longitudinal entre soportes.

4. Determinación de las características de desplazamiento.
5. Seguridad en movimiento en intersecciones curvas.
6. Seguridad en movimiento, carga de vía y características de viaje.

La actuación del vehículo se evalúa en dos etapas. En la primera etapa normalmente las características básicas y comportamiento a baja velocidad son investigados antes de los primeros ensayos en vía bajo condiciones de operación controladas. En la segunda etapa se evalúa el comportamiento en velocidad del vehículo. Estas evaluaciones se pueden llevar a cabo o bien bajo ensayos físicos, simulaciones numéricas, comparación con resultados ya conocidos, etc. Para cada tipo de evaluación el documento especifica la elección apropiada del método de evaluación.

Este documento, además de servir para la aceptación de las características de viaje de los vehículos ferroviarios, también es de uso para la validación de modelos de simulación.

2. *NORMATIVAS VIGENTES*

A continuación, se describen las distintas zonas de ensayo :

	Stability	Test zone			
		1	2	3	4
Description	Tangent track and very large radius curves ^a	Large radius curves	Small radius curves	Very small radius curves	
Objective	Testing the vehicles running stability	Testing in the area of the vehicles admissible speeds	Testing the combinations of the vehicles admissible speeds and cant deficiencies	Testing in the area of the vehicles admissible cant deficiency Including track sections with contact geometry that creates adverse steering conditions for a wheelset in test zone 4	
Anticipated vehicle dynamic behaviour	Highest probability of unstable running behaviour	There are no or only low quasi-static guiding forces or accelerations, but larger dynamic content in all assessment quantities	Superposition of quasi-static and dynamic contents of all assessment quantities	Larger quasi-static guiding forces, vertical wheel forces and accelerations, dynamic content generally decreases	

Figura 3: Zonas de ensayo

Como podemos observar en la figura 3 ², se puede dividir en cuatro las zonas de ensayo dependiendo de la geometría de la vía. Según se realice el ensayo en una zona u otra, los objetivos del mismo serán distintos, así como los valores de aceleraciones y velocidades admisibles.

²Tabla extraída del documento EN 14363

2.2. **UNE-EN 12299**

2.2.1. **Objetivo**

En este postprocesado se mide y evalúa la comodidad de viaje para los pasajeros.

Se va a explicar el procedimiento de la norma UNE-EN 12299. Esta norma es la adaptación por parte de AENOR al ámbito nacional de una normativa europea EN desarrollada por el CEN (Comité Europeo de Normalización) y aprobada el 2009-03-07. La actualización de esta norma se trata de la versión de abril 2010.

Esta norma especifica los distintos métodos a desarrollar para la evaluación de los movimientos de la caja y de qué manera estos afectan a la comodidad de los viajeros.

Esta norma considera los efectos de falta de comodidad asociados a niveles bajos de aceleración y velocidad de balanceo.

Las causas de la incomodidad estudiadas en este documento son las vibraciones y movimientos del vehículo, excluyendo otras posibles como la temperatura o el ruido.

2.2.2. **Resumen de la norma**

Los movimientos de la caja pueden transmitir su efecto en el cuerpo de los viajeros mediante los distintos contactos entre viajero y caja, como puede ser suelo-pies, reposacabezas-cuello, reposabrazos-brazos, asiento-cadera o respaldo-espalda.

Dependiendo del movimiento a estudiar del vehículo ferrivario se llevarán a cabo distintos métodos:

- Cuasi estacionario³ → Estudio de la comodidad media. Este estudio se centra en la sensación media del viajero, la cual es la sensación producida tras la aplicación de vibraciones en un período de tiempo largo (baja frecuencia).
- No estacionario → Comodidad en las curvas de transición y comodidad en eventos discretos. En este fenómeno se estudia la aceleración transversal (producida en las curvas) así como sensaciones instantáneas debidas a cambios súbitos, es decir, se estudian fenómenos de breve duración (alta frecuencia).

El rango de frecuencias a estudiar en este movimiento comprende hasta los 15 Hz en la dirección transversal (Y) y hasta los 40 Hz en la dirección vertical (Z). Por su parte, para la comodidad en las curvas de transición y los eventos discretos el rango de frecuencias es de 0 Hz a 2 Hz.

El procedimiento para la cuantificación del índice de comodidad Comodidad Media se ha llevado a cabo por el método normal N_{MV} (ver figura 4). Existen distintos métodos para el resto de análisis propuestos en este documento, pero para los

³Este método será el que se lleve a cabo en este trabajo

2. NORMATIVAS VIGENTES

propósitos de este trabajo el análisis del método normal se piensa que es suficiente.

	Comodidad Media Método Normal	Comodidad Media Método Completo		Comodidad Continua	Comodidad en las Curvas de Transición	Comodidad en los Eventos Discretos
Índice de comodidad	N_{MV}	N_{VD}	N_{VA}	C_{Cx}, C_{Cy}, C_{Cz}	P_{CT}	P_{DE}
Cantidades de movimiento	Aceleraciones en tres direcciones	Aceleraciones en tres direcciones		Aceleraciones en tres direcciones	Aceleración transversal, golpeo transversal, velocidad de balanceo	Aceleración transversal
Posición de la medición	Suelo	Suelo	Suelo e interfaces	Suelo	Suelo	Suelo

Figura 4: Métodos de evaluación de la Comodidad Media y la Comodidad Continua

El método normal expuesto en la figura 4⁴ presenta las siguientes características expuestas en la tabla 1:

	Comodidad Media Método Normal
Índice de comodidad	N_{MV}
Cantidades de movimiento	Aceleraciones en tres direcciones
Posición de la medición	Suelo
Comodidad de los viajeros	✓
Evaluación del vehículo	✓
Geometría de la vía	
Mantenimiento de la vía	✓
Mantenimiento del vehículo	✓

Tabla 1: Tabla descriptiva Método Normal N_{MV}

La comodidad media se puede estudiar mediante dos métodos: el método normal (que es el que se va a usar en este trabajo) el cual tiene en cuenta la transmisión de las vibraciones de la caja a través del suelo, y el método completo, que tiene en cuenta las vibraciones en suelo y/o asiento.

El método normal constituye una simplificación del método completo, pero debido a su sencillez con respecto al completo y a que sus datos son un buen indicativo de la comodidad media, se ha decidido llevar a cabo este procedimiento.

La aplicación del método permitirá obtener ciertos valores de índices de comodidad.

Debido a que este método se basa en la comodidad, la cual se percibe de distinta manera en distintos viajeros, no es posible establecer un sistema de evaluación válido para el 100 % de los viajeros.

⁴Tabla 4 extraída de la norma UNE-EN 12299

2. *NORMATIVAS VIGENTES*

Lo que se llevará a cabo para la evaluación de la comodidad media será, por tanto, una relación entre las aceleraciones medias del vehículo y la comodidad media dada por un grupo representativo de viajeros. El intervalo temporal que se usará en las mediciones será de 5 minutos (300 segundos), el cual se considera suficiente para que el viajero tenga una noción de la comodidad media y se evitan los sucesos no estacionarios/instantáneos.

El procedimiento a llevar a cabo para la realización de este método contempla:

1. Medición de las aceleraciones en el suelo del vehículo.
2. Digitalización y cómputo de valores cuadráticos medios en intervalos de tiempo de 5 minutos así como el percentil 95.

En la tabla 2 podemos encontrar la escala para el índice de comodidad N_{MV} :

$N_{MV} < 1,5$	Muy cómodo
$1,5 \leq N_{MV} < 2,5$	Cómodo
$2,5 \leq N_{MV} < 3,5$	Medio
$3,5 \leq N_{MV} < 4,5$	Incómodo
$N_{MV} > 4,5$	Muy incómodo

Tabla 2: Índice de comodidad N_{MV}

En este trabajo se llevará a cabo el cálculo de la Comodidad Media mediante el cálculo del índice N_{MV} . Como se ha comentado la norma va más allá, realizando además cálculos relativos a la Comodidad Continua (con los índices de comodidad $C_{cy}(t)$ y $C_{cz}(t)$), curvas de transición (P_{CT}) y eventos discretos (P_{DE}). Estos procedimientos no entran dentro del objetivo de este trabajo pero pueden ser encontrados en la norma.

Para más información sobre los efectos de las vibraciones y el confort de las personas consultar la norma ISO 2631 [10].

Finalmente, se realizan unas definiciones que son relevantes en la norma:

- **Comodidad Media**
Nivel de comodidad percibida, ajustado continuamente, tal como se evalúa por medición durante un intervalo de tiempo largo (por lo menos algunos minutos).
- **Comodidad Continua**
Nivel de aceleraciones, ponderado en frecuencia ISO, evaluado continuamente como un conjunto de valores rms (valor cuadrático medio) en dirección vertical, transversal y longitudinal sobre un intervalo de tiempo corto (normalmente 5 s).
- **Zona de ensayo**
Intervalo de cinco minutos continuos, que se utiliza para la evaluación de la Comodidad Media.

2.3. **UNE-EN 13749**

2.3.1. **Objetivo**

La norma UNE-EN 13749 es el estándar genérico para la resistencia de los cuerpos, y define el procedimiento para la construcción de los chasis de los vehículos ferroviarios, así como para su diseño y evaluación.

Dentro de sus objetivos se encuentra el recomendar un procedimiento estandarizado y comprensivo para la realización de ensayos de vía para la evaluación del chasis del vehículo. Además, también se analiza la resistencia a fatiga y la amplitud de aceleración de daño equivalente.

2.3.2. **Resumen de la norma**

El proceso de validación para la resistencia mecánica del chasis:

- Verificación matemática.
- Pruebas estáticas en laboratorio
 - Para calcular las tensiones producidas por el peso propio del vehículo.
- Pruebas de fatiga en el laboratorio.
- Ensayos en vía
 - Medir cargas de operación.
 - Evaluar prerequisites de diseño.

Los ensayos en vía se deben llevar a cabo con cargas, calidad de vía y perfiles de velocidad para las condiciones de operación reales.

Se distinguen distintos tipos de ensayos según la ruta de referencia:

- Vías en ciudad (tranvías) y regionales.
- Larga distancia, convencional.
- Larga distancia, alta velocidad.
- Vehículos de carga.
- Tren pendular.

Se realiza esta distinción debido a que estos distintos modos de operación, producen distintas fuerzas en los chasis de los vehículos. Por ejemplo, en vías de ciudad y regionales, las tensiones son mayores que en vehículos de carga, y estas a su vez son mayores que las producidas en vías de alta velocidad, donde la calidad tanto geométrica de la vía como el contacto rueda-carril es superior.

2. *NORMATIVAS VIGENTES*

Si una locomotora va a ser operada en más de una ruta de referencia, será evaluada en la ruta más exigente.

De mayor a menor exigencia en cuanto a tensiones producidas:

regional veloz > regional > larga distancia convencional > alta velocidad

Las rutas de referencia tienen que evaluarse en vacío (sin carga) y cargado. Para cada tipo de chasis se deben usar al menos 30 puntos de medición.

Respecto al análisis de los datos medidos:

1. Procesar señal → Eliminar offset, medidas extrañas...
2. Convertir esfuerzos en tensiones → Ley de Hooke.
3. Cálculo de fatiga → Método de rainflow-counting.

Este procedimiento no se va a realizar en este trabajo, pues no se dispone de los medios para realizar las mediciones. Aún así, es una norma de suma importancia y es importante que la persona que se inicie en este sector tenga conocimiento de su existencia.

3. Postprocesado de señales

Cátedra Stadler: 21/09/2017 → 21/01/2018

Tratamiento de datos experimentales.

Tutores: Rafael Gisbert y Daniel Gabriel.

3.1. Resumen

En esta sección se va a realizar el postprocesado y análisis de datos experimentales, explicando su procedimiento. Estos datos se recogen mediante acelerómetros y galgas extensiométricas colocadas en los bogies, pivote, en los asientos o el suelo de la caja (depende del análisis que se esté realizando, como puede ser la evaluación del confort o la dinámica del vehículo).

En la figura 5 podemos apreciar ejemplos de equipos de medida:

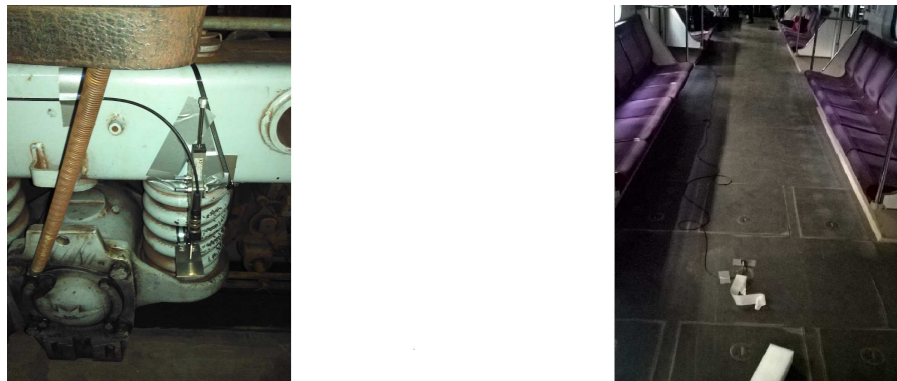


Figura 5: Ejemplo de equipo de medida

El primer paso es recoger los datos experimentales, y para ello se coloca el equipo de medida y se realiza el ensayo. Desde el punto de vista de este trabajo, la medición se llevará a cabo mediante una aplicación del teléfono móvil, lo cual se explicará más adelante en la sección 4.1 cuando pasemos a los casos de estudio.

Una vez recogidos los datos, nos disponemos a trabajar con ellos. A la hora de realizar los distintos análisis se empleará MATLAB®. Seguiremos la siguiente secuencia de trabajo:

1. Documentación de medidas

- a) Especificación de ensayo → En este documento se encuentra la información referente al tipo de vehículo, cliente, vías de ensayo, propósito, canales, posición de sensores, dirección y sentido de sensores, frecuencia de muestreo, responsable especificación y en definitiva, cualquier información de interés referente al ensayo realizado.

3. POSTPROCESADO DE SEÑALES

- b) Documentación de ensayo → Número de serie, fecha, condiciones, fotografías, responsable, personal a bordo.
- c) Normalización y descripción runs⁵ → Nombre de los runs, fecha y hora, sentido, línea de circulación, cabina, condición de carga.
- d) Report de ensayo → Se recoge todo lo anterior con los resultados de las evaluaciones realizadas.

2. Análisis general de señales ⁶

- a) Plausibilidad de señales → Visualización y valores característicos (media, max, min, rms) de la señal, derivas.
- b) Preparación de señales → Escala, offset, filtro, eliminación de picos, concatenación de runs.
- c) Análisis de señales
 - 1) PSD's ⁷. Esta función aporta información sobre como se distribuye la potencia de una señal en función de la frecuencia.
 - 2) Nubes de puntos de variables vs velocidad.
 - 3) Histogramas de velocidad.

3. Dinámica EN14363 ⁸.

- a) Seguridad y estabilidad bogie.
- b) Seguridad y calidad de marcha caja.

4. Análisis de Confort ⁹.

- a) Confort ISO 2631 → aceleración equivalente, horas de exposición.
- b) Confort EN12299.
 - 1) Nmv por runs.
 - 2) Nmv por velocidades,

5. Análisis estructural/fatiga ¹⁰.

⁵Run es el nombre genérico que se le da al ensayo, se usará bajo esta definición de aquí en adelante

⁶Utilizaremos distintos scripts → fileAnalyzer.mat, fileProcessor.mat, spikeRemoval.mat, PSDAnalyzer.mat

⁷PSD: Power Spectral Density

⁸Se usan los siguientes scripts → calculoEN14363.mat, postprocesoEN14363

⁹Scripts a usar en este análisis → calculaCONFORT.mat, postProcesoCONFORT.mat, postProcesoEN.mat)

¹⁰Scripts para estos cálculos → damageEquivalentAmplitude.m, rainflow.m

3. POSTPROCESADO DE SEÑALES

a) EN13749

- 1) β con acelerómetros.
- 2) α , β , torsión con captadores.
- 3) Método por daño equivalente de rainflow.
- 4) Método de determinación de aceleraciones excepcionales.

Como se comentó en el apartado 2.3, el punto del análisis estructural y fatiga no se va a realizar en los casos de estudio que se van a proponer en este trabajo debido a falta de medios para realizar las mediciones pertinentes.

A continuación se explica a modo de ejemplo cada apartado, desde la documentación de medidas hasta los distintos análisis. Se emplearán las mediciones de un ensayo que se denominará ensayo1¹¹.

3.2. Documentación de medidas

Comenzaremos trabajando con el ensayo1.

Como se ha introducido en la secuencia de trabajo, se comenzará con la documentación de medidas.

El propósito del ensayo1 es describir los procedimientos de ensayo para las medidas en el metro, como parte de las actividades mejorar la red del metro en cuanto a los requerimientos de vagón.¹²

Especificaciones de ensayo		Report de ensayo			
		Documentación de ensayo		Runs	
Tipo vehículo	De rail con 2 bogies	Nº serie	*****	Run	1
cliente	ensayo1	Fecha	21/07/17	Fecha	17/05/17
Vías de ensayo	****	Condiciones		Hora	12:12-12:27
Propósito	-	Responsable	*****	Sentido	-
Canales	Anexo 8.1			Coche	5
Sensores	Anexo 8.1				
Frecuencia	800 Hz			Carga	

Tabla 3: Documentación de Ensayo a modo de ejemplo del ensayo1

La tabla 3 contiene la información de la documentación del ensayo. Esta tabla o una de similares características se realizaría con la información pertinente para cada ensayo.

¹¹Estas señales de ensayo fueron proporcionadas por Stadler Rail durante la realización de la Cátedra y no se dice su origen por privacidad

¹²Se omiten algunos datos como números de serie, nombres de responsables u otros por confidencialidad

3.3. Análisis general de señales

En este apartado visualizamos las señales medidas y a través de distintos scripts de MATLAB®, tratamos las señales:

- **fileAnalyzer.mat**: Antes de correr el archivo, mediante un archivo de configuración podemos imponer un filtro paso bajo, o cambiar las unidades de las medidas ($\frac{m}{s^2}$ para las aceleraciones de los acelerómetros y mm para los desplazamientos de las galgas/bandas extensiométricas) mediante un cambio de escala. También podemos exportar la señal a *GoogleEarth* y qué valores queremos representar (picos, medios, RMS etc).

Al correr el script, obtendremos las gráficas de cada canal ¹³ con sus valores representativos respecto de la velocidad y del tiempo. De esta manera, se puede observar a que velocidades pueden surgir problemas (por ejemplo si la aceleración en algún eje es demasiado grande a partir de alguna velocidad). También obtendremos un histograma de velocidad y un archivo excel con información recopilada de todos los canales en cada ensayo. En este excel, podemos ver los valores medios, máximos, mínimos o RMS, y podemos comparar el valor de un mismo canal en diferentes ensayos. Siguiendo con el ejemplo del ensayo proporcionado por Stadler, al haber realizado 4 ensayos, si vemos que el valor de un canal (normalmente valor máximo en valor absoluto, ya que un ruido puede aparecer en un momento determinado pero no variar de manera notable la media) es similar en 3/4 de los ensayos, pero difiere de manera significativa en otro, lo tendremos que tener en cuenta para pasos posteriores del tratamiento de la señal (limpieza de señal mediante *spikeRemoval.mat*), ya que la variación grande en el valor de ese canal puede deberse a un mal funcionamiento de algún aparato o alguna interferencia.

Por ejemplo, comparando los valores máximos absolutos del canal Axlebox AZ 1 en la tabla 4:

run	Axlebox AZ 1
Run_LEADING_2	214,81
Run_LEADING_3	990,34
Run_TRAILING_5	943,83
Run_TRAILING_6	839,64

Tabla 4: Valores máximos absolutos del ACC.2 → Axlebox AZ 1

Se observan discrepancias en estos valores. Debido a que se trata del mismo canal, sería esperable encontrar valores de magnitud similar en cada ensayo. Al no darse esta situación y encontrar una disparidad en los resultados, se recurre a plotear las señales y así observar el origen del posible error.

¹³Canal es referido a las distintas variables medidas en el ensayo y con las cuales se trabaja, como pueden ser las aceleraciones (en los 3 ejes) o la velocidad

3. POSTPROCESADO DE SEÑALES

En la figura 6 se pueden observar las cuatro señales con sus respectivas gráficas PSD:

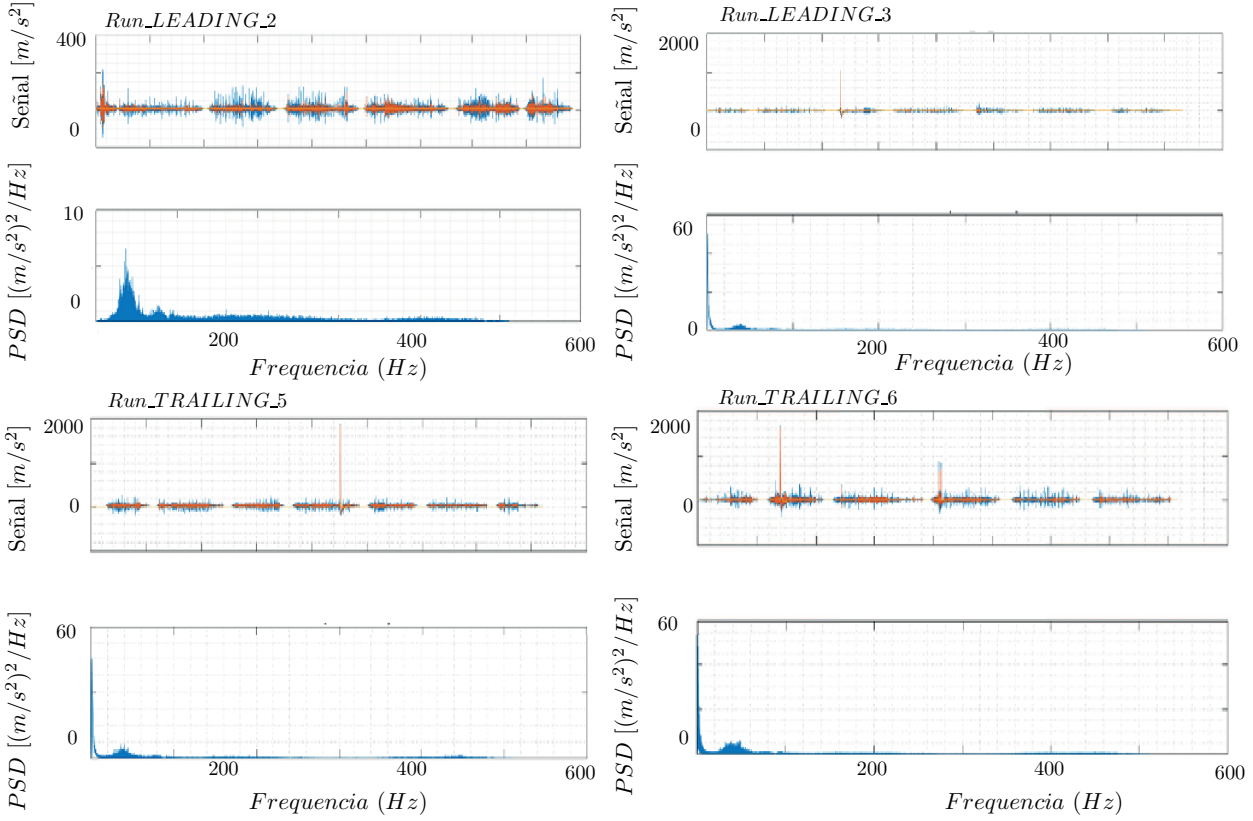


Figura 6: Axlebox AZ 1. PSDs

El trabajo del ingeniero también consiste en darse cuenta de posibles fallos en la señal. Al ver los valores máximos absolutos de la tabla 4, se observaba una disparidad en el valor del primer ensayo (Run_LEADING_2). Se procede pues a observar las distintas señales obtenidas de los ensayos, y se ven unos picos en las otras tres señales. Estos picos no pertenecen a la señal (pueden tener un origen eléctrico). El ensayista ¹⁴, se percató pues de que esos picos no se pertenecen a la señal, por tanto, decide eliminarlos.

Para realizar esta acción de limpieza de la señal se recurre al script de Spike-Removal. Además de la posibilidad de que aparezcan picos en la señal como en este ejemplo, pueden existir offsets, tramos de la señal defectuosos por un fallo de calibración de un acelerómetro, etc. Cualquier error, ya sea humano o del aparato puede provocar fallos en la señal, y estos errores han de ser subsanados. Si por un casual la señal tuviera demasiados errores, puede que fuera más conveniente realizar de nuevo otro ensayo para obtener nuevas medidas.

- **SpikeRemoval.mat**: Tras haber corrido el fileAnalyzer y haber detectado posibles picos o señales extrañas, se procede a la eliminación de las partes de la señal

¹⁴Referido al ingeniero que trabaja realizando el análisis de las señales de ensayo

3. POSTPROCESADO DE SEÑALES

que no sirven. Como en el caso del script anterior, contamos con un fichero de configuración, en el cual seleccionamos los runs o canales con los que queremos trabajar. Si se ha identificado al analizar la señal los runs y canales que muestran valores sospechosos ¹⁵, no nos hará falta correr el programa con todas las señales e iremos directamente a las que puedan presentar anomalías.

Al correr el programa, nos van apareciendo las señales correspondientes a los canales de los runs seleccionados, y en ellas se nos señalan de manera automática los picos. Cada pico podemos seleccionar eliminarlo o dejarlo. Se trabaja así hasta que se han analizado todos los canales y runs que hemos seleccionado en el fichero de configuración.

De esta manera, tras finalizar el corrido del programa, al eliminar los picos lo que se ha hecho es trocear la señal, de manera que si del run 1 se ha eliminado un pico, ahora se pasará a tener dos runs \rightarrow run 1.1 y run 1.2. Finalmente, se habrán obtenido unos archivos limpios ¹⁶. Es buena idea volver a pasar el fileAnalyzer a estos archivos limpios, para comprobar así que ya no hay valores discordantes.

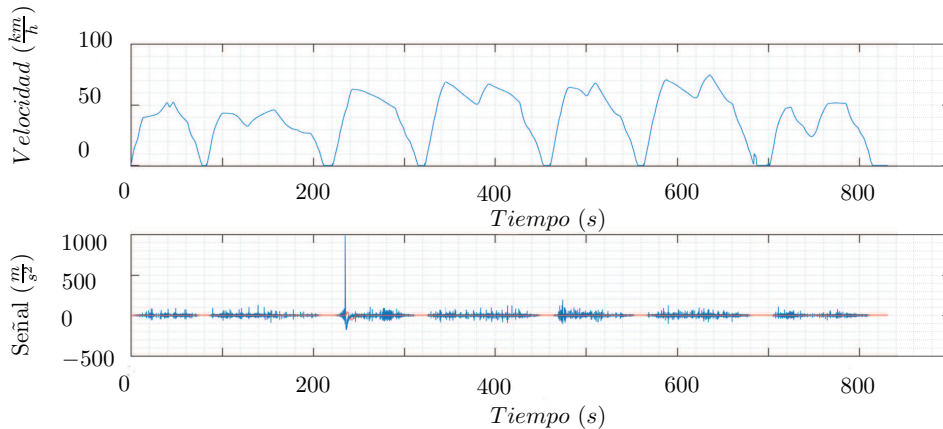


Figura 7: Run_LEADING_3.mat. Canal Axlebox_AZ_1

En la figura 7 se puede observar la señal del canal Axlebox AZ 1 correspondiente al Run_LEADING_3, la cual se ha concluido que presentaba un pico que no pertenecía a la señal. Como se puede apreciar, para $t = 235s$ aproximadamente encontramos el pico que no nos interesa.

Tras aplicar el script de spikeRemoval y eliminar el pico, obtenemos:

¹⁵La experiencia del ingeniero y el *knowhow* juegan un papel importante

¹⁶Estos archivos limpios no presentan valores anómalos y se consideran preparados para realizar las distintas evaluaciones del vehículo

3. POSTPROCESADO DE SEÑALES

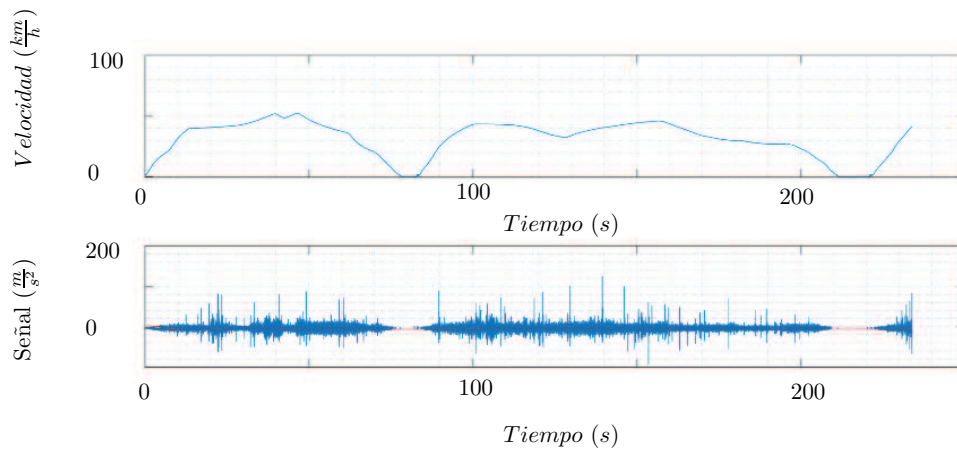


Figura 8: Run_LEADING_3.1.mat

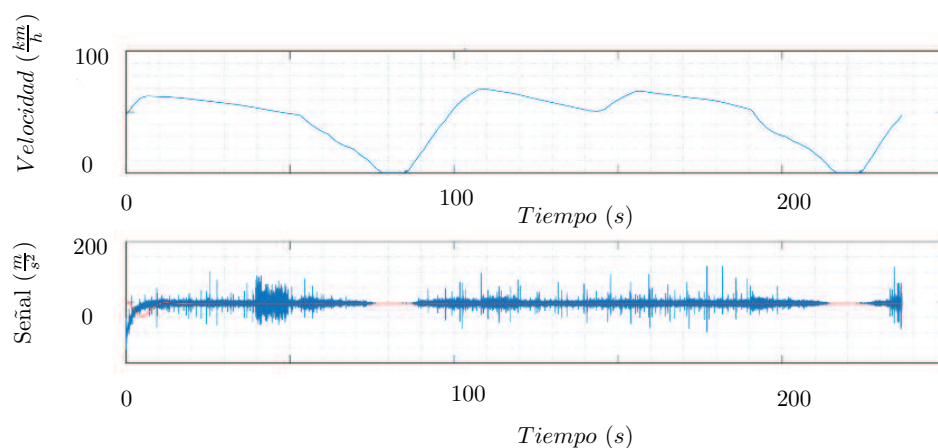


Figura 9: Run_LEADING_3.2.mat

Tras aplicar el spikeRemoval, vemos como el Run_LEADING_3 se divide en el Run_LEADING_3.1 (figura 8) y el Run_LEADING_3.2 (figura 9). La función lo único que hace es eliminar un $\Delta t \ll$ de la señal, dividiéndola en dos señales.

Se puede comprobar también que se ha corregido la función PSD, viendo ahora una distribución de potencia en frecuencia más acorde a lo esperado:

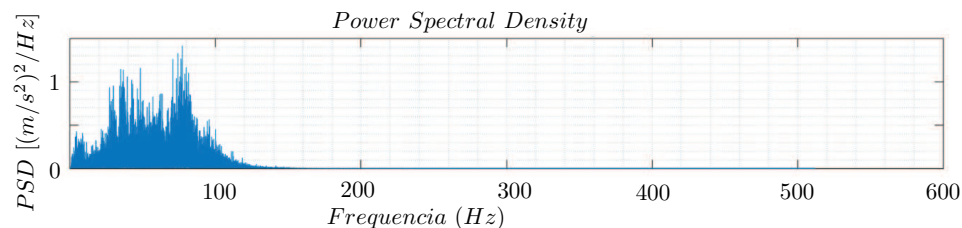


Figura 10: PSD Run_LEADING_3.1.mat

3. POSTPROCESADO DE SEÑALES

Como se puede observar en la figura 10, la PSD ya no tiene un pico en 0 Hz como en la figura 6.

3.4. Análisis dinámica

3.4.1. EN14363

En el análisis de dinámica se realizan las evaluaciones del running safety y ride characteristics.

La norma EN 14363 define los valores límites para ambas evaluaciones, indicando el método por el cual se tiene que llevar a cabo la evaluación y el valor límite según el tipo de vehículo en cuestión. En la figura 11 se muestran los distintos métodos y valores límites para las evaluaciones del running safety¹⁷:

Assessment quantity L = to be compared with limit value; D = to be documented, but not to be compared with the limit value		Test method			Limit values		
		Normal	Simplified H-Force	Simplified acceleration	Locomotives, Traction units, passenger vehicles	Freight wagons with bogies	Freight wagons with single axles
Running safety							
Sum of guiding forces of left and right wheel	$\Sigma Y_{j,max}$ ($Y_{j1} + Y_{j2}$)	L	—	—	$k_1 (10 \text{ kN} + P_{F0}/3)$ $k_1 = 1,0$		$k_1 (10 \text{ kN} + P_{F0}/3)$ $k_1 = 0,85$
Derailment coefficient	$(Y/Q)_{j,a,max}$	L	—	—	0,80 ^a		
Lateral axle box force	$H_{j,max}$	—	L	—	$k_2 (10 \text{ kN} + P_{F0}/3)$ $k_2 = 0,90$		$k_2 (10 \text{ kN} + P_{F0}/3)$ empty: $k_2 = 0,75$; loaded: $k_2 = 0,80$
Lateral acceleration on bogie frame above axle box	$\ddot{y}_{j,max}^*$ (only bogie vehicles)	(D) ^b	(D) ^b	L	12 m/s ² - ($m^* / 5 \text{ t}$) · m/s ²		—
Lateral acceleration on vehicle body above running gear	$\ddot{y}_{m,S,max}^*$	D	D	L	Test zone 1, 2: 3,0 m/s ^{2 c} Test zone 3: 2,8 m/s ^{2 c} Test zone 4: 2,6 m/s ^{2 c}	3,0 m/s ^{2 c}	$P_{F0} \leq 60 \text{ kN}$: 4,0 m/s ^{2 c} 60 kN < P_{F0} < 200 kN: 4,43 m/s ² - ($P_{F0} / 140 \text{ kN}$) · m/s ^{2 c} $P_{F0} \geq 200 \text{ kN}$: 3,0 m/s ^{2 c}
Vertical acceleration on vehicle body above running gear	$\ddot{z}_{m,S,max}^*$	D	L	L	3,0 m/s ² single suspension or deflated air spring: 5,0 m/s ²		5,0 m/s ^{2 d}

Figura 11: Running safety ensayo1 según EN 14363

A continuación se exponen algunos de los resultados de la evaluación del running safety del ejemplo de ensayo con el que estamos trabajando:

Resultados correspondientes al bogie:

¹⁷Figura 11 extraída de la norma EN 14363

3. POSTPROCESADO DE SEÑALES

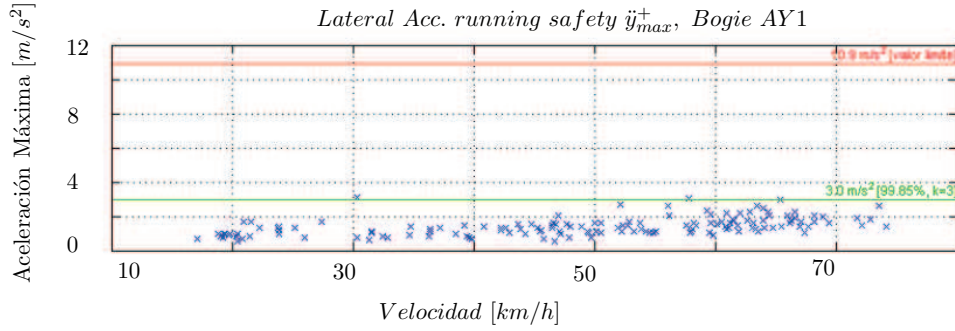


Figura 12: Running safety ensayo1 → Resultados bogie

	Bogie AY 1	Bogie AY 2
Límite	10,9	10,9
Medido 1	2,96	2,83

Tabla 5: Aceleraciones en bogie según Running safety ($\frac{m}{s^2}$)

Resultados correspondientes a la caja del vehículo:

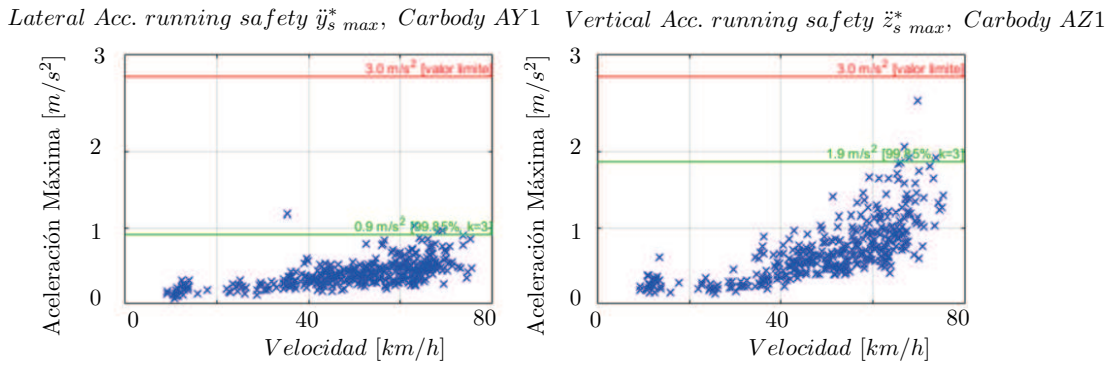


Figura 13: Running safety ensayo1 → Resultados caja

	Safety Y	Safety Z
Límite	3	3
Carbody AY 1	0,922	1,871
Carbody AY 2	0,717	1,844

Tabla 6: Aceleraciones en caja ensayo1 según Running safety ($\frac{m}{s^2}$)

Observamos tanto en las figuras 12 y 13 como en las correspondientes tablas 5 y 6 que los valores de las aceleraciones medidos en bogie y caja según el running safety son menores que los límites establecidos según la norma expuestos en la figura 11.

3. POSTPROCESADO DE SEÑALES

Por su parte, la evaluación de las ride characteristics, también viene definida en la norma EN 14363 en la figura 14¹⁸:

Assessment, vehicle, test conditions	Typical maximum estimated values for accelerations in vehicle body [m/s ²]	
	$\ddot{y}_{q,max}^*$	$\ddot{z}_{q,max}^*$
Ride characteristics		
Locomotives, power cars (without shunting locomotives)	2,5	2,5
Shunting locomotives	to be defined.	to be defined.
Multiple units, passenger coaches	1,5	2,0
Freight wagons with bogies, empty	< 3 (preliminary)	< 5 (preliminary)
Freight wagons with bogies, loaded	3,5	5,0
Freight wagons without bogies, empty	to be defined.	to be defined.
Freight wagons without bogies, loaded	to be defined.	to be defined.

NOTE The stated ranges for the vehicle types represent the maximum estimated values measured on several vehicles during tests according to UIC 518 [11] or EN 14363:2005. For each vehicle the highest evaluated values of the different measuring points according to Table 3 were used (in normal and not in fault mode condition).

Figura 14: Ride characteristics ensayo1 según EN 14363

	Carbody 1 Y	Carbody 1 Z	Carbody 2 Y	Carbody 2 Z
Límite	2,5	2,5	2,5	2,5
Medido	0,89	1,81	0,65	1,87

Tabla 7: Ride characteristics ensayo1

Los límites de la tabla 7 muestran los valores típicos mostrados por los vehículos operados en Europa. Si se comparan los valores obtenidos con estos valores se puede obtener una idea del confort de viaje, aunque este tiene una evaluación propia regulada por la norma EN 12299.

Como se puede observar, los valores se encuentran dentro de los límites establecidos por la norma, aunque se podría mejorar las características de viaje en la dirección vertical.

3.5. Análisis confort

3.5.1. EN 12299

Este análisis se centra en el cálculo del índice de comodidad N_{MV} . Para llevarlo a cabo, se realiza el cálculo del percentil 95 en muestras de 5 minutos (300 segundos).

¹⁸Figura 14 extraída del documento EN 14363

3. POSTPROCESADO DE SEÑALES

Siguiendo con el ejemplo del ensayo1 para mayor claridad de aplicación de la norma, se definen dos puntos de medición:

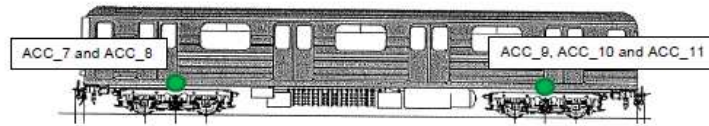


Figura 15: Posición de los acelerómetros en caja del vehículo

Los acelerómetros 7 y 8 constituyen el canal denominado Carbody_1, mientras que los 9, 10 y 11 forman el Carbody_2.

Tal y como define la norma, se puede apreciar en la figura 15 como los acelerómetros se encuentran en el suelo de la caja del vehículo.

Se realiza el cálculo de los N_{MV} y se adjuntan los resultados a continuación:

Test run		Carbody_1	Carbody_2
Run 2	0-300s	1.8	1.8
	300-600s	2.4	2.4
	600-885s	2.1	2.0
Run 3	0-300s	1.8	1.5
	300-600s	2.3	2.3
	600-830s	2.3	2.3
Run 5	0-300s	2.5	1.9
	300-600s	2.0	1.8
	600-820s	1.5	1.8
Run 6	0-300s	2.6	2.2
	300-600s	2.2	2.1
	600-815s	1.8	1.9
Nmv Average		2.1	2.0

Figura 16: Resultados N_{MV} ensayo1

La norma EN 12299 establece que los tramos para el cálculo del índice de comodidad N_{MV} han de ser de 5 minutos, pero no establece la forma de calcular un valor *global* de ese índice. Se ha optado por el cálculo de la media de todos los valores para el establecimiento del N_{MV} *global*.

Los resultados obtenidos muestran que el índice de comodidad, acorde con lo establecido en la norma EN 12299, se encuentra dentro del rango *muy cómodo*.

3.6. Análisis fatiga

Las cargas aplicadas en el truck frame se pueden aproximar mediante el movimiento de la caja del vehículo.

Este movimiento se evalúa mediante las aceleraciones de la caja (canales Carbody definidos en el Anexo 8.1 y los canales de desplazamiento de suspensión DISP_14 y DISP_15 también definidos en el Anexo 8.1). Los acelerómetros se colocan en el suelo de la caja del vehículo justo encima del centro de los bogies y los transductores de desplazamiento en los muelles secundarios de suspensión.

Las cargas aplicadas se pueden dividir en dos movimientos: bounce y roll. El bounce se encuentra influenciado por las irregularidades verticales de la vía y el roll está dominado por un movimiento cuasi-estático en las curvas.

3.6.1. Bounce (Coeficiente β)

El movimiento de bounce se caracteriza por el coeficiente β adimensional. Este coeficiente se calcula de distinta manera según el movimiento que se esté midiendo:

- Aceleraciones $\rightarrow \frac{a}{9,81}$
- Desplazamientos¹⁹. $\rightarrow \frac{d}{37,5 \cdot 10^{-3}}$

Canal	β
ACC_8	0,266
ACC_11	0,258
DISP_12 y DISP_13	0,288

Tabla 8: Resultados coeficiente β

La tabla 8 muestra los resultados del coeficiente adimensionalizado β para el caso del ensayo1.

3.6.2. Roll (coeficiente α)

El coeficiente α se calcula mediante la diferencia vertical en el desplazamiento de los dos muelles secundarios de suspensión adimensionalizado con 37,5 mm (igual que en β).

Canal	α
DISP_12 y DISP_13	0,148

Tabla 9: Resultados coeficiente α

¹⁹37,5 mm es la diferencia en longitud entre la extensión natural del muelle y la extensión del muelle con el vehículo con la carga de ensayo

3. POSTPROCESADO DE SEÑALES

La tabla 9 muestra los resultados del coeficiente adimensionalizado α para el caso del ensayo1.

3.6.3. Amplitud de aceleración de daño equivalente (EN 13749)

Este método permite obtener unas estimaciones de las aceleraciones inerciales, las cuales se usan para el diseño del bogie entre otras cosas.

Para llevar a cabo el análisis se realizan los siguientes pasos:

1. Método de rainflow.
2. Amplitud equivalente \rightarrow Método Miner-Haibach para el cálculo de daño²⁰.

	ACC_3	ACC_4	ACC_5	ACC_6
Equivalent value	11,9	20,3	8,2	27,5
EN 13749 reference	50	60	25	30

Tabla 10: Aceleraciones de daño equivalente en bogie

	ACC_3	ACC_4
Equivalent value	26,2	121,2
EN 13749 reference	50	250

Tabla 11: Aceleraciones de daño equivalente en axlebox

Finalmente, se observa que los valores obtenidos en la evaluación de la amplitud equivalente en las tablas 10 y 11 se encuentran por debajo de los límites establecidos por la norma EN 13749.

²⁰Método detallado en la norma EN 13749

4. Casos de estudio

4.1. Realización de las medidas

Para la realización de los casos de estudio se ha empleado la aplicación *Sensor Play*. Esta aplicación es una aplicación de pago disponible en la App Store para dispositivos iOS (Apple).

Esta aplicación permite la grabación de distintos datos que nos resultan de interés, los cuales se enumeran a continuación:

- **Acelerómetro** → En los tres ejes (X, Y, Z).
- **Giroscopio** → Ángulos en los tres ejes (Cabeceo, alabeo, guiñada).
- **Localización GPS** → Latitud, longitud, altura y velocidad.
- **Brújula** → Norte magnético y norte geográfico.
- **Barómetro**

De todas estas opciones las que se usarán para la realización de los casos de estudio son el acelerómetro y la localización GPS.

A continuación, se muestran unas imágenes de la interfaz de la aplicación:



Figura 17: Logotipo de la aplicación *Sensor Play*

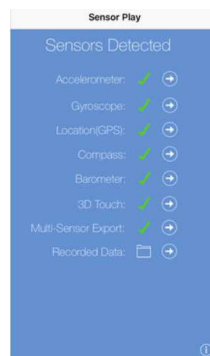


Figura 18: Pantalla principal de *Sensor Play*

4. CASOS DE ESTUDIO

Para la realización de las mediciones se adhiere mediante el uso de cinta aislante el teléfono al suelo de la caja del vehículo, dejando la aplicación grabando. Esto proporcionará la señal de ensayo.

Una vez realizada la medición, la aplicación crea un archivo con extensión .csv, el cual se puede exportar por correo. Debido a que el postprocesado de las señales se realiza en MATLAB®, este archivo ha de ser transformado en el formato requerido para poder trabajar con él.

Se puede apreciar en la figura 19 un ejemplo de datos de ensayo recopilados mediante esta aplicación:

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Timestamp,accelX,accelY,accelZ,Lat,Long,Speed(mph),TrueHeading,Alt(feet)							
2	27-oct-2017 20:24:36.158,-0.0023,-0.0232,-1.0247,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							
3	27-oct-2017 20:24:36.170,-0.0033,-0.0280,-1.0355,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							
4	27-oct-2017 20:24:36.178,-0.0100,-0.0224,-1.0280,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							
5	27-oct-2017 20:24:36.188, 0.0082,-0.0107,-1.0317,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							
6	27-oct-2017 20:24:36.198, 0.0023,-0.0135,-0.9977,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							
7	27-oct-2017 20:24:36.208, 0.0012,-0.0026,-0.9773,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							
8	27-oct-2017 20:24:36.218,-0.0041, 0.0072,-0.9581,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							
9	27-oct-2017 20:24:36.228,-0.0199,-0.0308,-0.9666,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							
10	27-oct-2017 20:24:36.237,-0.0073,-0.0213,-0.9855,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							
11	27-oct-2017 20:24:36.247,-0.0120,-0.0022,-1.0160,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							
12	27-oct-2017 20:24:36.256, 0.0121,-0.0286,-0.9702,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							
13	27-oct-2017 20:24:36.266,-0.0124,-0.0228,-0.9213,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							
14	27-oct-2017 20:24:36.276,-0.0143,-0.0103,-0.9082,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							
15	27-oct-2017 20:24:36.286,-0.0073, 0.0131,-0.9497,39.464224,-0.565916, 178.6420, 216.9336, 249.817215							

Figura 19: Datos recopilados mediante *Sensor Play*

Se realiza un conversor en MATLAB®, el cual nos pide el archivo en formato .csv y lo transforma al formato requerido para tratar la señal de ensayo en MATLAB®. Este conversor se encuentra en el anexo 8.2. De manera escueta se puede explicar su funcionamiento:

1. Se le requiere al usuario el archivo que desea transformar.
2. Se leen los distintos canales del archivo (AccelX, AccelY, AccelZ, G1_Latitude, G2_Longitude, G3_Altitude, G10_Velocity, Heading).
3. Se separan los tiempos del valor de los canales.
4. Se convierte del formato Horas:Minutos:Segundos a segundos los tiempos, restándoles el tiempo inicial para situar el origen en 0.
5. Debido a que el GPS del móvil no es exacto, creamos un vector de tiempos con una frecuencia de 100 Hz y mediante una extrapolación lineal obtenemos los nuevos datos con un paso temporal constante.
6. Finalmente, se guarda el nuevo archivo en la ruta deseada.

4.2. Ave Madrid-Valencia

En este apartado vamos a realizar el estudio de la Línea de alta velocidad Madrid-Levante, en su tramo Madrid-Valencia.



Figura 20: Línea de alta velocidad Madrid-Levante [11]

La figura 20 muestra el recorrido de la línea de alta velocidad Madrid-Levante con origen en Madrid y final en Valencia.

Se realizaron dos mediciones, una en el trayecto de ida (Valencia-Madrid) y otra en el de vuelta (Madrid-Valencia).

Se ha estudiado el tramo total así como tramos de 5 minutos según se encuentra establecido en la norma 2.2. Los resultados obtenidos en el análisis del tramo total pueden sufrir algunas particularidades en cuanto a la información GPS debido a la existencia de túneles durante el recorrido.

El trayecto se realiza sin parar en ninguna estación intermedia (Requena-Utiel y Cuenca-Fernando Zóbel).

El ancho de vía es el estándar, también denominado ancho UIC (1435 mm) [11].

4. CASOS DE ESTUDIO

Especificaciones de ensayo		Report de ensayo			
		Documentación de ensayo		Runs	
Tipo vehículo	AVE serie 112	Nº serie	AVE 05201	Run	1
cliente	-	Fecha	11/05/18	Fecha	27/10/17
Vías de ensayo	Madrid-Levante	Condiciones	Vía seca	Hora	20:15-21:56
Propósito	Dinámica/confort	Responsable	C. Aparisi	Sentido	Val-Mad
Canales	Anexo 8.3			Coche	5 ²¹
Sensores	Anexo 8.3			Plaza	09A
Frecuencia	100 Hz			Carga	

Tabla 12: Documentación de Ensayo 27/10/17 run 1 AVE Ida

Especificaciones de ensayo		Report de ensayo			
		Documentación de ensayo		Runs	
Tipo vehículo	AVE serie 112	Nº serie	AVE 05110	Run	2
cliente	-	Fecha	11/05/18	Fecha	29/10/17
Vías de ensayo	Madrid-Levante	Condiciones	Vía seca	Hora	11:55-13:37 ²²
Propósito	Dinámica/confort	Responsable	C. Aparisi	Sentido	Mad-Val
Canales	Anexo 8.3			Coche	5
Sensores	Anexo 8.3			Plaza	02A
Frecuencia	100 Hz			Carga	

Tabla 13: Documentación de Ensayo 27/10/17 run 2 AVE Vuelta

Las tablas 12 y 13 muestran la información correspondiente a la documentación del ensayo tal y como se ha expuesto en la sección 3.2.

²¹Anexo 8.10 y Parte 8.10 para más información respecto de la distribución de coches y asientos del AVE S-112

²²Las medidas acaban a las 13:33

4. CASOS DE ESTUDIO

4.3. Cercanías Valencia-Castellón



Figura 21: Plano de cercanías de Valencia

4. CASOS DE ESTUDIO

El ancho de vía no es el estándar de 1435 mm, sino de 1668 mm. [12]

Especificaciones de ensayo		Report de ensayo			
		Documentación de ensayo		Runs	
Tipo vehículo	S-447 Renfe	Nº serie		Run	1
cliente	-	Fecha	21/05/18	Fecha	21/05/18
Vías de ensayo	C-6	Condiciones	Soleado	Hora ²³	10:30-11:36
Propósito	Dinámica/confort	Responsable	C. Aparisi	Sentido	Cst-Val
Canales	Anexo 8.6			Coche	
Sensores	Anexo 8.6			Plaza	Centro
Frecuencia	100 Hz			Carga	

Tabla 14: Documentación de Ensayo 21/05/18 run 1

La tabla 14 muestra la información de la documentación de ensayo tal y como se ha explicado en la sección 3.2.



Figura 22: Fotografías del móvil usado para las medidas en el suelo de la caja del vehículo

La figura 22 muestra las fotografías durante la realización de la medición de las señales de ensayo en el Cercanías Valencia-Castellón.

²³Se incorpora en Anexo 8.9 el trayecto recorrido con las paradas y los horarios correspondientes

5. Resultados

En este apartado se presentan los resultados correspondientes a los casos de estudio presentados:

1. AVE Madrid-Valencia
2. Cercanías Valencia-Castellón

Para estos casos de estudio se ha realizado primero un análisis general de la señal, obteniendo valores característicos de la misma. A continuación, se han llevado a cabo los postprocesados posibles de acuerdo a las medidas realizadas, a saber:

- Análisis de dinámica EN 14363
 - Running safety en caja
- Análisis de confort EN 12299

5.1. Ave Valencia-Madrid

5.1.1. Análisis general de la señal

Lo primero que se hace es, mediante el script fileAnalyzer, observar los distintos valores de las variables que se han medido: medias, valores máximos absolutos, RMS etc.

Se comienza por representar algunos resultados de interés de la señal completa:

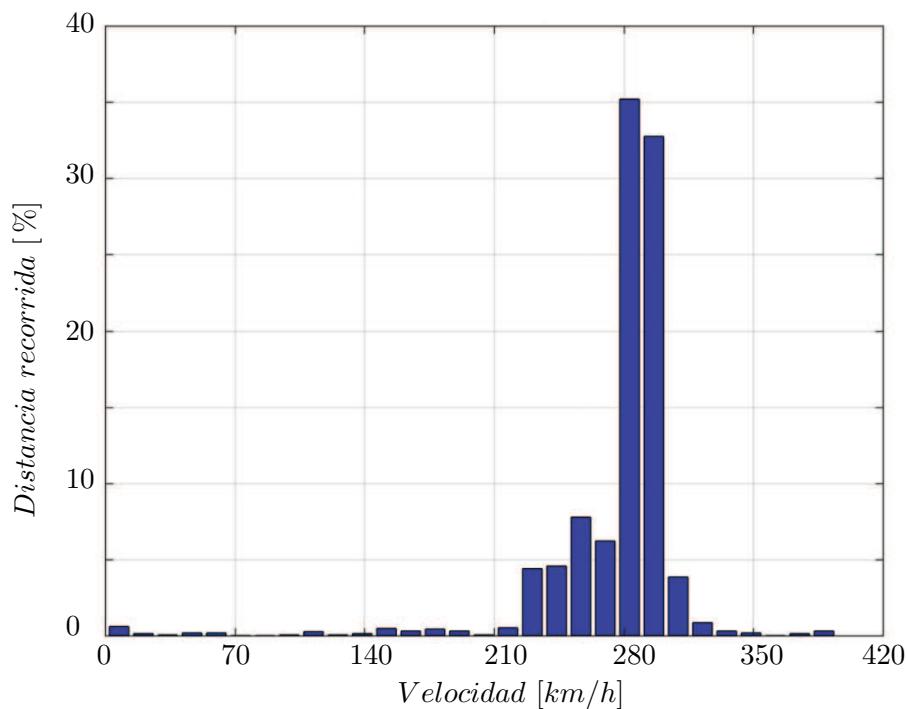


Figura 23: Histograma de velocidad trayecto AVE Valencia-Madrid

5. RESULTADOS

El histograma de la figura 23 muestra como el mayor porcentaje del recorrido se realiza en velocidades entre los 220-320 km/h , siendo de los 280-300 km/h las velocidades más usuales durante el trayecto. La velocidad máxima a priori permitida es de 330 km/h [13], aunque encontramos velocidades superiores debidas a la pérdida de señal GPS en túneles o sitios donde se pierde la señal.

También es posible exportar los datos GPS que se han obtenido a Google Earth y ver el trayecto recorrido:

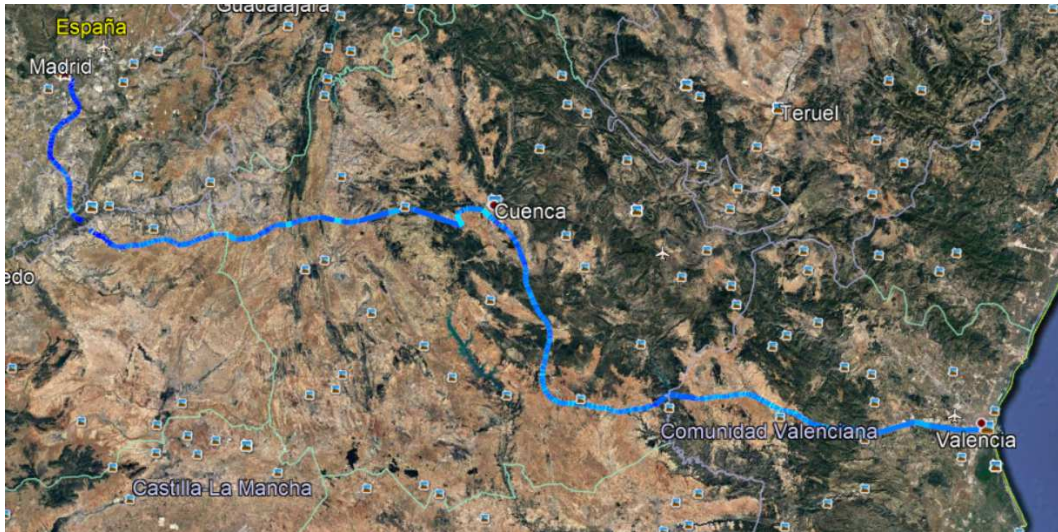


Figura 24: Trayecto AVE Valencia-Madrid en Google Earth

aceleración (m/s^2)	X	Y	Z
Media	0,008	-0,004	-9,833
MaxAbs	1,9	1,1	12,09
RMS	0,312	0,219	9,836

Tabla 15: Valores característicos de la señal run AVE_Ida

En la tabla 15 se puede apreciar los valores característicos de la señal correspondiente al trayecto del AVE Valencia-Madrid documentado en la tabla 12. Destacan las medias de las aceleraciones próximas a 0 (en el caso de los ejes X e Y) y a 9,8 m/s^2 en el caso del eje Z. Los valores máximos absolutos no parecen muy grandes y a primera vista parecen ser correctos.

Para un mejor entendimiento de la información recogida en el ensayo, se muestra a continuación en la figura 25 las señales de los tres canales de aceleración:

5. RESULTADOS

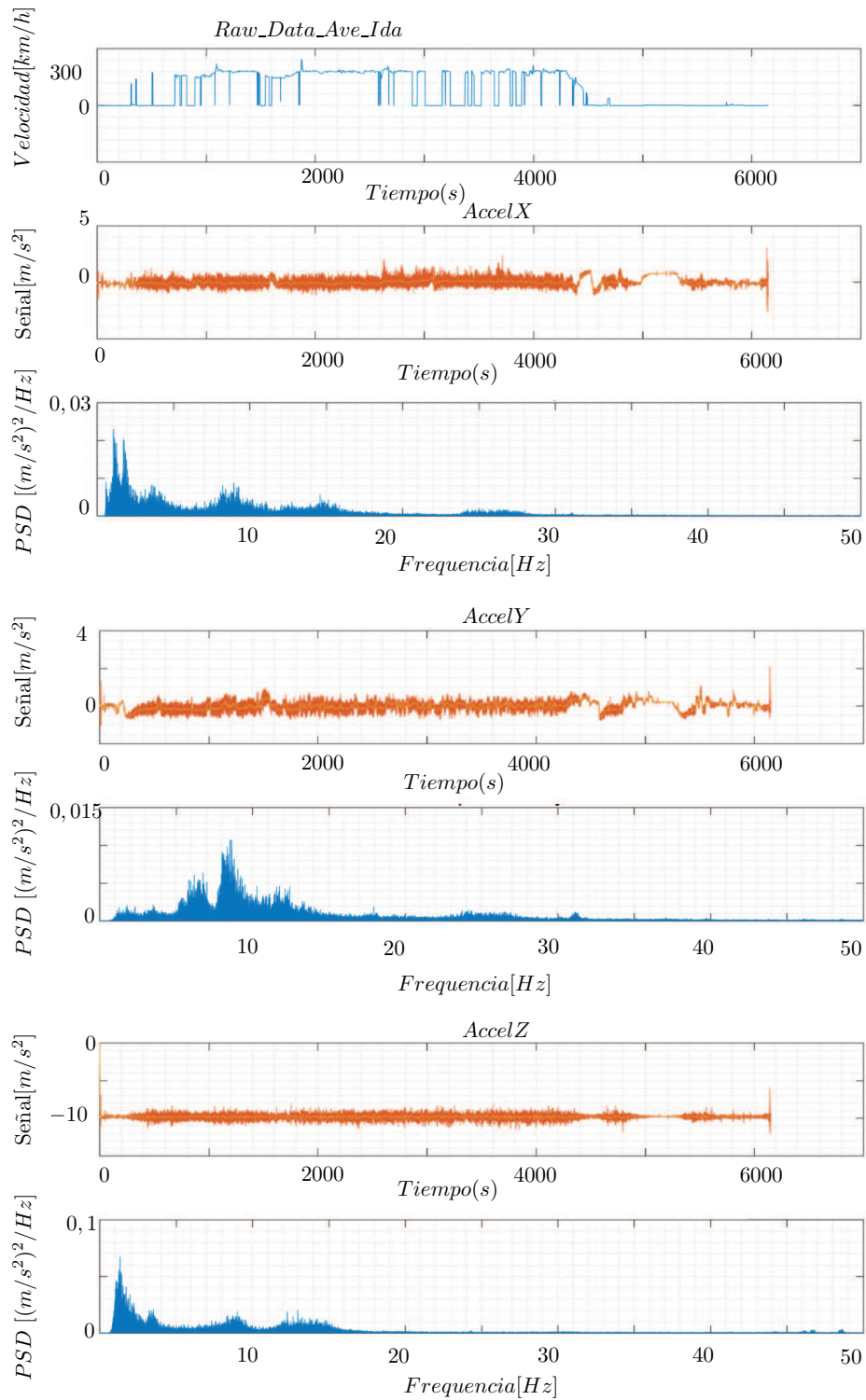


Figura 25: Señales y PSDs trayecto AVE Valencia-Madrid

5. RESULTADOS

En la figura 25 se muestra la señal temporal completa de las aceleraciones en X, Y, Z así como las PSDs en el dominio de la frecuencia, más la primera gráfica de la distribución de la velocidad ²⁴. En cuanto a las PSDs, lo que se puede observar es las frecuencias donde se contiene la mayor parte de la señal. En este caso se ve como el mayor contenido en frecuencias se concentra en frecuencias bajas.

De acuerdo a lo expuesto en la norma UNE-EN 12299 (sección 2.2), las frecuencias máximas a considerar serían de hasta 15 Hz en el eje Y y de 40 Hz en el Z. Como se puede observar, la mayor parte de la señal se encuentra definida en valores de frecuencia menores.

5.1.2. Análisis de dinámica AVE Valencia-Madrid

Pasamos a realizar el análisis de dinámica de la señal. A diferencia de lo expuesto en la sección 3.4, solamente se realizan los cálculos referidos a la caja del vehículo, omitiendo así los correspondientes al bogie, pues no es posible tomar las medidas adecuadas para este cálculo con las herramientas disponibles. Para ello se sigue la norma EN 14363, usando los ficheros descritos en el apartado 3. La figura 26 define los límites a tener en cuenta en esta evaluación:

Assessment quantity L = to be compared with limit value; D = to be documented, but not to be compared with the limit value		Test method			Limit values		
		Normal	Simplified H-Force	Simplified acceleration	Locomotives, Traction units, passenger vehicles	Freight wagons with bogies	Freight wagons with single axles
Running safety							
Lateral acceleration on vehicle body above running gear	$\ddot{y}_{m,S,max}^+$	D	D	L	Test zone 1, 2: 3.0 m/s ^{2 c} Test zone 3: 2.8 m/s ^{2 c} Test zone 4: 2.6 m/s ^{2 c}	3.0 m/s ^{2 c}	$P_{70} \leq 60 \text{ kN}: 4.0 \text{ m/s}^2 \text{ c}$ $60 \text{ kN} < P_{70} < 200 \text{ kN}: 4.43 \text{ m/s}^2 - (P_{70}/140 \text{ kN}) \cdot \text{m/s}^2 \text{ c}$ $P_{70} \geq 200 \text{ kN}: 3.0 \text{ m/s}^2 \text{ c}$
Vertical acceleration on vehicle body above running gear	$\ddot{z}_{m,S,max}^+$	D	L	L	3.0 m/s ² single suspension or deflated air spring: 5.0 m/s ²		5.0 m/s ^{2 d}

Figura 26: Running safety EN 14363

De acuerdo en lo establecido en la figura 3, la mayor parte del recorrido del AVE se centra en la zona de ensayo 1 (vía recta o con curvas de radio muy grande), por lo que acorde a la figura 26 se establece en 3 m/s² la aceleración lateral sobre la caja del vehículo. Aún así, al no haber realizado un estudio más a fondo sobre la geometría del recorrido, se opta por imponer el límite más restrictivo, en este caso 2,6 m/s², para estar del lado de la seguridad. Por su parte, la aceleración vertical de la caja viene definida por el tipo de suspensión del vehículo, la cual en este caso es neumática, de tipo pendular, con inclinación natural de las cajas hacia el interior de las curvas [13], por lo que se establece en 3,0 m/s².

²⁴Los picos en 0 ocurren por la pérdida de la señal GPS

5. RESULTADOS

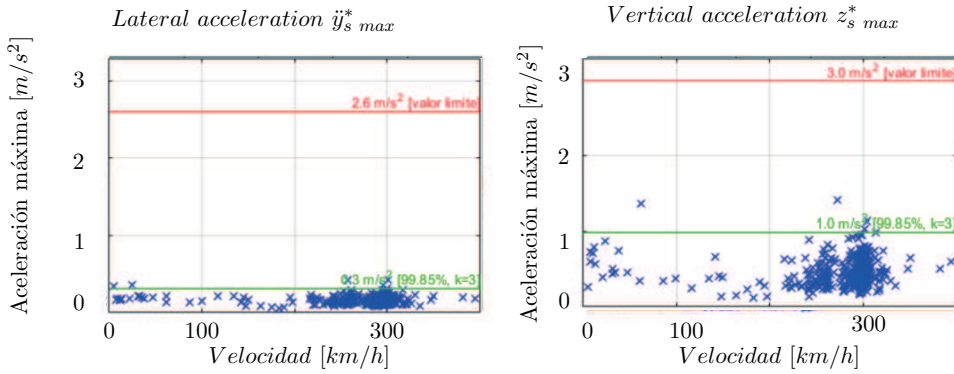


Figura 27: Running safety Carbody acceleration AVE Madrid-Levante

Como se aprecia en la figura 27, ambos resultados cumplen la normativa encontrándose dentro de los parámetros establecidos ²⁵.

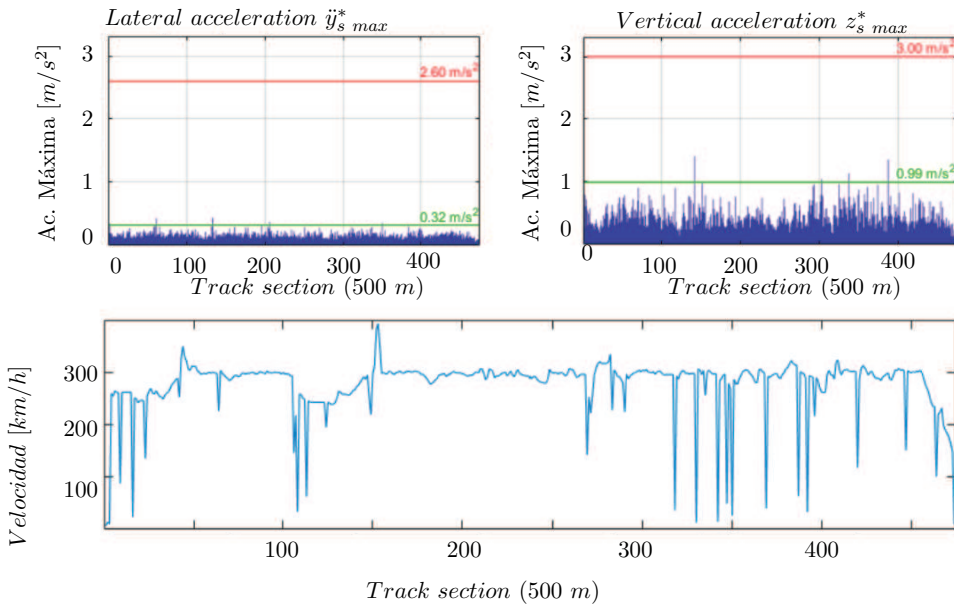


Figura 28: Running safety Carbody acceleration AVE Madrid-Levante

En la figura 28 se muestra lo mismo que en la figura 27, pero representando las aceleraciones respecto de la distancia recorrida. Los mínimos en 0 visibles en el gráfico de la velocidad respecto de las secciones corresponden con secciones donde no se tienen datos de velocidad debido a fallos de GPS (como los túneles). Estas secciones obviamente se recorren a una velocidad, por lo que el cómputo total de las secciones es menor del real. De la misma manera, se pueden observar en el mismo gráfico dos picos de señal cercanos a los 400 km/h , que también se corresponden con errores de medida. Estos picos eran esperados y ya se mostraban en el histograma de velocidades de la figura 23.

²⁵Se observan algunos valores de velocidad $\geq 330 km/h$ provocados por fallos del gps

5. RESULTADOS

Se muestran los resultados del running safety en la siguiente tabla ²⁶:

	Valor medido	Límite
Carbody_AY_1	0,316	2,6
Carbody_AZ_1	0,991	3

Tabla 16: Resultados running safety Carbody según EN 14363

La tabla 16 muestra como los resultados se encuentran muy por debajo de los límites establecidos, demostrando así la alta seguridad del vehículo. Se podría quizás, mejorar en el aspecto vertical.

5.1.3. Análisis de confort AVE Valencia-Madrid

Se ha optado por dividir la señal completa en tramos de unos 5 minutos tal y como se establece en la norma EN 12299.

La comodidad media se calcula siguiendo el método normal ²⁷, midiendo las vibraciones del suelo de la caja del vehículo.

Se realiza la evaluación tanto para los datos del AVE de ida (run 1 ²⁸) como para los de vuelta (run 2 ²⁹) para así establecer una comparativa y dotar de mayor verosimilitud a los resultados obtenidos. La definición de los canales del análisis se encuentran en el Anexo 8.5:

²⁶La definición de los canales para el running safety del AVE se encuentra en el Anexo 8.4

²⁷El método normal ha quedado definido en la figura 4

²⁸Carbody_1

²⁹Carbody_2

5. RESULTADOS

	Carbody_1	Carbody_2
0s-300s	0,6	0,5
300s-600s	1,3	1
600s-900s	1,2	1
900s-1200s	1,3	1,2
1200s-1500s	1,2	0,6
155s-1800s	1,1	1,2
1800s-2100s	1,3	1,3
2100s-2400s	1,5	1,2
2400s-2700s	1,4	1,2
2700s-3000s	1,4	1,4
300s-3300s	1,4	1,5
3300s-3600s	1,2	1,4
3600s-3900s	1,3	1,4
3900s-4200s	1,5	1,2
4200s-4500s	1,3	1,1
4500s-4800s	1,1	1,3
4800s-5100s	0,9	1,2
5100s-5400s	0,6	1,3
5400s-5700s	1,1	1,1
5700s-5900s		0,7
5700s-6000s	0,8	
6000s-6150s	1,4	
N_{MV} media	1,15	1,1

Tabla 17: N_{MV} resultados análisis confort EN 12299

Los resultados de los índices de confort presentados en la tabla 17 presentan resultados satisfactorios. Acorde con la tabla 2, los resultados quedarían clasificados dentro de *muy cómodo*.

5.2. Cercanías Valencia-Castellón

5.2.1. Análisis general de la señal

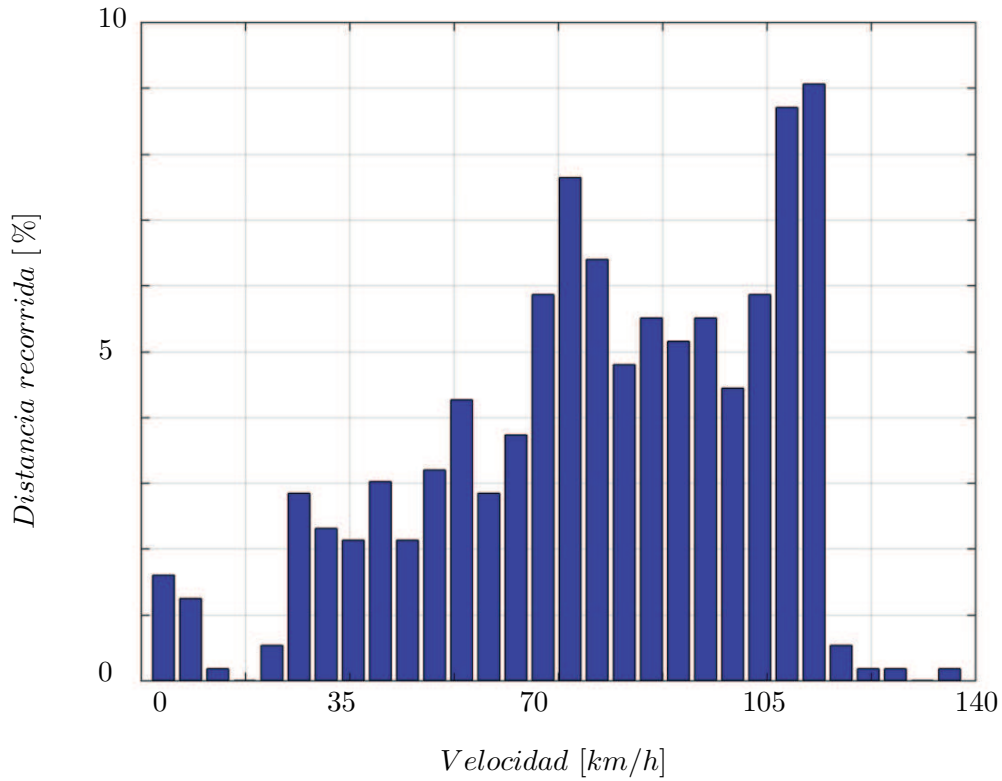


Figura 29: Histograma de Velocidad Cabanyal Castellón

Analizando el histograma de velocidad de la figura 29, es evidente que la dispersión de la velocidad es mucho mayor. A diferencia del AVE, el cual pasa la mayor parte del tiempo en un rango de velocidades pequeño, el cercanías varía mucho su velocidad, pues realiza múltiples paradas con las consiguientes frenadas y aceleraciones en cada estación. Aún así, se puede observar como la mayor velocidad alcanzada ronda los ≈ 115 km/h .

Se muestra a continuación en la tabla 18 con las principales características del trayecto tras un primer análisis:

Canal	Media	RMS	MaxAbs
accelX (m/s^2)	-0,031	0,197	2,516
accelY (m/s^2)	-0,005	0,351	1,305
accelZ (m/s^2)	-9,79	9,792	12,04
G10_Velocity (km/h)	50,932	66,433	144,166

Tabla 18: Resumen señal Cercanías Castellón

5. RESULTADOS

Para profundizar más en los valores de la tabla 18, se decide visualizar las señales para comprenderlos mejor:

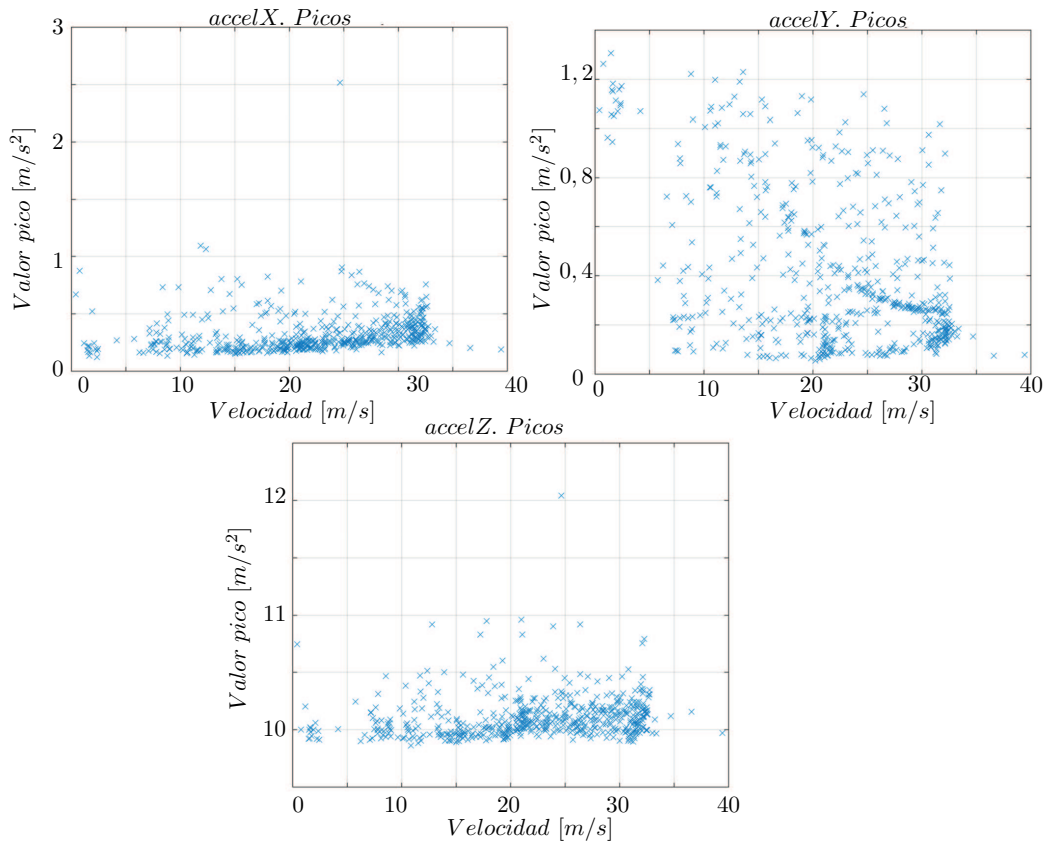


Figura 30: Variación $|a_{x,y,z}|$ en función de la velocidad

Como se puede apreciar en la figura 30, los valores máximos absolutos de los canales de aceleración accelX y accelZ parecen ser *outliers*, ya que todos se dan a la misma velocidad (≈ 25 m/s) y solamente encontramos un valor pico en toda la serie de datos, si bien es verdad que para el caso del canal accelY, se encuentran otros picos de similar magnitud, por lo que estos sí se deberían de tener en cuenta.

5. RESULTADOS

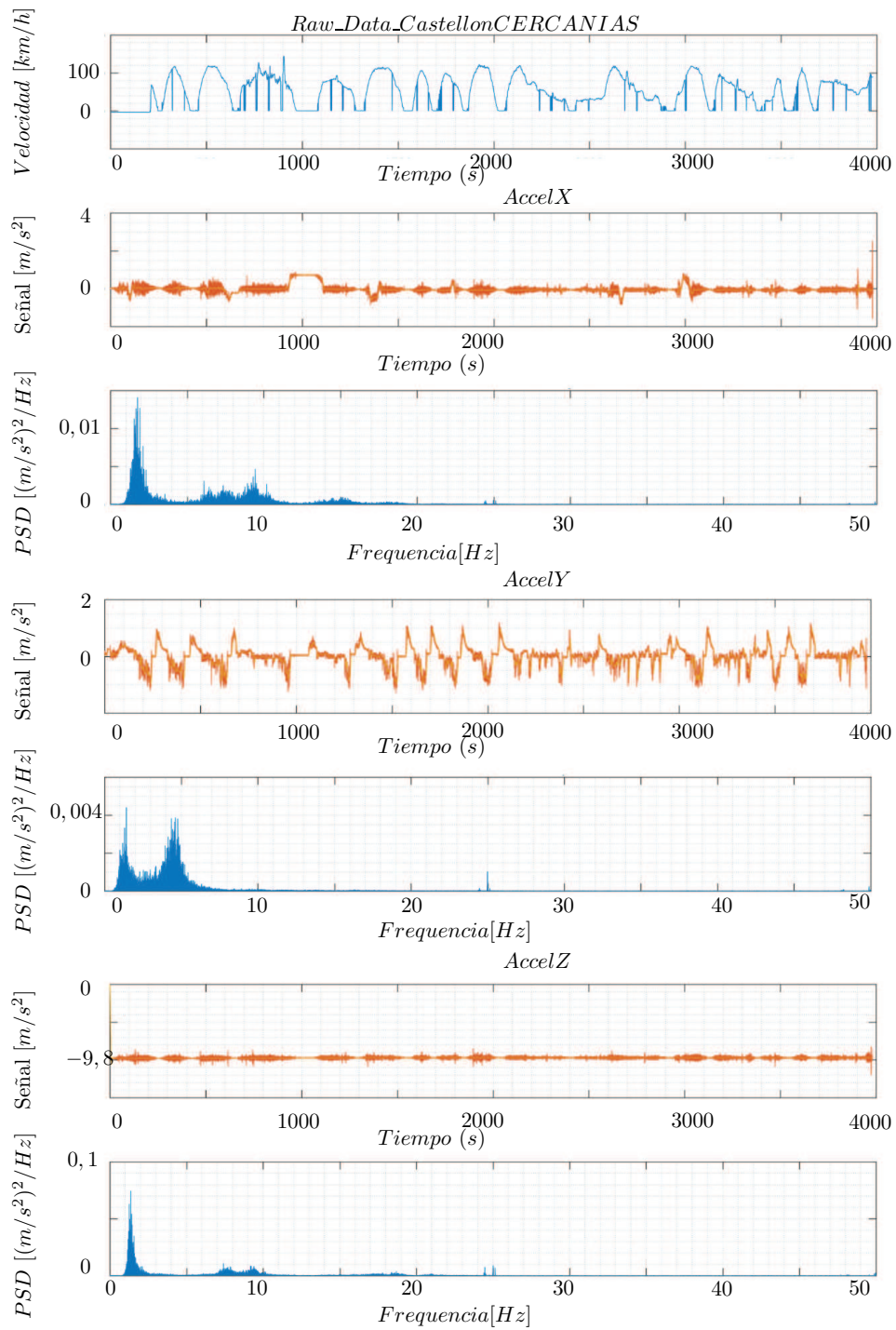


Figura 31: Señal acelerómetros Cercanías Castellón

5.2.2. Análisis de dinámica Cercanías Valencia-Castellón

Pasamos a realizar el análisis de dinámica de la señal. A diferencia de lo expuesto en la sección 3.4, solamente se realizan los cálculos referidos a la caja del vehículo, omitiendo así los correspondientes al bogie, pues no es posible tomar las medidas adecuadas para este cálculo con las herramientas disponibles. Para ello se sigue la norma EN 14363, usando los ficheros descritos en el apartado 3 y estableciendo los límites expuestos en la figura 26.

De acuerdo en lo establecido en la figura 3, la mayor parte del recorrido del Cercanías se centra en la zona de ensayo 1, por lo que se establece en 3 m/s^2 la aceleración lateral sobre la caja del vehículo ³⁰. Por su parte, la aceleración vertical de la caja viene definida por el tipo de suspensión del vehículo, [12], por lo que se establece en $3,0 \text{ m/s}^2$ al ser una suspensión de tipo doble, la predominante en la mayoría de vehículos ferroviarios de España.

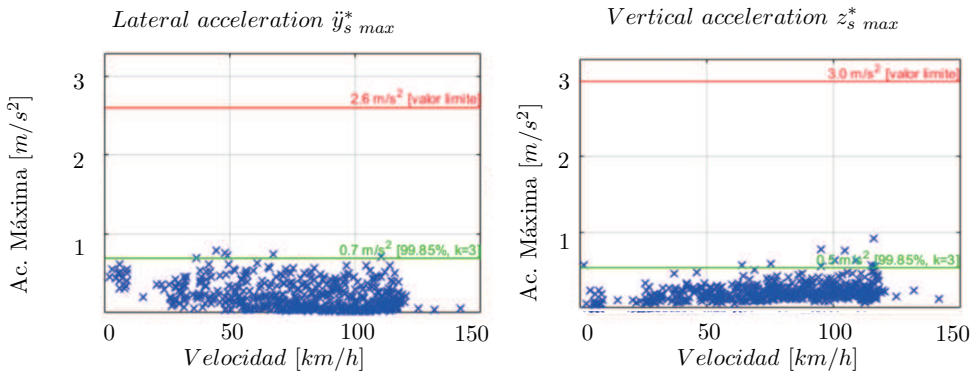


Figura 32: Running safety Carbody acceleration Cercanías VLC-CST

Como se aprecia en la figura 32, ambos resultados cumplen la normativa encontrándose dentro de los parámetros establecidos ³¹.

³⁰al igual que en el caso del AVE, se establece en 2,6 para ir así del lado de la seguridad ya que no se ha hecho un estudio de la geometría del recorrido y no se conoce con exactitud si algún tramo se realiza en una zona de ensayo diferente

³¹Se encuentran algunos valores de velocidad $\geq 120 \text{ km/h}$, siendo esta la velocidad máxima del vehículo

5. RESULTADOS

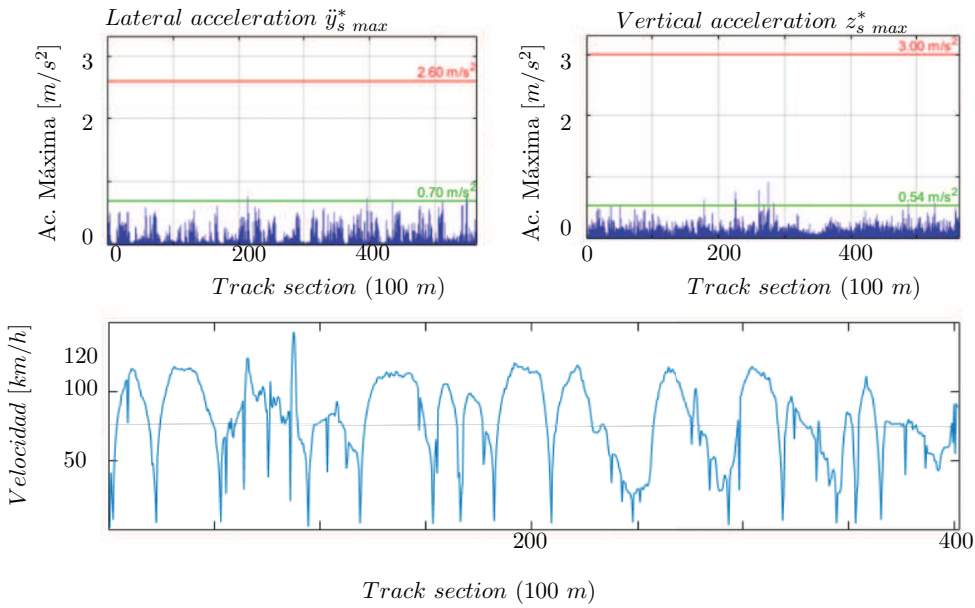


Figura 33: Running safety Carbody acceleration Cercanías VLC-CST

En la figura 33 se muestra lo mismo que en la figura 32, pero representando las aceleraciones respecto de la distancia recorrida. Los mínimos en 0 visibles en el gráfico de la velocidad respecto de las secciones corresponden con secciones donde no se tienen datos de velocidad debido a fallos de GPS (como los túneles). Estas secciones obviamente se recorren a una velocidad, por lo que el cómputo total de las secciones es menor del real. De la misma manera, se pueden observar en el mismo gráfico dos picos de señal cercanos a los 150 km/h , que también se corresponden con errores de medida. Estos picos eran esperados y ya se mostraban en el histograma de velocidades de la figura 29.

Se muestran los resultados del running safety en la siguiente tabla:

	Valor medido	Límite
Carbody_AY_1	0,71	2,6
Carbody_AZ_1	0,546	3

Tabla 19: Resultados running safety Carbody según EN 14363

Comparando los valores de la tabla 19 con los obtenidos en el estudio de dinámica del AVE, vemos como el valor obtenido para el canal Carbody_AY_1³² es ostensiblemente mayor para el caso del ensayo del Cercanías. Por su parte, el valor del canal Carbody_AZ_1 es bastante más bajo en el Cercanías que en el AVE. Esto se puede deber a que durante el ensayo en el Cercanías, el vagón se encontraba con una carga considerable de pasajeros, lo cual reduce las frecuencias de las vibraciones. En cualquier caso, los resultados obtenidos se encuentran claramente por debajo de los límites establecidos.

³²En el Anexo 8.7 se encuentran la definición de los canales del análisis de dinámica de este ensayo

5. RESULTADOS

5.2.3. Análisis de confort Cercanías Valencia-Castellón

Se procede a realizar el análisis de confort del ensayo³³:

	Carbody_1	Velocidad Media (km/h) ³⁴
0s-300s	1,1	7,33
300s-600s	1,2	75,35
600s-900s	1,2	61,97
900s-1200s	1	41,45
1200s-1500s	1,1	67,93
155s-1800s	1,1	46,29
1800s-2100s	1,2	57,86
2100s-2400s	1	56,96
2400s-2700s	0,9	52,25
2700s-3000s	1,1	33,62
300s-3300s	1,2	68,41
3300s-3600s	1,1	29,23
3600s-3900s	1,2	60,4
3900s-3980s	1,5	62,45
N_{MV} media	1,13	

Tabla 20: N_{MV} resultados análisis confort EN 12299

Tras realizar el análisis de confort, se obtienen unos resultados que, acorde a la media de N_{MV} obtenida en la tabla 20, se pueden encuadrar dentro de la categoría de muy cómodo, acorde a la tabla 2. Recalcar que el tren llevaba una alta carga de pasajeros, lo cual reduce las frecuencias y aumenta el confort (disminuyendo el índice de comodidad). Estos resultados además, son muy similares a los obtenidos en el análisis de confort del AVE.

³³La definición de los canales de este análisis se encuentran en el Anexo 8.8

³⁴En la mayoría de tramos encontramos paradas en estaciones, lo que supone que en todos ellos la velocidad mínima sea 0 km/h

6. Conclusiones

Tras la realización de este proyecto se obtienen las siguientes conclusiones que se enumeran a continuación:

1. La normativa ferroviaria europea se encuentra definida bajo unas normas estrictas. Los países miembros deben adoptarlas y esto debería de proporcionar cierta seguridad y confort a los clientes.
2. Se han analizado e implementado las normativas ferroviarias de dinámica, confort y fatiga.
3. Respecto a los casos de estudio, se han analizado las señales vibratorias del vehículo ferroviario y en ambos casos se encuentra un cumplimiento exquisito de los límites establecidos, tanto de seguridad como de confort.
4. Tras los resultados obtenidos, se puede indicar que España cuenta con unas infraestructuras ferroviarias de gran calidad en cuanto al cumplimiento de la normativa ferroviaria se refiere, incluso comparadas con las del resto de países de nuestro entorno.
5. Los resultados obtenidos mediante el uso de la aplicación del teléfono móvil entran dentro de lo esperado, por lo que a falta de una comprobación más a fondo se abre la posibilidad del empleo de esta tecnología en las mediciones de señales de ensayo ferroviarias.

7. Proyectos futuros

Si bien el proyecto ha cumplido las expectativas propuestas, se dejan algunas opciones para completar y/o mejorar el proyecto de cara al futuro.

Los resultados obtenidos, aunque son de un orden de magnitud esperable, no se han verificado más que con las mediciones realizadas por la aplicación Sensor Play. En caso de que esta *app* no fuera todo lo precisa que se desea, los resultados obtenidos serían menos exactos.

Es por tanto recomendable, comparar estos resultados con datos reales tomados con equipos profesionales de adquisición de datos para evaluar así la eficacia de la aplicación.

Si los resultados fueran positivos, esto significaría que la toma de señales de ensayo y ciertos postprocesados como los realizados en los casos de estudio, se pueden realizar mediante el uso de un simple smartphone que cuente con acelerómetros y conexión a internet, lo cual se encuentra extendido por casi toda la población. Esto supondría un abaratamiento de este procedimiento, al menos en las etapas iniciales, o donde simplemente se requiera la obtención de los obtenibles por medio del procedimiento llevado a cabo en este trabajo.

También se podrían llevar a cabo con las mismas herramientas empleadas en el trabajo, otros estudios sobre como afecta la posición dentro del vagón al confort experimentado.

8. Anexos

8.1. Anexo I → Canales y sensores de ensayo1

Sensor	Dirección de medida	Posición	Etiqueta del canal
ACC_1	Y	Axlebox housing	Axlebox AY1
ACC_2	Z	Axlebox housing	Axlebox AZ 1
ACC_3	Y	Frame over axle	Bogie AY 1
ACC_4	Z	Frame over axle	Bogie AZ 1
ACC_5	Y	Frame at the center	Bogie AY 2
ACC_6	Z	Frame at the center	Bogie AZ 2
ACC_7	Y	Pivot 1	Carbody AY 1
ACC_8	Z	Pivot 1	Carbody AZ 1
ACC_9	X	Pivot 2	Carbody AX 2
ACC_10	Y	Pivot 2	Carbody AY 2
ACC_11	Z	Pivot 2	Carbody AZ 2
DISP_12	Z	Left secondary suspension spring	
DISP_13	Z	Right secondary suspension spring	
DISP_14	Z	Front right wheel	
DISP_15	Z	Front left wheel	

8.2. Anexo II → Conversor de .csv a .mat

```

1  %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
2  clc; clear all; close all;
3  %Importamos los datos
4  %Prompt user for filename
5  [fname, pname] = uigetfile('*.csv');
6  %Create fully-formed filename as a string
7  filename = fullfile(pname, fname);
8  data = importdata(filename, ',', 1);
9
10 [nombre, donde] = uigetfile('*.xlsx', 'Selecciona fichero de ...
    canales ...');
11 [gainCanales, etiquetasCanales, ~] = xlsread(fullfile(donde, nombre));
12 etiquetasCanales(1,:) = [];
13 canalesCAN = etiquetasCanales(:,1);
14 canalesSTAV = etiquetasCanales(:,2);
15 unidades = etiquetasCanales(:,3);
16 nCanales = size(etiquetasCanales,1);
17
18 dondeFicheros = 'C:\Users\apari\Desktop\TFG\STADLER\TFG\';
19 newdir = 'CastellonCERCANIAS';
20 savedir = fullfile(dondeFicheros, newdir);
21
22 %Las etiquetas se corresponden con la primera fila todas las columnas
23 etiquetasIphone = data.textdata(1,:);
24 etiquetasIphone(1) = [];
25 tiempostxt = data.textdata(2:end,1);
26

```

8. ANEXOS

```
27 %Separamos el tiempo en dos columnas, fecha y hora
28 aux tiempos = regexp(tiempostxt, ' ', 'split');
29
30 %Cogemos solo la hora en segundos de aux tiempos
31 N=length(aux tiempos); %numero de filas
32 for i = 1:N
33     aux time(i,1) = aux tiempos{i,1}(2); %leemos solamente la hora
34 end
35 %Ahora, separamos cuando se encuentra : (HH:MM:SS.000 -> [ HH MM ...
    SS.000 ]
36 aux = regexp(aux time, ':', 'split');
37 %Convertimos a valor numerico el str [ HH MM SS.000 ]
38 aux_Ts=[];
39 for i=1:N
40     [aux_Ts{i,1}] = ...
41         [[str2double(aux{i,1}(1)),str2double(aux{i,1}(2)),...
42          str2double(aux{i,1}(3))]];
43 end
44 %Finalmente, pasamos a todo a segundos y restamos el valor de tiempo
45 %inicial para situar el origen en 0
46 timesec=[];
47 t0=3600*aux_Ts{1,1}(1)+60*aux_Ts{1,1}(2)+aux_Ts{1,1}(3);
48 for i=1:N
49     timesec(i) ...
50         =3600*aux_Ts{i,1}(1)+60*aux_Ts{i,1}(2)+aux_Ts{i,1}(3)-t0;
51 end
52 timesec = timesec';
53 [timesec,idx,-] = unique(timesec);
54 % %Convertimos a formato double timesec
55 % time_sec=[];
56 % for i=1:length(timesec)
57 %     a=timesec(i);
58 %     time_sec(i)=cell2mat(a);
59 % end
60 % time_sec = [time_sec'];
61 Fs=100;
62 % tiempos = (0:1/Fs:max(time_sec))';
63 % time_Sec = unique(time_sec);
64 tiempos = (0:1/Fs:max(timesec))';
65 datosiphone = data.data(idx,:);
66 nuevosdatos = interp1(timesec,datosiphone,tiempos,'linear','extrap');
67 %%%%%%%%%%%MIRAR %%%%%%%%%%%
68 for m=1:nCanales
69     I = strcmp(canalesCAN{m},etiquetasIphone);
70     structdata.(canalesSTAV{m}).x_values.increment = 1/Fs;
71     structdata.(canalesSTAV{m}).y_values.quantity.label = unidades{m};
72     structdata.(canalesSTAV{m}).y_values.values = ...
73         gainCanales(m)*nuevosdatos(:,I);
74 end
75
76 save(fullfile(savedir,regexprep...
77 ('Raw_Data_AVE', '.xlsx', '.mat')), '-struct', 'structdata');
78
79 fprintf('work done!')
```

8. ANEXOS

8.3. Anexo III → Canales y sensores del AVE Valencia-Madrid

Canal Iphone	Dirección de medida	Posición	Etiqueta del canal
accelX	X	09A/02A coche 5	accelX
accelY	Y	”	accelY
accelZ	Z	”	accelZ
Lat	-	”	G1_Latitude
Long	-	”	G2_Longitude
Speed	-	”	G10_Velocity
TrueHeading	-	”	Heading
Alt	-	”	G3_Altitude

8.4. Anexo IV → Canales y sensores EN 14363 del AVE Valencia-Madrid

Canal Iphone	Dirección de medida	Posición	Etiqueta del canal
accelX	X	09A/02A coche 5	Carbody_AX_1
accelY	Y	”	Carbody_AY_1
accelZ	Z	”	Carbody_AZ_1
Speed	-	”	G10_Velocity

8.5. Anexo V → Canales y sensores EN 12299 del AVE Valencia-Madrid

Canal Iphone	Dirección de medida	Posición	Etiqueta del canal
accelY	Y	09A coche 5	Carbody_1
accelZ	Z		
accelY	Y	02A coche 5	Carbody_2
accelZ	Z		

8.6. Anexo VI → Canales y sensores Cercanías Valencia-Castellón

Canal Iphone	Dirección de medida	Posición	Etiqueta del canal
accelX	X	Centro Vagón	accelX
accelY	Y	”	accelY
accelZ	Z	”	accelZ
Lat	-	”	G1_Latitude
Long	-	”	G2_Longitude
Speed	-	”	G10_Velocity
TrueHeading	-	”	Heading
Alt	-	”	G3_Altitude

8. ANEXOS

8.7. Anexo VII → Canales y sensores EN 14363 del Cercanías Valencia-Castellón

Canal Iphone	Dirección de medida	Posición	Etiqueta del canal
accelX	X	Centro vagón	Carbody_AX_1
accelY	Y	”	Carbody_AY_1
accelZ	Z	”	Carbody_AZ_1
Speed	-	”	G10_Velocity

8.8. Anexo VIII → Canales y sensores EN 12299 del Cercanías Valencia-Castellón

Canal Iphone	Dirección de medida	Posición	Etiqueta del canal
accelY	Y	Centro vagón	Carbody_1
accelZ	Z		

8.9. Anexo IX → Trayecto Castellón-Valencia

Estación	Hora
Castellón	10:30
Almassora	10:34
Vila-real	10:37
Borriana	10:41
Nules-La Vilavella	10:46
Moncofa	10:52
Xilxes	10:55
La Llosa	10:58
Almenara	11:01
Les Valls	11:04
Sagunt	11:10
Puçol	11:18
El Puig	11:22
Massalfassar	11:26
Albuixech	11:29
Roca-Cúper	11:31
Cabanyal	11:36

8. ANEXOS

8.10. Anexo X → Distribución de asientos y coches AVE S-112

Tipo de coche	Coches por composición	Nº de coche	Plazas
Turista extremo	1	5	36
Turista	5	4-8-9-10-11	40
Turista con galley	1	7	24
Turista accesible + PMR	1	12	32+2
Cafetería	1	6	-
Club intermedio	1	3	26
Club intermedio con galley	1	1	21
Club extremo	1	2	24
Total turista	8	4-5-7-8-9-10-11-12	294 Turista
Total club	3	1-2-3	71 Club

PARTE II:
PLANOS

Plano S-112 AVE

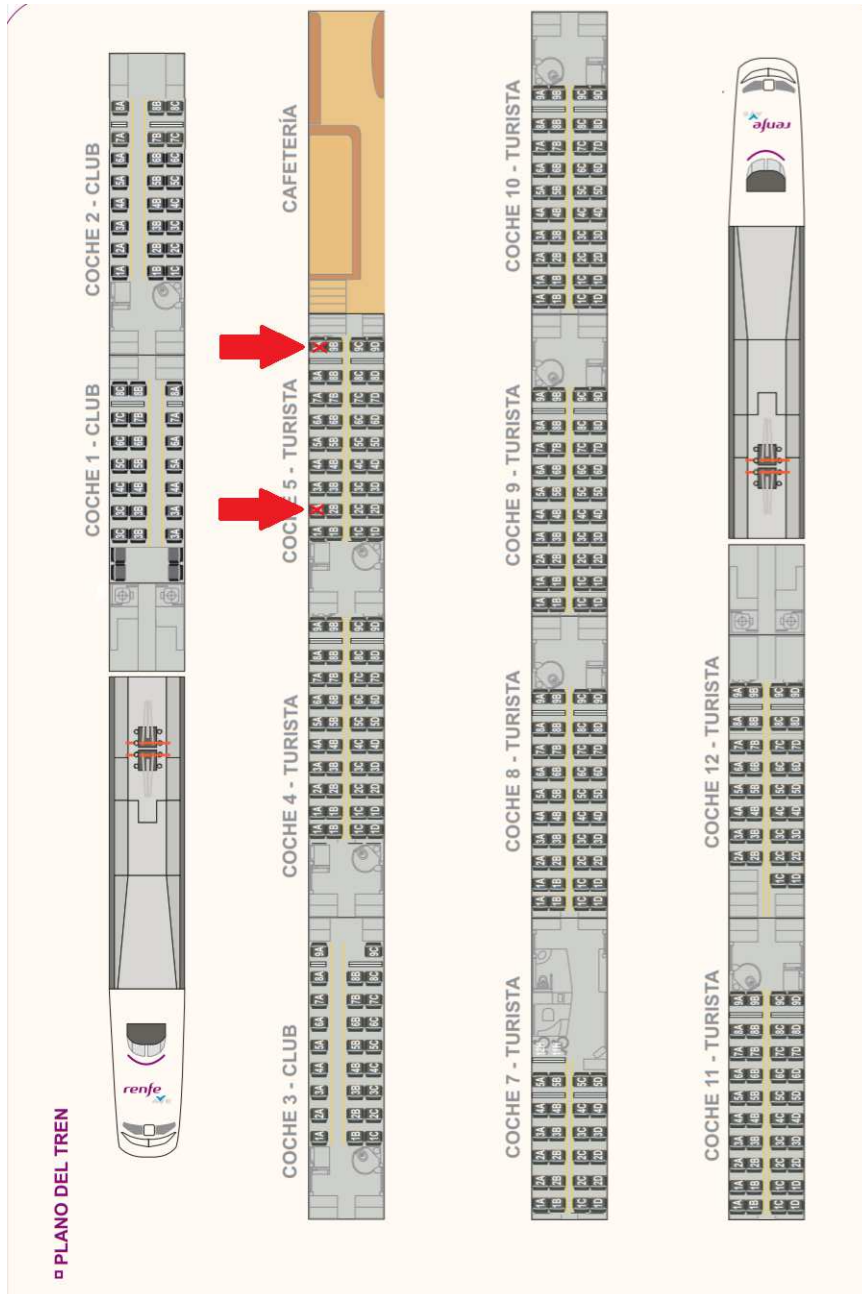


Figura 34: Distribución de asientos serie 112 de Renfe

Las flechas en el plano indica la localización de la toma de medidas

8. ANEXOS

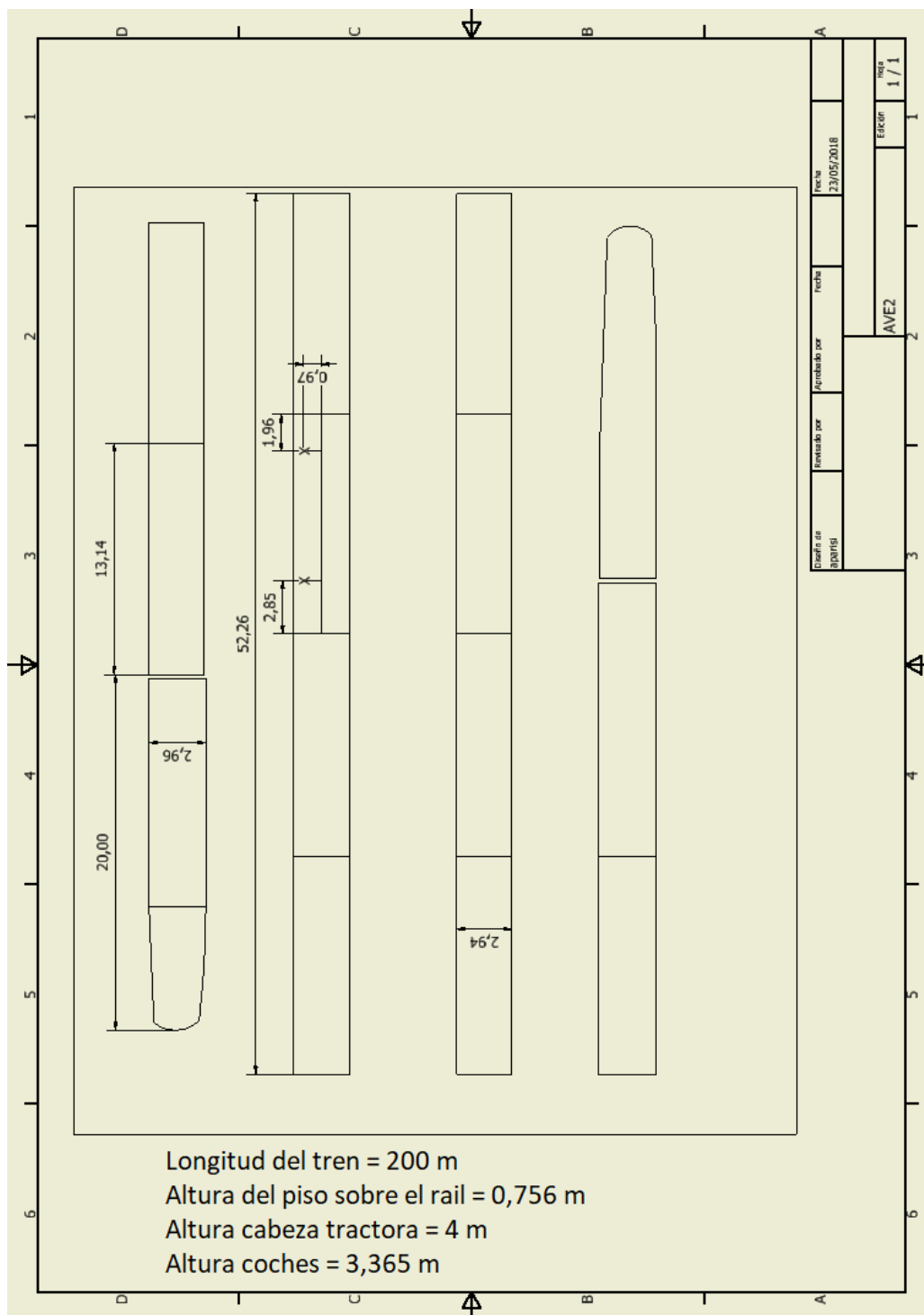


Figura 35: Plano acotado serie 112 Renfe

PARTE III:
PRESUPUESTOS

8. ANEXOS

En este apartado se detalla el coste de los elementos necesarios para el desarrollo del proyecto.

Los costes se han dividido en tres presupuestos parciales: normas, software y recursos humanos.

Descripción	Cantidad	Precio por unidad	Total
Norma EN 14363:2016	1	355,8€	355,8€
Norma UNE-EN 12299:2010	1	81€	81€
Norma EN 13749 (DIN Taschenbuch 491-2_EN)	1	38€	38€

Tabla 21: Presupuestos normas necesarias para el trabajo

Descripción	Cantidad	Precio por unidad	% uso	Total
Matlab Student license	1	35€	30 %	35€
Autodesk Inventor Professional 1 year license	1	2553,10€	15 %	2553,10€
App Sensor Play	1	4,99€	15 %	4,99€
LaTeX	1	0€	40 %	0€

Tabla 22: Presupuestos software

Descripción	Cantidad	Precio por unidad	Total
iPhone 6s (2016)	1	649€	649€
Dell XPS 15	1	1499€	1499€

Tabla 23: Presupuestos hardware

Descripción	Cantidad	Precio por hora	Total
Horas graduado en ingeniería Aeroespacial	200	30€	6000€

Tabla 24: Presupuestos mano de obra

Presupuesto normas	474,8€
Presupuesto software	2593,09€
Presupuesto hardware	2148€
Presupuesto mano de obra	6000€
Total	11215,89€

Tabla 25: Presupuesto total

PARTE IV:
PLIEGO DE CONDICIONES

Definición y alcance del pliego de condiciones

El objetivo del pliego de condiciones es el de fijar la normativa seguida y las condiciones de realización a seguir para el buen uso del proyecto.

Es un documento de obligado cumplimiento.

Documentos que componen el proyecto

La totalidad del proyecto queda compuesto de los siguientes documentos:

1. Memoria
2. Planos
3. Presupuesto
4. Pliego de condiciones

En caso de contradicción entre los distintos documentos, se tomará como correcto el documento que sigue:

- Cuestiones técnicas sobre los procesos de medición y postprocesado, prevalecerá la Memoria.
- En cuanto a los precios, prevalecerá el Presupuesto.
- Referente a la normativa, tanto la Memoria como el Pliego de condiciones prevalecerán.
- Cualquier referencia a planos, se tomará por correcta lo expuesto en la parte de Planos.

Especificaciones técnicas

Figuras involucradas en el proyecto

Figuras que han participado en cualquier parte de la realización del proyecto:

- Dirección técnica: el autor del proyecto, el cual lo ha realizado en primera persona y conoce todas las partes al completo.
- Colaboradores necesarios: tutor/cotutora y miembros de Stadler.

Normativa

Para la correcta realización de este proyecto se ha de tener en cuenta todas y cada una de las siguientes normativas, así como las normativas a las cuales hacen referencia:

- UNE-EN 14363. Aplicaciones ferroviarias. Ensayos y simulaciones para la aceptación de las características dinámicas de los vehículos ferroviarios. Comportamiento dinámico y ensayos estáticos.
- UNE-EN 12299. Aplicaciones ferroviarias. Comodidad de viaje para los pasajeros. Medición y evaluación.
- UNE-EN 13749. Aplicaciones ferroviarias. Ejes montados y bogies. Métodos para especificar los requisitos estructurales de los bastidores de bogie.

Sistemas de adquisición de datos

Para la realización de las medidas se ha empleado el teléfono móvil Apple iPhone 6s. Este teléfono cuenta con acelerómetro en los tres ejes espaciales (Bosch Sensortec 3P7 LA 3-axis Accelerometer (BMA280)). Mediante la aplicación *Sensor Play*, se recogen los datos y se exportan para poder trabajar con ellos. La frecuencia de muestreo empleada, debido a las aceleraciones con los que se trabajan en estos casos, ha sido de 100 Hz. El número de ensayos totales es de tres, dos para el caso de estudio del AVE Valencia-Madrid y uno para el Cercanías Valencia-Castellón. En los tres ensayos se ha tratado de medir la totalidad del recorrido, tal y como se encuentra especificado en las secciones 4.2 y 4.3 de la Memoria.

Referencias

- [1] Jesús Otero Yugat. *Contribución al estudio de las vibraciones producidas por el contacto rueda-carril y su transmisión al entorno*. Universitat Politècnica de Catalunya, 2010.
- [2] AENOR. Normativa UNE-EN 14363:2017. <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0058126#.WvNgiIiFNPY>.
- [3] Susana Anacleto Lupiáñez. *Modelización de la interacción vía-tranvía*. PhD thesis, Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior d'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Departament d'Infraestructura del Transport i del Territori, 2009 (Enginyeria de Camins, Canals i Ports), 2009.
- [4] Simon Iwnicki. *Handbook of railway vehicle dynamics*. CRC press, 2006.
- [5] Stadler. Fotografía cenital sobre la fábrica de Stadler Rail S.A.U, Valencia. <http://www.stadlerrail.com/en/about-us/locations/stadler-valencia-su/>.
- [6] Hyperloop. Introducing XP-1, the first-generation vehicle of the Virgin Hyperloop One system. <https://hyperloop-one.com/>.
- [7] Aenor. La normalización UNE. http://www.aenor.es/DescargasWeb/normas/normalizacion_UNE.pdf.
- [8] AENOR. Normativa UNE-EN 12299:2010. <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0045231#.WvNhBoiFNPY>.
- [9] AENOR. Normativa UNE-EN 13749:2012. <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0049703#.WvNiWYiFNPY>.
- [10] AENOR. Normativa UNE-ISO 2631-1:2008. <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0041539#.WvNh3oiFNPY>.
- [11] ADIF. Alta velocidad Madrid-Levante. http://www.renfe.com/viajeros/nuestros_trenes/ave_s102.html.
- [12] Renfe. Ficha técnica automotor eléctrico S-446/7. http://www.renfe.com/viajeros/nuestros_trenes/cercanias447_ficha.html.
- [13] Renfe. Ficha técnica automotor eléctrico S-102 y S-112. http://www.renfe.com/viajeros/nuestros_trenes/aves102_ficha.html.