

**UNIVERSIDAD CARLOS III
DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA
SUPERIOR**



**INGENIERÍA TÉCNICA INDUSTRIAL MECÁNICA
PROYECTO FIN DE CARRERA**

**ESTUDIO DEL NIVEL DE CONFORT EN
EL TRANSPORTE FERROVIARIO
MEDIANTE ADAMS/RAIL**

Autor: D. Alberto Fernández López

Tutoras: Dra. Dña. Beatriz López Boada
Dra. Dña. María Jesús López Boada

Leganés, Diciembre de 2011

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mis tutoras la Dra. Dña. Beatriz López Boada y a su hermana la Dra. Dña María Jesús López Boada toda su ayuda y dedicación para que pudiera realizar este proyecto, su experiencia me ha servido para completar el último paso de la carrera.

A mis padres, Santiago y Dolores que siempre han estado a mi lado y me han enseñado todo lo que sé además de mostrarme como realizarme como persona. Mi hermana Verónica también me ha enseñado esas cosas de la vida que solo una hermana mayor es capaz de hacerlo. A mi tía Carmen y mis primos Oscar y Eloísa que me han hecho pasar momentos muy agradables en familia. No me puedo olvidar de agradecer a mi novia Almudena todo el apoyo que me ha dado en estos últimos años y que gracias a ella han sido los más felices que he vivido.

A mis amigos de la universidad Kevin, Mesa, Diego, Javi y David que sin ellos no habría llegado tan lejos. No solo me han ayudado dentro de la universidad, sino que fuera de ella he vivido grandes experiencias a su lado que nunca olvidaré.

Y por último a mis amigos de siempre Luisen, Juancar, Isma, Jorge, David, Dani, Adri... y a todos aquellos que no nombro porque son demasiados, que siempre están ahí para lo que necesite y que me han ayudado a seguir adelante consiguiendo que me ría hasta en los peores momentos.

Muchas gracias a todos de corazón y espero no haber olvidado a nadie en estas palabras.

Gracias.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN 2

- 1.1 Objetivos del proyecto 3
- 1.2 Estructura del proyecto 3

CAPÍTULO 2. CONCEPTOS DE INGENIERÍA FERROVIARIA 6

- 2.1 Historia del ferrocarril 6
- 2.2 La vía 8
 - 2.2.1 Infraestructura..... 8
 - 2.2.2 Superestructura 11
 - 2.2.2.1 El carril 11
 - 2.2.2.2 Las traviesas 12
 - 2.2.2.3 El balasto 12
 - 2.2.2.4 Los tirafondos y las placas de asiento 12
 - 2.2.2.5 Aparatos de la vía 13
- 2.3 El bogie 14
 - 2.3.1 El bastidor..... 15
 - 2.3.2 Eje calado 16
 - 2.3.3 Rueda ferroviaria 17
 - 2.3.4 Caja de grasa 19
 - 2.3.5 Suspensión primaria 20
 - 2.3.6 Suspensión secundaria 21
- 2.4 La caja..... 22

CAPÍTULO 3. ESTUDIO DEL CONFORT 24

- 3.1 Definiciones relacionadas con el confort 24
 - 3.1.1 Calidad de marcha..... 24
 - 3.1.2 Confort de marcha 25
- 3.2 Modelos de evaluación del confort 25
 - 3.2.1 Método de Sperling..... 26
 - 3.2.2 Método de la norma UNE-ENV 12299 y ficha UIC 513 27
- 3.3 Reacciones humanas ante vibraciones 30
 - 3.3.1 Vibraciones sobre el cuerpo completo 30
 - 3.3.1.1 Alteraciones neuro-musculares..... 31
 - 3.3.1.2 Alteraciones cardiacas, respiratorias y metabólicas..... 31
 - 3.3.1.3 Alteraciones sensoriales y del sistema nervioso 31
 - 3.3.1.4 Efectos a largo plazo..... 31

3.3.1.5	Otros riesgos para la salud	32
3.3.2	Mareo inducido por el movimiento	32

CAPÍTULO 4. PROGRAMAS DE SIMULACIÓN. ADAMS/RAIL... 35

4.1	MSC. Adams	36
4.1.1	Adams/Solver	37
4.1.2	Adams/PostProcessor	37
4.2	Adams/Rail.....	39
4.2.1	Subsistemas	40
4.2.2	Conjunto o ensamblaje	42
4.2.3	Archivos de propiedades	43
4.2.4	Plantillas	43
4.2.5	Bancos de prueba.....	44
4.2.6	Comunicadores.....	44

CAPÍTULO 5. MODELO DE VÍA Y TREN 46

5.1	Modelo de vía.....	46
5.2	Modelo de tren	48
5.2.1	Características del bogie delantero	49
5.2.2	Características del bogie trasero	54
5.2.3	Características de la caja o cuerpo.....	55

CAPÍTULO 6. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES 57

6.1	Simulaciones para un vagón	57
6.1.1	Curva con 200 metros de radio.....	58
6.1.1.1	Velocidad de 15 m/s.....	58
6.1.1.2	Velocidad de 20 m/s.....	59
6.1.1.3	Velocidad de 25 m/s.....	60
6.1.1.4	Velocidad de 30 m/s.....	61
6.1.2	Curva con 300 metros de radio.....	62
6.1.2.1	Velocidad de 15 m/s.....	62
6.1.2.2	Velocidad de 20 m/s.....	63
6.1.2.3	Velocidad de 25 m/s.....	64
6.1.2.4	Velocidad de 30 m/s.....	65
6.1.2.5	Velocidad de 35 m/s.....	66
6.1.2.6	Velocidad de 40 m/s.....	67
6.1.3	Curva con 400 metros de radio.....	68
6.1.3.1	Velocidad de 15 m/s.....	68
6.1.3.2	Velocidad de 20 m/s.....	69
6.1.3.3	Velocidad de 25 m/s.....	70
6.1.3.4	Velocidad de 30 m/s.....	71

6.1.3.5	Velocidad de 35 m/s.....	72
6.1.3.6	Velocidad de 40 m/s.....	73
6.1.3.7	Velocidad de 45 m/s.....	74
6.1.3.8	Velocidad de 50 m/s.....	75
6.1.4	Curva con 500 metros de radio.....	76
6.1.4.1	Velocidad de 15 m/s.....	76
6.1.4.2	Velocidad de 20 m/s.....	77
6.1.4.3	Velocidad de 25 m/s.....	78
6.1.4.4	Velocidad de 30 m/s.....	79
6.1.4.5	Velocidad de 35 m/s.....	80
6.1.4.6	Velocidad de 40 m/s.....	81
6.1.4.7	Velocidad de 45 m/s.....	82
6.1.4.8	Velocidad de 50 m/s.....	83
6.2	Simulaciones para dos vagones.....	84
6.2.1	Curva con 200 metros de radio.....	85
6.2.1.1	Velocidad de 15 m/s.....	85
6.2.1.2	Velocidad de 25 m/s.....	86
6.2.1.3	Velocidad de 30 m/s.....	87
6.2.1.4	Velocidad de 35 m/s.....	88
6.2.2	Curva con 300 metros de radio.....	89
6.2.2.1	Velocidad de 15 m/s.....	89
6.2.2.2	Velocidad de 25 m/s.....	90
6.2.2.3	Velocidad de 35 m/s.....	91
6.2.2.4	Velocidad de 40 m/s.....	92
6.2.3	Curva con 400 metros de radio.....	93
6.2.3.1	Velocidad de 15 m/s.....	93
6.2.3.2	Velocidad de 25 m/s.....	94
6.2.3.3	Velocidad de 35 m/s.....	95
6.2.3.4	Velocidad de 45 m/s.....	96
6.2.3.5	Velocidad de 50 m/s.....	97
6.2.4	Curva con 500 metros de radio.....	98
6.2.4.1	Velocidad de 15 m/s.....	98
6.2.4.2	Velocidad de 25 m/s.....	99
6.2.4.3	Velocidad de 35 m/s.....	100
6.2.4.4	Velocidad de 45 m/s.....	101
6.2.4.5	Velocidad de 50 m/s.....	102
6.3	Comparativa de resultados.....	103

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS 109

7.1	Conclusiones.....	109
7.2	Trabajos futuros	111

REFERENCIAS 113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Viaducto.	9
Figura 2.2. Puente.	9
Figura 2.3. Paso a distinto nivel.	9
Figura 2.4. Paso a nivel.	9
Figura 2.5. Túnel.	9
Figura 2.6. Trinchera.	10
Figura 2.7. Terraplén.	10
Figura 2.8. Mixto.	11
Figura 2.9. En línea.	11
Figura 2.10. Sección carril.	12
Figura 2.11. Desvío, espadín y corazón.	13
Figura 2.12. Travesía.	14
Figura 2.13. Bogie.	15
Figura 2.14. Bastidor de un bogie.	16
Figura 2.15. Eje calado.	16
Figura 2.16. Rueda: (A) Monobloque, (B) De centro y bandaje, (C) Elástica. ...	18
Figura 2.17. Perfil típico de rueda ferroviaria.	19
Figura 2.18. Despiece caja de grasa.	19
Figura 2.19. Suspensión primaria.	20
Figura 2.20. Suspensión secundaria. Muelle helicoidal y Resorte neumático. ..	21
Figura 2.21. Caja o cuerpo de un tren.	22
Figura 4.1. Pantalla principal Adams/PostProcessor.	38
Figura 4.2. Ejemplo subsistema, bogie delantero.	41
Figura 4.3. Ejemplo conjunto, vehículo ferroviario.	43
Figura 4.4. Ejemplo plantilla.	44
Figura 5.1. Perfil del raíl derecho.	47
Figura 5.2. Trazados de vía. Radios de curvatura de 200, 300, 400 y 500 m. .	48
Figura 5.3. Disposición acotada de los bogies medido en milímetros.	49
Figura 5.4. ERRI bogie y sus elementos.	50
Figura 5.5. Fuerza vs velocidad amortiguador suspensión primaria.	52
Figura 5.6. Denominación amortiguadores suspensión secundaria.	52

Figura 5.7. Fuerza vs velocidad amortiguadores suspensión secundaria.	53
Figura 5.8. Perfil de la rueda y su derivada.....	53
Figura 5.9. Cambio de posición de amortiguador en bogie delantero/trasero. .	54
Figura 5.10. Caja del vagón tipo ERRI representado en Adams/Rail.....	55
Figura 6.1. Simulación en Adams/Rail de un vagón.....	57
Figura 6.2. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 15 para 1 vagón.....	58
Figura 6.3. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 20 para 1 vagón.....	59
Figura 6.4. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 25 para 1 vagón.....	60
Figura 6.5. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 30 para 1 vagón.....	61
Figura 6.6. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 15 para 1 vagón.....	62
Figura 6.7. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 20 para 1 vagón.....	63
Figura 6.8. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 25 para 1 vagón.....	64
Figura 6.9. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 30 para 1 vagón.....	65
Figura 6.10. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 35 para 1 vagón.....	66
Figura 6.11. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 40 para 1 vagón.....	67
Figura 6.12. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 15 para 1 vagón.....	68
Figura 6.13. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 20 para 1 vagón.....	69
Figura 6.14. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 25 para 1 vagón.....	70
Figura 6.15. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 30 para 1 vagón.....	71
Figura 6.16. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 35 para 1 vagón.....	72
Figura 6.17. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 40 para 1 vagón.....	73
Figura 6.18. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 45 para 1 vagón.....	74
Figura 6.19. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 50 para 1 vagón.....	75
Figura 6.20. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 15 para 1 vagón.....	76
Figura 6.21. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 20 para 1 vagón.....	77
Figura 6.22. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 25 para 1 vagón.....	78
Figura 6.23. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 30 para 1 vagón.....	79
Figura 6.24. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 35 para 1 vagón.....	80
Figura 6.25. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 40 para 1 vagón.....	81
Figura 6.26. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 45 para 1 vagón.....	82
Figura 6.27. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 50 para 1 vagón.....	83
Figura 6.28. Simulación en Adams/Rail de dos vagones.	84
Figura 6.29. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 15 para 2 vagones..	85
Figura 6.30. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 25 para 2 vagones..	86

Figura 6.31. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 30 para 2 vagones..	87
Figura 6.32. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 35 para 2 vagones..	88
Figura 6.33. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 15 para 2 vagones..	89
Figura 6.34. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 25 para 2 vagones..	90
Figura 6.35. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 35 para 2 vagones..	91
Figura 6.36. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 40 para 2 vagones..	92
Figura 6.37. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 15 para 2 vagones..	93
Figura 6.38. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 25 para 2 vagones..	94
Figura 6.39. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 35 para 2 vagones..	95
Figura 6.40. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 45 para 2 vagones..	96
Figura 6.41. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 50 para 2 vagones..	97
Figura 6.42. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 15 para 2 vagones..	98
Figura 6.43. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 25 para 2 vagones..	99
Figura 6.44. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 35 para 2 vagones.	100
Figura 6.45. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 45 para 2 vagones.	101
Figura 6.46. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 50 para 2 vagones.	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Escala índice Sperling	27
Tabla 3.2. Constantes P_{DE}	29
Tabla 3.3. Constantes P_{CT}	29
Tabla 3.4. Escala índices N_{MV} , N_{VA} y N_{VD}	30
Tabla 5.1. Características en común de la vía	46
Tabla 5.2. Propiedades físicas del bogie.....	50
Tabla 5.3. Propiedades geométricas y precargas.	50
Tabla 5.4. Rigidez suspensión primaria.....	51
Tabla 5.5. Rigidez suspensión secundaria.	51
Tabla 5.6. Precargas suspensión bogie trasero.	54
Tabla 5.7. Características físicas de la caja.	55
Tabla 5.8. Características geométricas de la caja.	55
Tabla 6.1. Resultados de las simulaciones para un vagón.....	104
Tabla 6.2. Resultados de las simulaciones para dos vagones.	106



CAPÍTULO 1: **INTRODUCCIÓN**

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad el transporte ferroviario es uno de los métodos de viaje más utilizados por el ser humano a la hora desplazarse, por tanto las empresas ferroviarias buscan desarrollar los trenes para, de este modo, satisfacer los requisitos que los usuarios demandan de dicho transporte.

Los requisitos se basan en una serie de factores en los cuales el usuario se fija a la hora de utilizar un medio de transporte y que por tanto son en los factores que se fundamentan los desarrollos de las empresas de ferrocarriles.

Los factores más importantes en un medio de transporte son la seguridad en el viaje, el confort o la comodidad que siente el usuario durante el trayecto, el tiempo en llegar al destino, es decir, la velocidad de transporte y, como en todo servicio, el factor económico.

Cada medio de transporte tiene unas características diferentes que le permiten priorizar algunos factores. Por ejemplo el avión se caracteriza por ser seguro y rápido pero no suele ser muy confortable además de, normalmente, ser económicamente menos accesible. El automóvil presenta características contrarias al avión ya que es más barato y confortable pero sin embargo tiene un índice de siniestralidad mucho mayor. Por su parte el transporte ferroviario se caracteriza por ser un medio equilibrado en todos los factores.

En este proyecto se va estudiar en profundidad uno de estos factores, en concreto el factor del confort en marcha del transporte ferroviario debido a las vibraciones y aceleraciones que sufre el tren cuando circula por una vía. Para ello se van a realizar una serie de simulaciones con el programa Adams/Rail que permitan calcular las aceleraciones que soportan los usuarios cuando un tren circula en diferentes situaciones. Con dichas aceleraciones se obtienen diferentes índices de confort que permiten conocer la sensación que experimenta un usuario a la hora de utilizar el transporte ferroviario y qué condiciones favorecen que esos índices sean más adecuados.

1.1 Objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es calcular los niveles de confort que se producen cuando un tren viaja por una vía en diferentes condiciones de circulación. De forma más particular, las situaciones que se van a estudiar son:

- Variando el número de vagones. Se van a realizar simulaciones con trenes de un vagón y dos vagones.
- Modificando los radios de curvatura de la vía. Se van a utilizar en las simulaciones diferentes trazados, todos ellos con un tramo recto y las diferentes curvas con radios de curvatura de 200, 300, 400 y 500 metros.
- Cambiando la velocidad inicial del tren. Estas velocidades comienzan con 15 m/s y van aumentando hasta alcanzar la condición de descarrilamiento o hasta superar el mayor índice de confort.

Es necesario estudiar los procedimientos que se utilizan habitualmente para calcular los niveles de confort que se producen cuando un ser humano se ve expuesto ante vibraciones y variaciones de aceleración. Además, es importante conocer las repercusiones que generan las vibraciones sobre el organismo.

Para realizar las simulaciones necesarias en las diferentes situaciones de circulación, es preciso entender el funcionamiento del programa de simulación virtual Adams/Rail.

1.2 Estructura del proyecto

Este proyecto se compone de un total de siete capítulos los cuales se han estructurado de la siguiente manera:

- Capítulo 2: En este capítulo se hace un pequeño resumen de la historia del mundo ferroviario, desde su inicio hasta nuestros días. Además se describen conceptos relacionados con los trenes y las vías por las que circulan éstos.
- Capítulo 3: En este capítulo se va a explicar la definición de confort y las variables que lo condicionan además de estudiar los diferentes métodos

que se utilizan para el cálculo del nivel de confort. También se hace referencia a los posibles problemas de salud que conlleva la exposición a las vibraciones.

- Capítulo 4: Este capítulo muestra como funciona el programa de simulación Adams/Rail y los componentes que lo forman, además de describirse algunas nociones sobre el campo de las simulaciones realizadas por ordenador.
- Capítulo 5: En él se describen los modelos de vía y de tren que van a ser objeto de las diferentes simulaciones que se realizan con el programa Adams/Rail.
- Capítulo 6: Este capítulo recoge todos los resultados obtenidos en las simulaciones, además de comentarse todos ellos para un mayor entendimiento.
- Capítulo 7: En este capítulo, se van a explicar las conclusiones obtenidas a lo largo del proyecto. También se describen posibles trabajos futuros que serían importantes desarrollar para completar la información expuesta en este proyecto.



CAPÍTULO 2: **CONCEPTOS DE INGENIERÍA** **FERROVIARIA**



CAPÍTULO 2. CONCEPTOS DE INGENIERÍA FERROVIARIA

La ingeniería ferroviaria contiene conceptos muy complejos y de difícil comprensión. Para entender de manera eficiente el contenido del proyecto es recomendable conocer algunos conceptos ferroviarios previos. Todos ellos se exponen a lo largo de este capítulo de forma resumida y particularizando algunos campos a los objetivos propios del proyecto, además de un breve resumen de la historia del mundo ferroviario.

2.1 Historia del ferrocarril

En el siglo XVIII, los trabajadores de diversas zonas mineras de Europa descubrieron que las vagonetas cargadas se desplazaban con más facilidad si las ruedas giraban guiadas por un carril hecho con planchas de metal, ya que de esa forma se reducía la fricción. Los carriles para las vagonetas sólo servían para trasladar los productos hasta la vía fluvial más cercana, que por entonces era la forma de transporte de grandes volúmenes.

Con inicio de la Revolución Industrial, en la Europa de principios del siglo XIX, se exigía formas más eficaces de llevar las materias primas desde las minas hasta las nuevas fábricas y trasladar desde éstas los productos terminados. Los dos principios mecánicos, guiado de ruedas y uso de fuerza motriz, fueron combinados por primera vez por el ingeniero de minas inglés Richard Trevithick, quien el 24 de febrero de 1804 logró adaptar la máquina de vapor, que se utilizaba desde principios del siglo XVIII para bombear agua, para que tirara de una locomotora que hizo circular a una velocidad de 8 kilómetros por hora.

La potencia necesaria para arrastrar trenes, en lugar de uno o dos vagones, se aseguró colocando una locomotora de vapor sobre dos o más ejes con las ruedas unidas mediante bielas. La primera vía férrea pública del mundo, la línea Stockton-Darlington, en el noreste de Inglaterra, se inauguró en 1825 para el transporte de carga. La primera línea que se desarrolló para el transporte de personas que funcionaba con máquinas de vapor fue la línea que unía Liverpool y Manchester, inaugurada en 1830.



A partir de este punto, este medio de transporte se fue popularizando por Europa y Estados Unidos obligando a desarrollar los trenes para alcanzar diseños más evolucionados.

Los continuos avances relativos a tamaño, potencia y velocidad de la locomotora de vapor durante los primeros cien años de historia del ferrocarril ofrecieron los resultados más impresionantes en Norteamérica. En la década de 1920 la necesidad de que algunas vías férreas de Estados Unidos tuvieran que recorrer largas pendientes en zonas montañosas impulsó el desarrollo de la locomotora de vapor con chasis articulado, de modo que podía inscribirse en las curvas sin grandes problemas.

Hacia 1941, se creó en América la locomotora más grande hasta ese momento, la denominada *Big Boy* que incorporaba el bogie y se deshacía de los ejes simples. La máxima expresión de la locomotora de vapor se produjo en el año 1950 en España con la locomotora denominada Confederación. Esta máquina ofrecía una potencia de más de 4000 caballos de vapor y era capaz de remolcar trenes de hasta 800 toneladas. La locomotora de vapor se utilizó hasta el año 1970 donde ya se abrían paso nuevas tecnologías que competían con la máquina de vapor [1].

Así empieza la era de las locomotoras equipadas con motor diesel, que desde principios del siglo XX se desarrollaba a partir de la investigación llevada a cabo por Rudolf Diesel. La investigación planteaba la ignición del combustible en un cilindro, inflamándolo por medio del calor producido por la compresión de aire. La primera vez que se utilizó una locomotora con tracción diesel fue en el estado de Prusia en el año 1912 y fue a partir de entonces cuando se inicia el constante desarrollo de la tracción diesel [2].

En el final del siglo XIX también se desarrollaron motores eléctricos de corriente continua que se implantaban en las locomotoras para remolcar los trenes. A partir del descubrimiento de la corriente alterna, los trenes alcanzan un mayor poder de tracción además de permitir que el tren pueda alejarse del punto donde se genera la energía. En la actualidad, el tren propulsado mediante motores eléctricos es el más habitual en las vías debido al menor coste de mantenimiento y a la no emisión de contaminantes directos a la atmósfera.

2.2 La vía

El lugar por donde circulan los trenes se denomina ferrocarril o vía. La construcción de un vía ferroviaria se divide en dos, por un lado el desarrollo de una infraestructura, la cual permite adecuar el terreno para el correcto funcionamiento del ferrocarril y por otro lado la construcción de una superestructura que posibilita que los vehículos ferroviarios puedan transitar por el ferrocarril.

2.2.1 Infraestructura

La infraestructura es el terreno base sobre el que se asienta la vía; también se denomina explanación o plataforma. La componen aparte de numerosas obras de defensa (muros de contención, drenajes, saneamientos, etc.), las denominadas obras de fábrica.

Se denomina obras de fábrica a aquellas obras que se realizan para salvar los obstáculos naturales del terreno como ríos, valles o montañas y así permitir la correcta construcción de la vía ferroviaria [3]. Entre ellas se encuentran:

- Viaductos: Utilizados cuando la distancia a cubrir es muy grande debido a depresiones del terreno como valles o cañones (Ver figura 2.1).
- Puentes: Son obras de fábrica o metálicas realizadas para salvar la dificultad orográfica como por ejemplo un río (Ver figura 2.2).
- Pasos a distinto nivel: Tanto superiores como inferiores que permiten el cruzamiento entre distintos viales (Ver figura 2.3).
- Pasos a nivel: Aunque no son obras de fábrica como tal, pues el cruce de ambos viales es al mismo nivel, se puede incluir en este punto (Ver figura 2.4).
- Túneles: Obra de fábrica que posibilita el paso por zonas montañosas y para salvar zonas urbanas (Ver figura 2.5).



Figura 2.1. Viaducto.



Figura 2.2. Puente.



Figura 2.3. Paso a distinto nivel.



Figura 2.4. Paso a nivel.



Figura 2.5. Túnel.

Aparte de las obras de fábrica, se tiene que realizar un estudio de trazado, el cual se compone de trazado en planta, trazado en alzado o perfil longitudinal y perfil transversal [4].

- Trazado en planta: Para proyectar el trazado en planta se utilizan tramos rectos y curvos. En el punto de unión de un tramo recto con uno curvo aparece instantáneamente la fuerza centrífuga, originando gran peligro de descarrilamiento y pérdida de confort para el viajero. Para subsanar este problema se intercalan arcos de unas curvas llamadas de transición que hacen que la fuerza aparezca paulatinamente. En el trazado en planta también se hace el estudio de los peraltes para contrarrestar la fuerza centrífuga.
- Perfil longitudinal: Es una línea que une los diferentes planos denominados rasantes que componen el trazado de la vía, recogiendo las alturas sobre el nivel del mar, con expresión de la declividad en milímetro por metro. Los cambios de rasante se denominan rampa si en el sentido de la circulación la vía asciende o pendiente si en este mismo sentido la vía desciende.
- Perfil transversal: Se define como perfil transversal a la intersección de la plataforma con un plano vertical que es normal en el punto de interés, al eje de la vía. Existen cuatro tipos de explanaciones:

- *En trinchera*, en las que es necesario un vaciado de tierras (Ver figura 2.6).

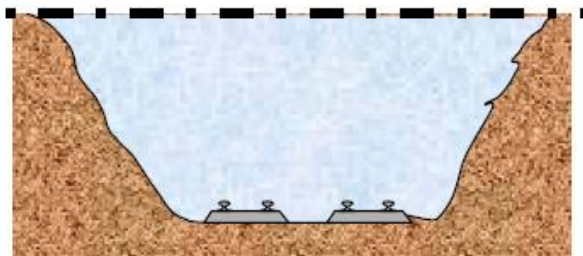


Figura 2.6. Trinchera.

- *En terraplén*, en las que se necesita aporte de material (Ver figura 2.7).

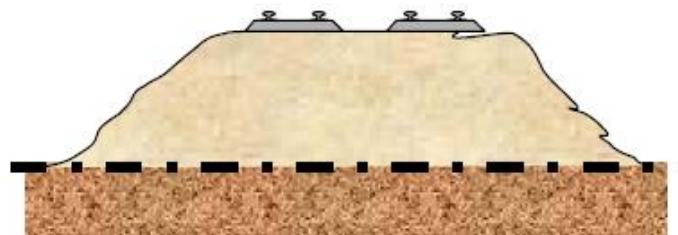


Figura 2.7. Terraplén.

- *Mixtas*, conjugación de las dos anteriores; se utilizan en vías que discurren por la ladera de una montaña (Ver figura 2.8).

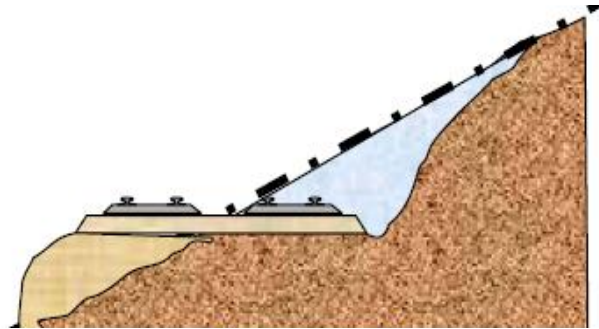


Figura 2.8. Mixto.

- *En línea*, que no requieren más que una correcta nivelación del terreno (Ver figura 2.9).



Figura 2.9. En línea.

2.2.2 Superestructura

La superestructura comprende la vía propiamente dicha y el conjunto de aparatos e instalaciones necesarias para que los trenes puedan circular con garantías de eficacia y seguridad [4].

Como primer elemento de la superestructura tenemos el carril con sus componentes.

2.2.2.1 El carril

El carril es una barra de acero laminado con forma de seta, cuya función básica es la sustentación y el guiado de los trenes, sirviendo en algunos casos de retorno de los circuitos eléctricos como el de señales; tiene diferentes pesos por metro lineal y longitudes de hasta 288 metros. En él se puede distinguir 3 partes:

- Cabeza: Se utiliza como elemento de rodadura y sobre él se sitúa la rueda.

- Patín: Representa la base del carril y sirve para su sujeción a las traviesas.
- Alma: Es la parte delgada que une la cabeza con el patín.

En la figura 2.10 se representa una sección de un carril donde se diferencian sus partes.

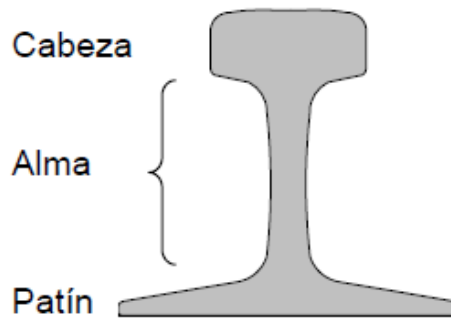


Figura 2.10. Sección carril.

Los carriles se sueldan unos a otros constituyendo una única barra soldada. Para compensar los efectos de su dilatación se utilizan las llamadas juntas de dilatación.

2.2.2.2 Las traviesas

Son elementos de diferentes materiales (madera, hormigón armado, etc.) que situadas en dirección transversal al eje de la vía, sirven de sostenimiento al carril constituyendo el nexo de unión entre éste y el balasto.

2.2.2.3 El balasto

Es un elemento granular de silíceo sobre el que se asientan las traviesas, cuya misión es amortiguar y repartir los esfuerzos que ejercen los trenes sobre la vía, impedir el desplazamiento de esta y proteger la plataforma.

2.2.2.4 Los tirafondos y las placas de asiento

Son los elementos que fijan el carril a la traviesa y que pueden variar de forma en función del tipo de ésta. Protegen a las traviesas del desgaste y del daño por impacto, debido a que las placas de asiento permiten aumentar la

superficie de apoyo entre el carril y las traviesas. Además, contribuyen a la correcta posición e inclinación del carril.

2.2.2.5 Aparatos de la vía

Son elementos que varían la forma habitual de la vía, es decir, son elementos que se cruzan con la vía y provocan que el carril no sea continuo. Existen dos tipos básicos de aparatos de vía:

- Los desvíos o cambio de agujas: Permiten a una vía ramificarse en dos o excepcionalmente en tres vías, siendo los ejes de las vías tangentes entre sí. El cambio en sí permite la conexión de dos carriles divergentes asegurando la continuidad de las respectivas vías. Los desvíos o cambios de aguja se componen de una parte fija en la conexión de las dos vías que se llama *corazón*; y una parte móvil que permite el paso hacia una vía u otra, que se denomina *espadín*. Para realizar un cambio de vía, se utilizan los cambios de aguja, que pueden ser de varios tipos: eléctricos, mecánicos o manuales. En la figura 2.11 se muestra un desvío o cambio de agujas donde se indica el *corazón* y el *espadín*.

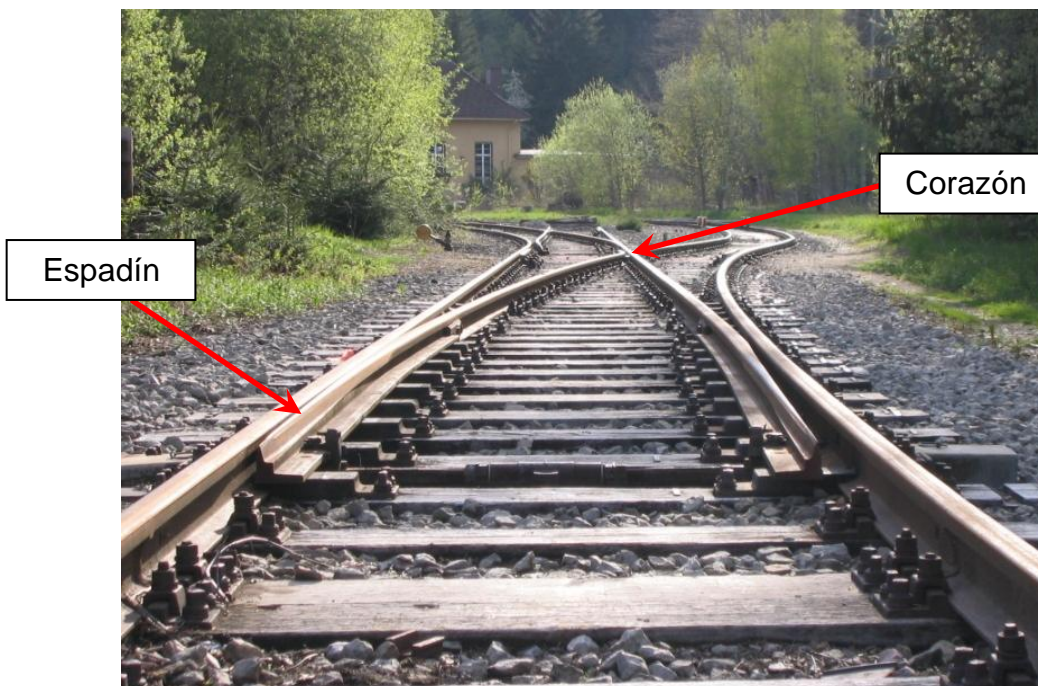


Figura 2.11. Desvío, espadín y corazón.

- Travesías: Permiten la intersección de dos vías sin posibilidad de cambiar de una a otra (Ver figura 2.12).



Figura 2.12. Travesía.

2.3 El bogie

El bogie es un conjunto de dos o tres pares de ruedas, según modelo, montadas sobre sendos ejes próximos, paralelos y solidarios entre sí, que se utilizan en ambos extremos de los vehículos ferroviarios destinados a circular sobre carriles. El vehículo se apoya en cada bogie por medio de un eje vertical denominado pivote, gracias al que puede describir curvas muy cerradas. En definitiva, es la estructura rodante sobre la que descansan los vagones de ferrocarril y las locomotoras actuales, que no utilizan ejes simples [5].

Los bogies cuentan, por regla general, con una suspensión primaria situada entre los ejes y el bastidor del bogie además de una suspensión secundaria localizada entre el bastidor y la caja del vagón. Esta última suspensión tiene una mayor importancia si el vehículo está destinado al transporte de personas, ya que, es la encargada de controlar y amortiguar las vibraciones provenientes del bogie hacia compartimento de los pasajeros (Ver la figura 2.13).

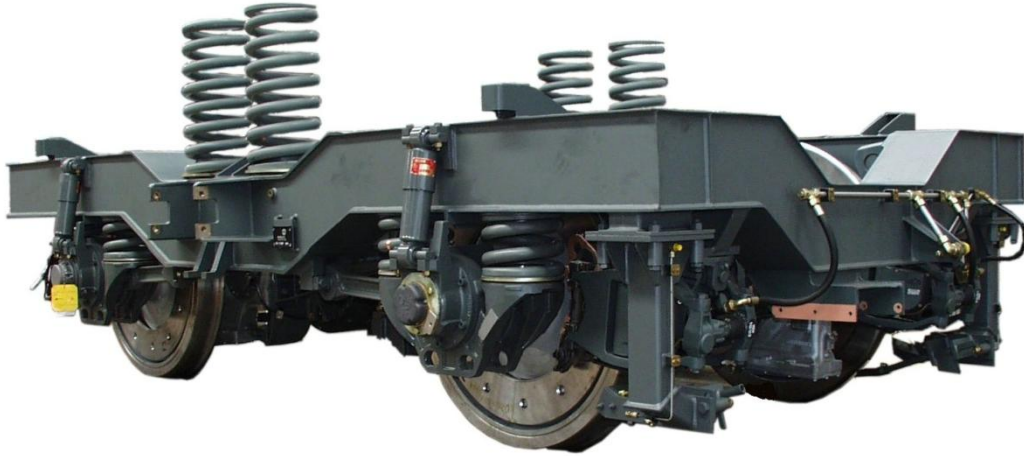


Figura 2.13. Bogie.

Los bogies se suelen clasificar en función del número de ejes que tenga, siendo el más común en la actualidad el bogie de dos ejes. También se puede clasificar en función de si los ejes son motrices o remolcados, estos últimos sin fuerza de tracción, de este modo existen bogies con todos los ejes motrices, bogies con todos los ejes remolcados o bogies mixtos.

A parte de estas clasificaciones se suele distinguir entre bogies destinados a trenes de mercancías o bogies orientados a trenes para el transporte de viajeros, cuya diferencia radica en que los bogies de trenes de mercancías no suelen llevar suspensión secundaria ya que el fin de ésta es mejorar el confort en la caja. Según esta última distinción se suelen nombrar los bogies con la letra Y seguida de un número par si el bogie es de trenes para transportar viajeros o impar si el bogie es para trenes de mercancías.

Los principales componentes de un bogie destinado a trenes de transporte de viajeros son: bastidor, eje calado, ruedas, caja de grasa y suspensiones, tanto primaria como secundaria.

2.3.1 El bastidor

El bastidor del bogie es la estructura metálica donde se asientan el resto de componentes. Esta estructura suele ser de forma rectangular formada por dos elementos longitudinales unidos entre sí por otros dos elementos transversales a los cuales se fijan los diferentes componentes del bogie. Tanto los elementos longitudinales como los transversales están constituidos por

vigas de sección transversal cerrada. En la figura 2.14 se representa el dibujo de un bastidor de un bogie.

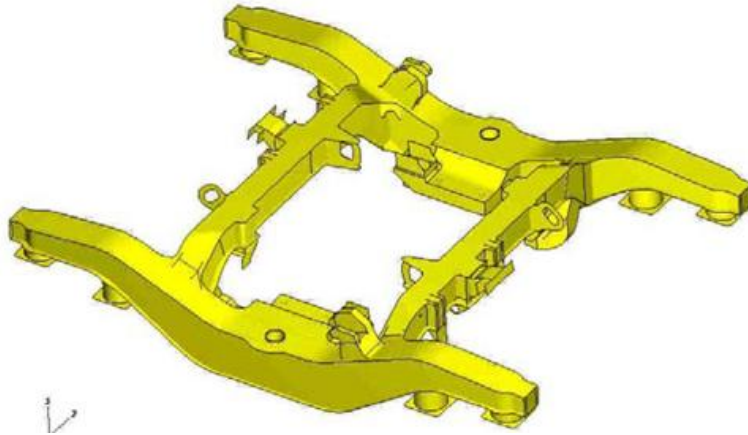


Figura 2.14. Bastidor de un bogie.

2.3.2 Eje calado

El eje calado es el elemento compuesto por un par de ruedas y el eje que las une, de tal manera que todo el conjunto gira a la misma velocidad angular y proporciona una distancia fija entre las ruedas. Este conjunto se une al bastidor del bogie mediante la suspensión primaria para atenuar las irregularidades de la vía.

Debido a que ambas ruedas giran a la misma velocidad, éstas sufren un desgaste al paso de las curvas, ya que, al tener más recorrido la rueda exterior se produce un deslizamiento entre la rueda y el carril. El deslizamiento es el mayor problema que existe en el eje calado (Ver figura 2.15).

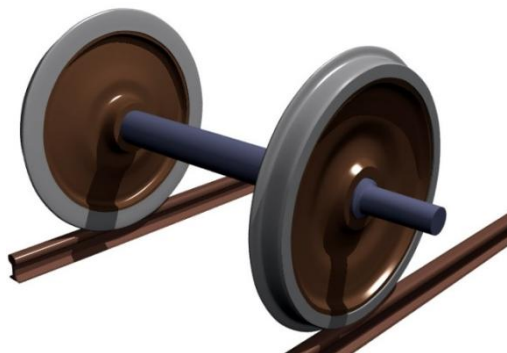


Figura 2.15. Eje calado.

2.3.3 Rueda ferroviaria

A excepción de reducidos casos en los que el ferrocarril utiliza para su desplazamiento ruedas dotadas de neumáticos o fenómenos de electromagnetismo, el procedimiento de desplazamiento más ampliamente utilizado es el de la rueda de acero rodando sobre un carril igualmente de acero.

Las ruedas de los trenes tienen por misión apoyar el peso sobre la vía, guiar el vehículo sobre los carriles, transmitir al carril los esfuerzos, lograr circular en curvas y frenar y traccionar el propio tren.

Las ruedas son de los elementos más importantes en un vehículo ferroviario ya que es donde se produce el contacto con la vía. Debido a esto es necesario realizar inspecciones periódicas para determinar el estado de su geometría y ver si existen grietas o defectos en el material. En función de cómo se une la llanta al velo, existen tres tipos fundamentales de ruedas ferroviarias:

- Rueda monobloque: La llanta y el velo se unen a través de un radio de acuerdo, perteneciendo la llanta y el velo a la misma unidad.
- Centro y bandaje: La llanta se une al velo a través de un aro metálico denominado cincho, con calado en caliente. En este caso es posible cambiar la llanta conservando el velo y el cubo.
- Rueda elástica: La llanta se une al velo a través de una banda de goma. En este caso también es posible cambiar la llanta conservando el velo y el cubo. La banda elástica amortigua ruidos y vibraciones y es muy usada en las ruedas de los tranvías y metros ligeros.

En la figura 2.16 se muestran los tres tipos de ruedas más utilizadas en el transporte ferroviario, con la denominación A para la rueda monobloque, con denominación B para la rueda de centro y bandaje y por último, con denominación C para la rueda elástica.

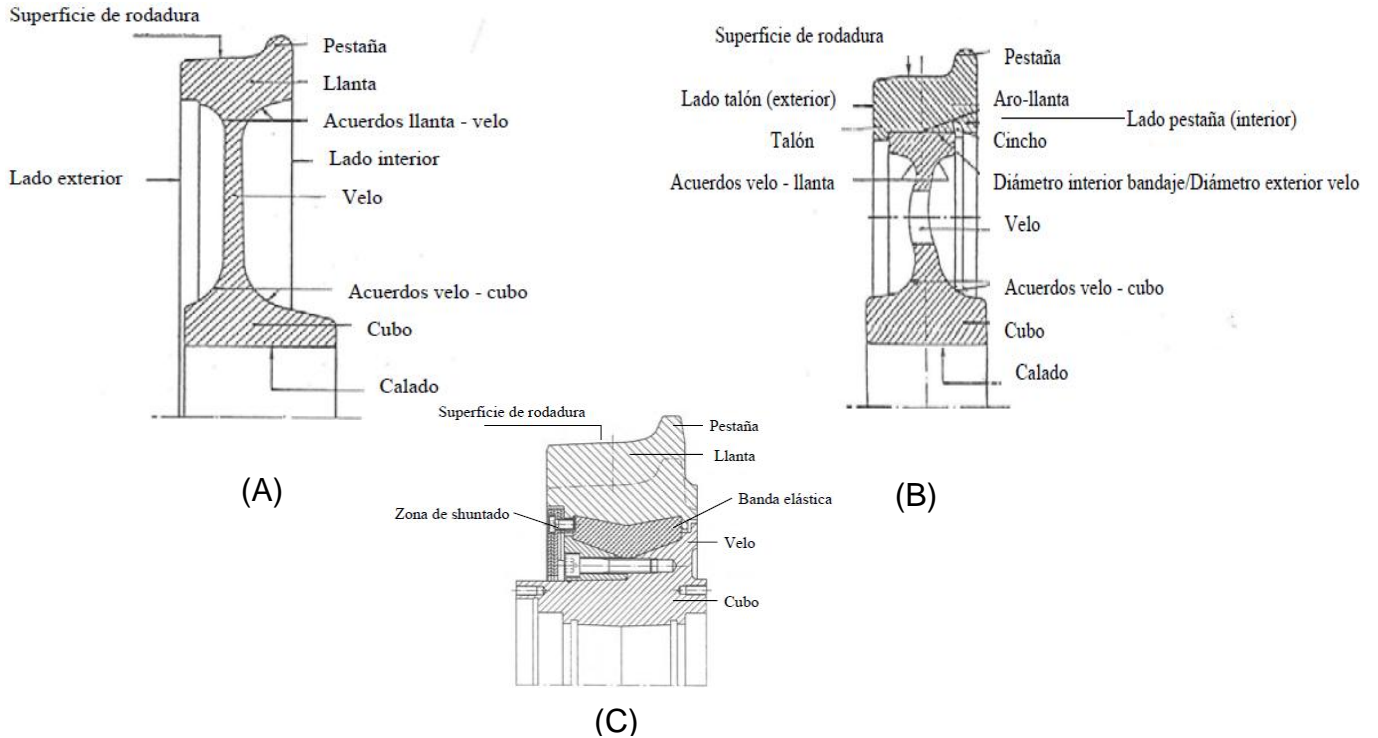


Figura 2.16. Rueda: (A) Monobloque, (B) De centro y bandaje, (C) Elástica.

Es bien sabido que la forma con la que se diseña tanto el perfil de la rueda en la zona de rodadura como la cabeza del carril condiciona fuertemente la respuesta del vehículo desde el punto de vista de diversos factores, como son la estabilidad, ausencia de vibraciones, la capacidad de inscripción en curva, el desgaste de ruedas y carriles y la seguridad de rodadura entre otros.

Es por ello que surge la necesidad de obtener perfiles lo más idóneos en la medida de lo posible para las condiciones de circulación previstas. De este modo se consigue una respuesta dinámica mejorada, aumentando la estabilidad del vehículo, o bien reduciendo el desgaste de los perfiles y las fuerzas transmitidas a la vía en tramos curvos.

Tradicionalmente los perfiles de rueda se han obtenido en base a la experiencia e intuición del diseñador, teniendo en cuenta el tipo de carril sobre el que iban a entrar en contacto, así como las características del vehículo y de la vía [6].

En la figura 2.17 se muestra una gráfica con el perfil típicamente utilizado en vehículos ferroviarios, medido en pulgadas y con escala 1:10.

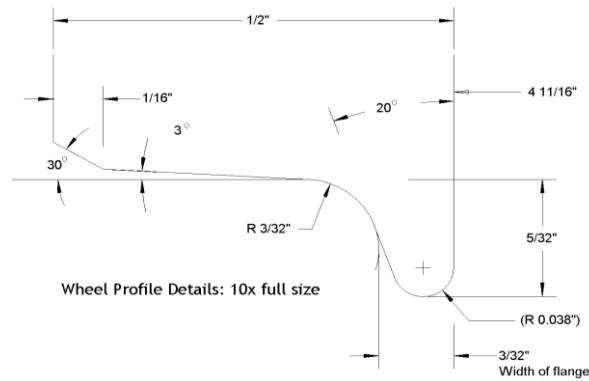


Figura 2.17. Perfil típico de rueda ferroviaria.

2.3.4 Caja de grasa

Este elemento proporciona la unión entre los ejes y el bastidor y facilita la rodadura de los ejes. La caja de grasa permite transmitir los esfuerzos de frenado desde los ejes a la masa del vehículo y lubricar las partes metálicas disminuyendo el rozamiento y con ello el calentamiento del eje. Sobre ella, se fijan los resortes o ballestas que soportan el bastidor del vehículo, transmitiendo la carga a la parte final de la rueda [7].

Existen dos tipos principales de cajas de grasa, las que utilizan cojinetes de fricción y las cajas de grasa que usan cojinetes de rodillos. Éstas últimas son las más utilizadas ya que tienen el coeficiente de rozamiento menor y, además, bajos costes de mantenimiento y reparación. En la figura 2.18 se muestra un despiece de una caja de grasa.

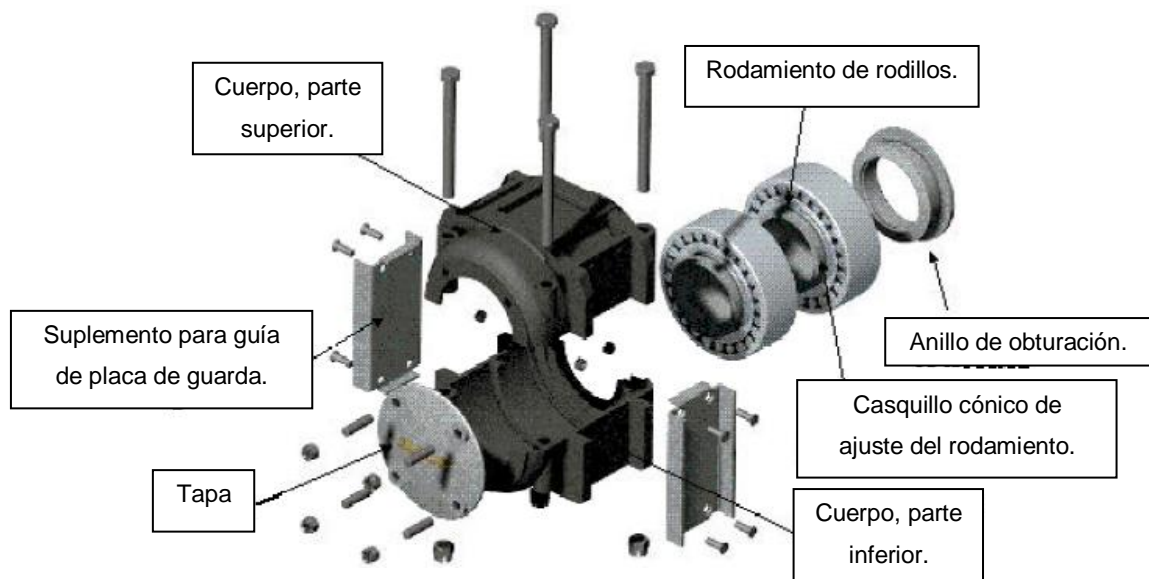


Figura 2.18. Despiece caja de grasa.

2.3.5 Suspensión primaria

Situado entre los ejes y el bastidor del bogie, se encuentra el sistema de suspensión primaria. Esta suspensión se encarga de filtrar las vibraciones producidas por las irregularidades transmitidas desde la vía hasta las ruedas, evitando que dicha vibración influya en los demás sistemas del vehículo. Además del filtrado, la suspensión primaria asegura un correcto reparto de pesos sobre las ruedas, evitando de esta forma la pérdida de contacto entre ambas, que podría desencadenar grandes inestabilidades.

La configuración típica de una suspensión primaria es un conjunto de muelle helicoidal más amortiguador por cada extremo del eje. De esta forma, el muelle proporciona libertad de movimiento con cierta rigidez mientras que la misión del amortiguador reside en atenuar las vibraciones, oponiéndose al cambio de estado, lo que produce una liberación de la energía generada en el movimiento, convirtiéndola en calor.

En la figura 2.19 se muestra una suspensión primaria típica señalando el muelle y el amortiguador.

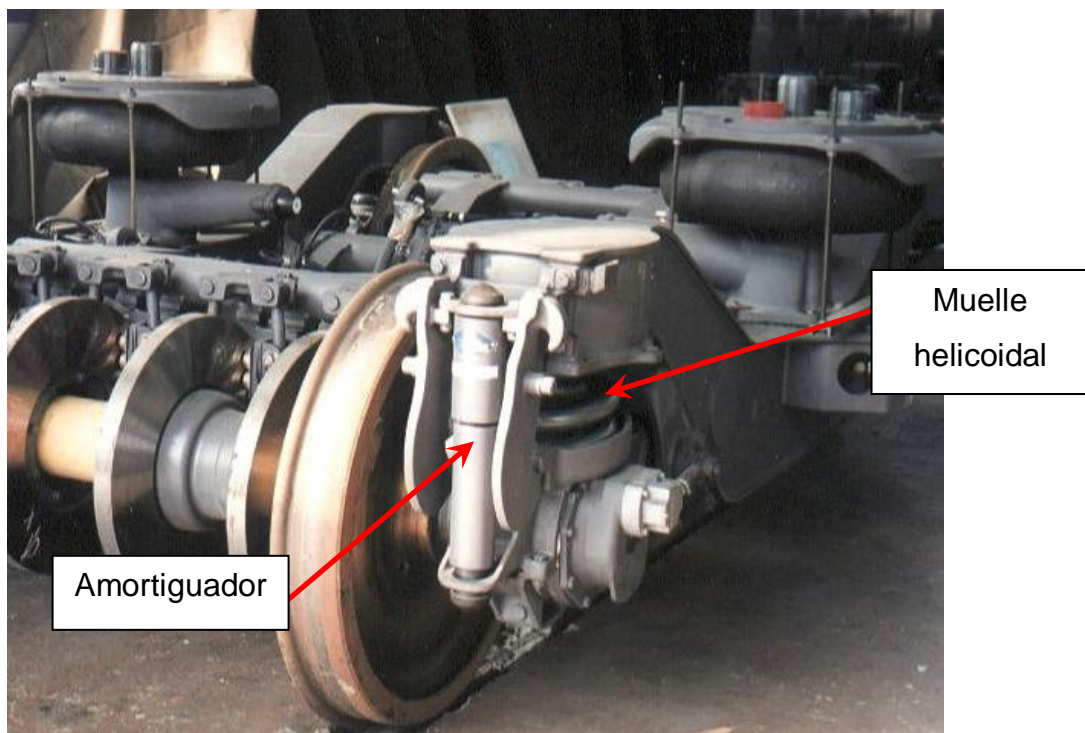


Figura 2.19. Suspensión primaria.

2.3.6 Suspensión secundaria

La suspensión secundaria está localizada entre el bastidor del bogie y la caja del vehículo y se encarga de filtrar las vibraciones que se producen en el bogie para que, de esta manera, no lleguen hasta los pasajeros o la mercancía.

Existen dos tipos comunes de suspensión secundaria, los cuales se diferencian en el elemento de rigidez, compartiendo ambos el mismo sistema de amortiguación:

- Configuración de resortes helicoidales: Esta configuración utiliza resortes helicoidales que proporcionan flexibilidad vertical y lateral. Para incrementar la flexibilidad lateral se sitúan apoyos de caucho-metal en la base de los resortes helicoidales. La suspensión se completa mediante amortiguadores hidráulicos verticales y laterales.
- Configuración de resortes neumáticos: Asegura la flexibilidad lateral y vertical mediante dichos resortes, en los que, el amortiguamiento vertical se consigue mediante un orificio de intercomunicación entre el balón y un depósito auxiliar, mientras que la amortiguación lateral se obtiene mediante el empleo de amortiguadores hidráulicos.

En la figura 2.20 se muestran los dos tipos de suspensiones secundarias más utilizadas en el transporte ferroviario.

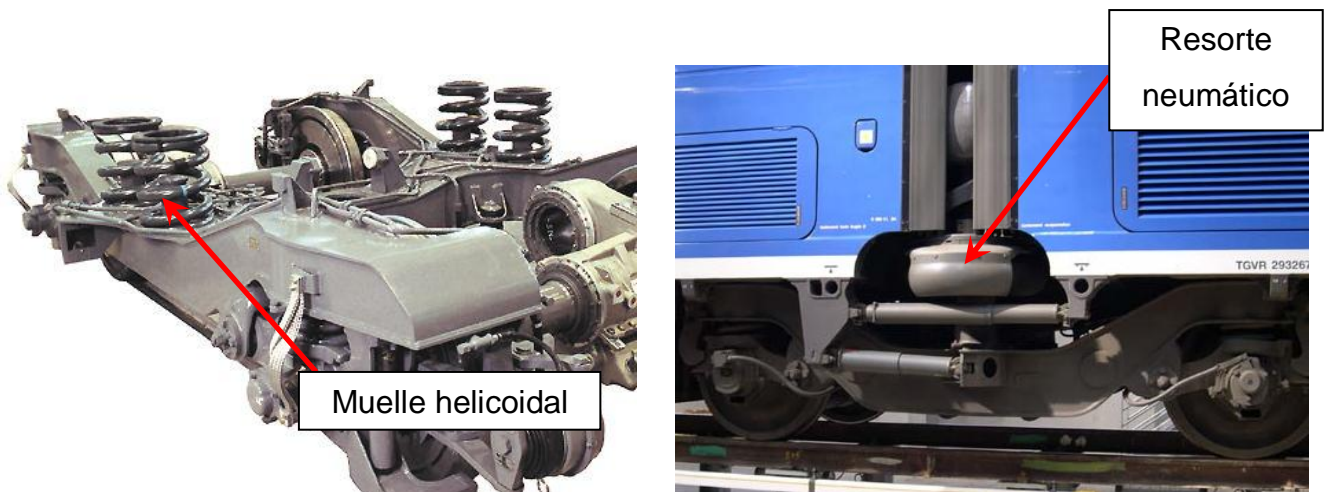


Figura 2.20. Suspensión secundaria. Muelle helicoidal y Resorte neumático

2.4 La caja

La caja es el compartimento cerrado donde se encuentran los equipos necesarios para alojar en él a los pasajeros y la carga. La caja se apoya sobre los ejes o bogies mediante los elementos de la suspensión secundaria. Es el elemento del tren que más peso introduce al vehículo por lo que se busca la mayor ligereza dentro de la robustez requerida para la carga.

En la figura 2.21 se muestra la imagen de un tren indicando el elemento denominado caja o cuerpo.

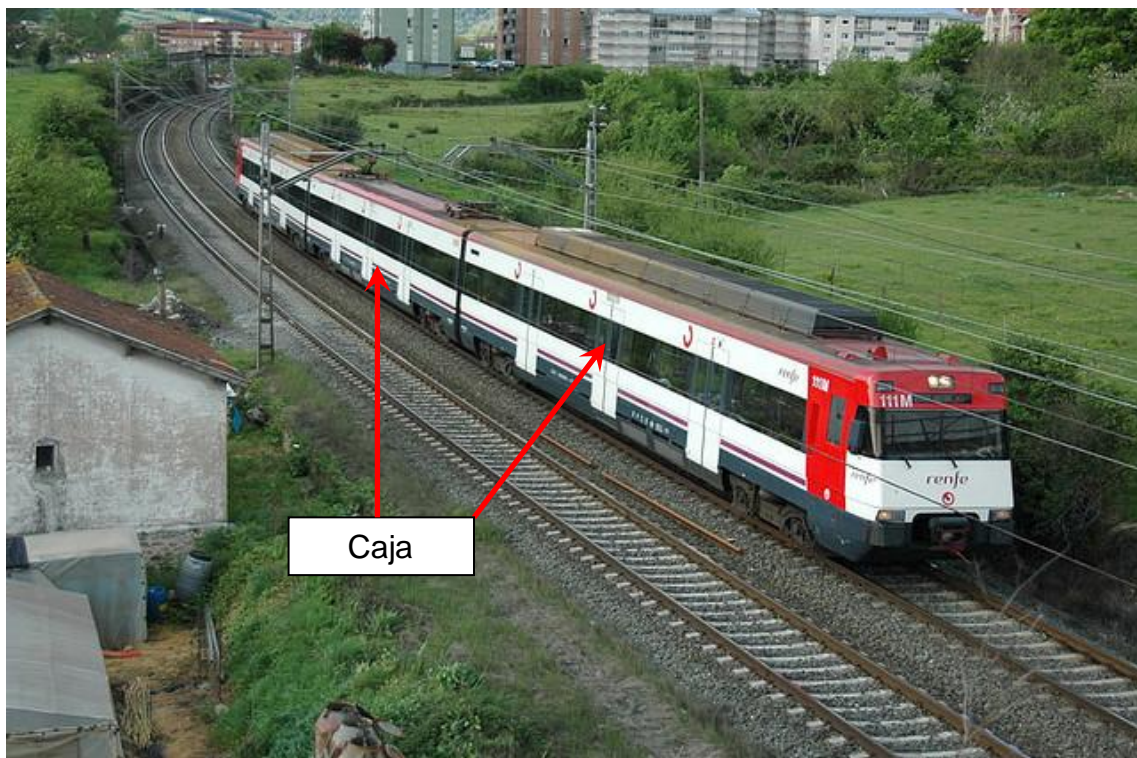


Figura 2.21. Caja o cuerpo de un tren.



CAPÍTULO 3: **ESTUDIO DEL CONFORT**

CAPÍTULO 3. ESTUDIO DEL CONFORT

En este proyecto, el objetivo principal es estudiar el nivel de confort que sentiría una persona a bordo de un tren en diferentes situaciones de circulación, de modo que en este capítulo se va a explicar de forma detallada la definición de confort y las variables que lo condicionan. Además, se van a estudiar los diferentes métodos para el cálculo del nivel de confort.

Se entiende por confort a aquello que brinda comodidades y genera bienestar o simplemente que no ofrece incomodidad, estrés o dolor. En el ámbito del transporte, el confort se centra en que el usuario tenga una sensación de bienestar a la hora de utilizar dicho transporte. Es importante no sólo reducir los factores negativos que condicionan el confort, sino también potenciar aquellos factores positivos que ofrecen comodidad al usuario.

3.1 Definiciones relacionadas con el confort

La evaluación del confort de un vehículo puede abordarse o bien desde el punto de vista técnico de medición y evaluación de cantidades dinámicas físicas (confort de marcha) o bien desde el punto de vista psicofísico de la percepción humana (calidad de la marcha). Los términos, calidad de marcha o confort de marcha, normalmente se suelen confundir o mal interpretar por lo que es necesaria una breve explicación de cada uno de ellos.

3.1.1 Calidad de marcha

La calidad de marcha se define como la reacción de un ser humano a un conjunto de condiciones físicas en el entorno del vehículo, tales como, variables dinámicas, ambientales o ergonómicas. A continuación se detallan estas variables [8]:

- Variables ambientales: Se tiene en cuenta variables como la temperatura, presión, calidad del aire, ventilación del habitáculo, ruido, altas frecuencias de vibración, etc.
- Variables ergonómicas: La posición del cuerpo en el habitáculo del tren, distancia entre asientos, así como otras variables relacionadas espacio disponible en el habitáculo.

- Variables dinámicas: Aceleraciones y sobre-aceleraciones en los tres ejes (longitudinal, lateral y vertical), movimientos verticales en los tres ejes (balanceo, cabeceo y guiñada) y movimientos repentinos como choques y sacudidas.

3.1.2 Confort de marcha

El confort de marcha es usado como una evaluación técnica de los movimientos del vehículo, es decir, de sus características dinámicas. Esta evaluación se basa en las reacciones humanas a las acciones dinámicas del vehículo.

Se entiende por acciones dinámicas a las aceleraciones en los tres ejes (longitudinal, lateral y vertical), así como, a los movimientos angulares (cabeceo, balanceo y guiñada). Estas cantidades de movimiento pueden verse influenciadas por diferentes factores, el tipo de vehículo, el sistema de suspensión utilizado, las características del recorrido, la utilización de trenes con sistemas de balanceo y la velocidad del tren. Además, hay que tener en cuenta la influencia de la flexibilidad de la estructura del vagón, la cual, puede aumentar las vibraciones a unas determinadas frecuencias, resultando ser una componente negativa a la hora de la evaluación del confort. No hay que olvidar que al basarse en las reacciones humanas, también influyen las condiciones físicas del usuario, como pueden ser el peso, la edad o el género, y las condiciones psicológicas, como la sugestión o ciertas experiencias pasadas [9] [10].

3.2 Modelos de evaluación del confort

En este punto se van a definir los diferentes métodos para el cálculo del nivel de confort que se utiliza en este proyecto como son, el método de Sperling y el análisis de confort de acuerdo con la ficha *UIC 513*, especificado también en la normativa *UNE-ENV 12299* [11] [12].

3.2.1 Método de Sperling

Este método se basa en la formulación de un índice W_z para la evaluación tanto del confort en marcha, como para la calidad de marcha del vehículo.

En 1941, Sperling y Helberg obtienen los primeros resultados para dicha evaluación:

- Confort del pasajero:

$$W_z = 0.896 \sqrt[10]{\frac{a^3}{f} F(f)} \quad \text{Ecuación 3.1.}$$

- Calidad de la marcha:

$$W_z = 0.896 \sqrt[10]{\frac{a^3}{f}} \quad \text{Ecuación 3.2.}$$

donde:

- a: valor máximo de la aceleración medida en la dirección considerada, en el suelo de la caja del vehículo [cm/s^2].
- f: frecuencia de oscilación [Hz].
- F (f): función de ponderación en frecuencia de las aceleraciones.

Con posterioridad, Sperling y Betzhold (1956) propusieron una nueva formulación del índice W_z .

$$W_z = \left[\frac{1}{T} \int_0^T (B(f) \cdot a(t))^2 dt \right]^{0.15} \quad \text{Ecuación 3.3.}$$

donde:

- a (t): es la aceleración máxima medida en el suelo de la caja del vehículo [cm/s^2].
- T: es la duración de la medida.
- B (f): es una función empírica de ponderación en frecuencia de las aceleraciones (sinusoidales), que tiene expresiones distintas para la dirección vertical y lateral ($B_v(f)$ y $B_L(f)$, respectivamente):

$$B_V(f) = 0.588 \cdot \left[\frac{1.911 \cdot f^2 + (0.25 \cdot f^2)^2}{(1 - 0.2777 \cdot f^2)^2 + (1.563 \cdot f - 0.0368 \cdot f^3)^2} \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación 3.4.}$$

$$B_L(f) = 1.25 \cdot B_V(f) \quad \text{Ecuación 3.5.}$$

Por tanto, el nivel de confort se estima insertando el valor obtenido en la tabla de valores 3.1.

W_z	CONFORT DE LA MARCHA	W_z	CALIDAD DE LA MARCHA
$1 \leq W_z < 2$	Ligeramente perceptible	$1 \leq W_z < 2$	Muy buena
$2 \leq W_z < 2.5$	Netamente perceptible	$2 \leq W_z < 3$	Buena
$2.5 \leq W_z < 3$	No desagradable y soportable	$3 \leq W_z < 4$	Satisfactoria
$3 \leq W_z < 3.25$	Poco agradable pero aún soportable	$4 \leq W_z < 4.5$	Aceptable para circular
$3.25 \leq W_z < 3.5$	Fuertemente incómodo	$4.5 \leq W_z < 5$	Inadecuada para circulación
$3.5 \leq W_z < 4$	Extremadamente incómodo y no soportable mucho tiempo	$W_z \geq 5$	Peligrosa para el servicio
$W_z \geq 4$	Extremadamente desagradable y perjudicial en exposiciones largas		

Tabla 3.1. Escala índice Sperling

3.2.2 Método de la norma UNE-ENV 12299 y ficha UIC 513

En la norma europea UNE-ENV 12299 se resumen los trabajos relevantes sobre la materia de la comodidad de los viajeros. En particular, se definen los procesos de medición y evaluación del confort medio de viaje de los usuarios de un vehículo ferroviario considerando 3 enfoques distintos:

1. Teniendo en cuenta los efectos que provoca la exposición a las vibraciones, medidas en el piso de la caja del coche, sobre la comodidad de viaje. Se trata del llamado *Método Simplificado* para la evaluación de la comodidad del pasajero medio (MV), que se establece como obligatorio. Este método deriva del proyecto de ficha UIC 513. Se calcula el índice N_{MV} mediante la ecuación:

$$N_{MV} = 6 \cdot \sqrt{(a_{XP95})^2 + (a_{YP95})^2 + (a_{ZP95})^2} \quad \text{Ecuación 3.6.}$$

donde los términos de las aceleraciones incluidas en esta ecuación representan los percentiles 95, de las aceleraciones longitudinal, lateral y vertical, de valores R.M.S. en 5 segundos, para una duración del ensayo de 5 minutos.

2. Teniendo en cuenta la exposición a la vibración medida en las interfaces vehículo-cuerpo, tanto si va sentado o de pie el usuario. Se trata, en este caso, del llamado *Método Completo* y es de carácter recomendatorio o informativo. Este método también deriva del proyecto de ficha UIC 513. Se calcula los índices N_{VA} (pasajeros sentados) y N_{VD} (pasajeros de pie) mediante:

$$N_{VA} = 4 \cdot (a_{ZP95}) + 2 \cdot \sqrt{(a_{YA95})^2 + (a_{ZA95})^2} + 4 \cdot (a_{XD95}) \quad \text{Ecuación 3.7.}$$

$$N_{VD} = 3 \cdot \sqrt{16 \cdot (a_{XP50})^2 + (a_{YP50})^2 + (a_{ZP50})^2} + 5 \cdot (a_{YP95}) \quad \text{Ecuación 3.8.}$$

donde los subíndices y superíndices:

- *P, A, D*: Indican, respectivamente, medición en el piso (suelo), en la base del asiento (interfaz asiento-cadera) y en el respaldo del asiento.
 - *95, 50*: Indican el percentil del histograma de aceleraciones eficaces ponderadas.
3. Teniendo en cuenta los efectos en la comodidad en base a si el tren circula en tramos curvos o en la transición de recta a curva, ya que existen diferencias significativas al confort que sienten los pasajeros. La compañía ferroviaria *British Rail Research* llevó a cabo varios test para la evaluación del nivel de confort tanto en curva como en transición, basados en la propia experiencia de pasajeros y obteniendo a partir de ellos los siguientes índices:



- P_{DE} : Percepción del confort por los viajeros en la circulación por curva:

$$P_{DE} = a \cdot \ddot{y}_p + b \cdot \ddot{y}_m - c \quad \text{Ecuación 3.9.}$$

donde:

- \ddot{y}_p : Valor pico a pico de la aceleración lateral, medido en una ventana de tiempo de 2s y filtrado con un filtro de paso bajo de 2 Hz.
- \ddot{y}_m : Valor absoluto de la aceleración lateral media, medido en una ventana de tiempo de 2s y filtrado con un filtro de paso bajo de 2 Hz.
- a, b, c : Constantes que se definen en la tabla 3.2.

	a	b	c
De pie	1.63	2.65	37
Sentado	0.83	1.28	21.7

Tabla 3.2. Constantes P_{DE}

- P_{CT} : Percepción del confort en la circulación por transición de curva:

$$P_{CT} = a \cdot \dot{y} + b \cdot \ddot{y} - c + d \cdot \theta^e \quad \text{Ecuación 3.10.}$$

donde:

- \dot{y} : Valor absoluto máximo de la aceleración lateral en el cuerpo del vehículo desde la entrada a la curva hasta el final + 1.6s.
- \ddot{y} : Valor absoluto máximo de la sacudida en la curva de transición, calculado como $(\dot{y}(t + 1) - \dot{y}(t))$.
- θ : Valor absoluto máximo de la velocidad de giro en la curva de transición.
- a, b, c, d, e : Constantes que se definen en la tabla 3.3.

	a	b	c	d	e
De pie	2.8	2.03	11.1	0.185	2.283
Sentado	0.88	0.95	5.9	0.12	1.626

Tabla 3.3. Constantes P_{CT}

La escala con la que se le da sentido a los índices N_{MV} , N_{VA} y N_{VD} se muestra en la tabla 3.4.

Índice	Escala
$N_{MV}, N_{VA}, N_{VD} < 1$	Muy cómodo
$1 \leq N_{MV}, N_{VA}, N_{VD} < 2$	Cómodo
$2 \leq N_{MV}, N_{VA}, N_{VD} < 4$	Medio
$4 \leq N_{MV}, N_{VA}, N_{VD} < 5$	Incómodo
$N_{MV}, N_{VA}, N_{VD} \geq 5$	Muy incómodo

Tabla 3.4. Escala índices N_{MV} , N_{VA} y N_{VD}

3.3 Reacciones humanas ante vibraciones

En este apartado se van a resumir las respuestas humanas a las vibraciones de cuerpo completo, así como las causas del mareo inducido por el movimiento. El ser humano también sufre reacciones específicas cuando es sometido a vibraciones transmitidas por las manos, pero no se va a explicar ya que no se sufre este tipo de vibraciones en el transporte ferroviario.

3.3.1 Vibraciones sobre el cuerpo completo

Las exposiciones profesionales a las vibraciones del cuerpo completo se dan, principalmente, en el transporte, en algunas actividades de construcción o en procesos industriales. El transporte terrestre, marítimo y aéreo puede producir vibraciones que pueden causar malestar, interferir con las actividades u ocasionar lesiones.

Como todas las estructuras mecánicas, el cuerpo humano tiene frecuencias de resonancia a las que presenta una respuesta mecánica máxima. En el cuerpo humano existen diferentes frecuencias de resonancia, y además varían de unas personas a otras y en función de la postura. Los efectos de las vibraciones de cuerpo completo suelen ser máximos en el límite inferior del intervalo de frecuencias, de 0,5 a 100 Hz [13].

El malestar causado por la aceleración de la vibración depende de la frecuencia de la misma, la dirección, el punto de contacto con el cuerpo y la duración de la exposición a la vibración. En la vibración vertical de personas sentadas, el malestar a cualquier frecuencia aumenta en proporción a la magnitud de la vibración: si se reduce ésta a la mitad, el malestar tenderá a reducirse a la mitad. Los efectos de las vibraciones sobre la visión y el control manual están causados principalmente por el movimiento de la parte del cuerpo afectada (es decir, el ojo o la mano).

3.3.1.1 Alteraciones neuro-musculares

Las vibraciones producen un movimiento artificial pasivo del cuerpo humano (reflejos en músculos y tendones), que se sufre principalmente en los músculos de la espalda. Los reflejos de los tendones pueden disminuir o desaparecer temporalmente durante la exposición a las vibraciones de cuerpo completo a frecuencias superiores a 10 Hz.

3.3.1.2 Alteraciones cardiacas, respiratorias y metabólicas

Se han comparado las alteraciones durante la exposición a las vibraciones con las que se producen durante el trabajo físico moderado (es decir, aumentos de la frecuencia cardíaca, presión arterial y consumo de oxígeno). El aumento de ventilación obedece en parte a oscilaciones del aire en el sistema respiratorio. Las alteraciones respiratorias y metabólicas pueden no corresponderse, lo que posiblemente sugiere una perturbación de los mecanismos de control de la respiración.

3.3.1.3 Alteraciones sensoriales y del sistema nervioso

Se ha sostenido la existencia de alteraciones de la función vestibular debidas a las vibraciones de cuerpo completo. Las alteraciones de la función vestibular parecen revestir mayor entidad en las exposiciones a frecuencias muy bajas o próximas a la resonancia de cuerpo completo.

3.3.1.4 Efectos a largo plazo

Estudios indican con frecuencia que existe un riesgo elevado para la salud en la columna vertebral de personas expuestas durante muchos años a

intensas vibraciones de cuerpo completo. Tales riesgos pueden ser consecuencia secundaria de una alteración degenerativa primaria de las vértebras y discos intervertebrales. La parte afectada con más frecuencia es la región lumbar, seguida de la región torácica.

3.3.1.5 Otros riesgos para la salud

Las vibraciones de cuerpo completo intensas a frecuencias superiores a 40 Hz pueden causar daños y alteraciones del sistema nervioso central. En algunos estudios se ha encontrado un aumento de molestias inespecíficas, tales como dolor de cabeza y aumento de la irritabilidad.

3.3.2 Mareo inducido por el movimiento

La característica esencial de los estímulos que producen mareo inducido por el movimiento es que éstos generan información discordante en los sistemas sensoriales que suministran al cerebro información acerca de la orientación espacial y el movimiento del cuerpo. El aspecto principal de la discordancia es una desadaptación entre las señales suministradas, principalmente, por los ojos y el oído interno, y las que el sistema nervioso central "espera" recibir y que estén correlacionadas.

Los síntomas que aparecen ante la exposición al movimiento provocador, evolucionan en una secuencia determinada, en la que la escala temporal depende de la intensidad de los estímulos de movimiento y de la susceptibilidad del individuo. Normalmente, el primer síntoma es malestar epigástrico, seguido de náuseas, palidez y transpiración, y suele ir acompañado de una sensación de calor corporal, aumento de la secreción de saliva y eructos. Si continúa la exposición al movimiento se produce un rápido deterioro del bienestar y aumenta la intensidad de las náuseas, que finalmente desembocan en vómito o arcadas.

Con la exposición continuada o repetida a un determinado movimiento provocador de mareo, la mayoría de los individuos experimentan una reducción de la severidad de los síntomas. Normalmente después de tres o cuatro días de exposición continua se han adaptado al movimiento y pueden realizar sus tareas habituales sin discapacidad. Ahora bien al regresar al entorno familiar



puede que se repitan los síntomas de mareo (mareo del desembarque) hasta que se produzca la readaptación.

La incidencia al mareo en un determinado entorno de movimiento depende de varios factores, en particular:

- Las características físicas del movimiento (su intensidad, frecuencia y dirección de actuación).
- La duración de la exposición.
- La susceptibilidad intrínseca del individuo.
- La tarea que se realiza.
- Otros factores ambientales (por ejemplo, el olor).



CAPÍTULO 4:
PROGRAMAS DE SIMULACIÓN.
ADAMS/RAIL



CAPÍTULO 4. PROGRAMAS DE SIMULACIÓN. ADAMS/RAIL

Un programa de simulación pretende modelar sistemas reales o hipotéticos por ordenador de forma que su funcionamiento puede ser estudiado y así predecir su comportamiento. Los campos en los que se puede usar esta herramienta son muy amplios, ya que un programa de simulación permite la representación de cualquier actividad, proceso y/o fenómenos relacionados con la naturaleza, la ciencia, la técnica, la industria, el comercio, la sociedad, etc. Gracias a la memoria, velocidad del ordenador y a su capacidad de visualizar instantáneamente todo tipo de información, las simulaciones se han extendido a prácticamente la totalidad de los campos [14].

Los procesos y fenómenos simulados constituyen modelos o esquemas tomados de la realidad, pero no deben confundirse con la experimentación directa de los hechos reales ya que siempre existen variables que escapan al contenido del modelo por ser demasiado complejas o de gran volumen. El propósito es utilizar estos programas cuando no sea posible el experimento directo o sea demasiado costoso.

La historia y la evolución de la simulación por ordenador han ido paralelas a la evolución de la informática. Sus orígenes los encontramos en la segunda Guerra Mundial cuando dos matemáticos, J.V. Neumann y S. Ulam, tenían el reto de resolver un problema complejo relacionado con el comportamiento de los neutrones. Los experimentos basados en prueba y error eran muy caros y el problema era demasiado complicado para abordarlo mediante técnicas analíticas. La aproximación que cogieron se basa en la utilización de números aleatorios y distribuciones de probabilidad. El método desarrollado fue llamado "método de Montecarlo" por el paralelismo entre la generación de números aleatorios y el juego de la ruleta.

Durante la Guerra Fría se intensificó el uso de la simulación para resolver problemas de interés militar; trayectorias y dinámicas de satélites artificiales, guiar misiles, etc. Muchos de estos problemas exigen la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales. Para abordar estos problemas se utilizaron ordenadores analógicos que usaban elementos electrónicos para resolver las operaciones matemáticas. La revolución que se

produjo en la informática a partir de los años 80, tiene un impacto importante en la simulación por ordenador [15].

Finalmente, en los últimos años, el uso de la simulación se ha ampliado al sector del ocio y ha entrado en el ámbito familiar con productos de software sofisticados, que utilizan todos los recursos del ordenador.

A continuación se va a describir el paquete de simulación ferroviaria que ha sido utilizado en el proyecto para realizar las simulaciones con el fin de obtener el nivel de confort en curva de un tren.

4.1 MSC. Adams

El paquete de simulación ADAMS (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) es un software para simulación dinámica de sistemas mecánicos que por medio de la implementación de herramientas numéricas ofrece una gran variedad de elementos que sirven para modelar casi cualquier sistema mecánico para después estudiar y prever su comportamiento. La más importante característica de ADAMS es que permite entrar a programar en él y acomodarlo a las necesidades de cada usuario [16].

El paquete MSC. Adams es propiedad de la compañía MSC Software, la cual desarrolla su actividad a nivel mundial en el campo de la simulación por ordenador gracias a sus soluciones VPD, Virtual Product Development. Su software y servicios de consultoría, proporcionan ayuda en el desarrollo de productos, ya que la posibilidad de modelar y testar prototipos, permite a los fabricantes de los más sofisticados productos del sector aeroespacial, automoción y demás sectores industriales, reducir los costes y el tiempo de fabricación, lo que se traduce en un incremento de los beneficios de estas empresas de fabricación [17].

El paquete de simulación se divide en diferentes módulos de forma que permite particularizar de un modo más exacto el tipo de simulación que se desea desarrollar. Los módulos que contiene la versión 2005 son: Aircraft, Car, Car Realtime, Chassis, Driveline, Engine, Flex, Insight, PostProcessor, Rail, Solver y View. A continuación se va a realizar una pequeña descripción de los módulos que han tenido una mayor importancia en la realización de este proyecto.

4.1.1 Adams/Solver

Este módulo es el encargado de todos los cálculos necesarios para el análisis numérico, además de formular las ecuaciones que rigen el movimiento del sistema. Este módulo es usado por el resto de módulos para resolver las simulaciones. ADAMS/Solver presenta cinco tipos de análisis, dependiendo de las necesidades del usuario [18]:

- Análisis cinemático: Calcula la posición, velocidad y aceleración de cada cuerpo rígido para un número finito de pasos. En este análisis de movimiento el mecanismo debe de tener cero grados de libertad.
- Análisis de equilibrio estático: No se tienen en cuenta ni velocidades ni aceleraciones del sistema, sino solamente que el sistema esté en equilibrio dadas unas fuerzas externas incluyendo el peso a cada paso de la simulación.
- Análisis cuasi-estático: Verifica el movimiento y en cada intervalo de tiempo realiza un análisis de equilibrio estático.
- Análisis dinámico: Consiste en obtener para cada intervalo los desplazamientos, velocidades, aceleraciones y fuerzas (tanto internas como externas). Para este análisis, ADAMS/Solver utiliza gran parte de su potencia calculando la solución de los sistemas de ecuaciones diferenciales y algebraicas. Este análisis requiere que el mecanismo tenga uno o más grados de libertad.
- Análisis general: Hace un análisis cinemático si el mecanismo tiene cero grados de libertad o de lo contrario realiza un análisis dinámico.

4.1.2 Adams/PostProcessor

Este módulo es el encargado de mostrar en pantalla los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en los otros módulos, además permite trabajar con dichos resultados. Es importante saber manejar este software ya que con los datos obtenidos aquí podremos calcular las aceleraciones necesarias para obtener los índices de confort [19]. En la figura 4.1 se muestra la pantalla principal del módulo post-procesador:

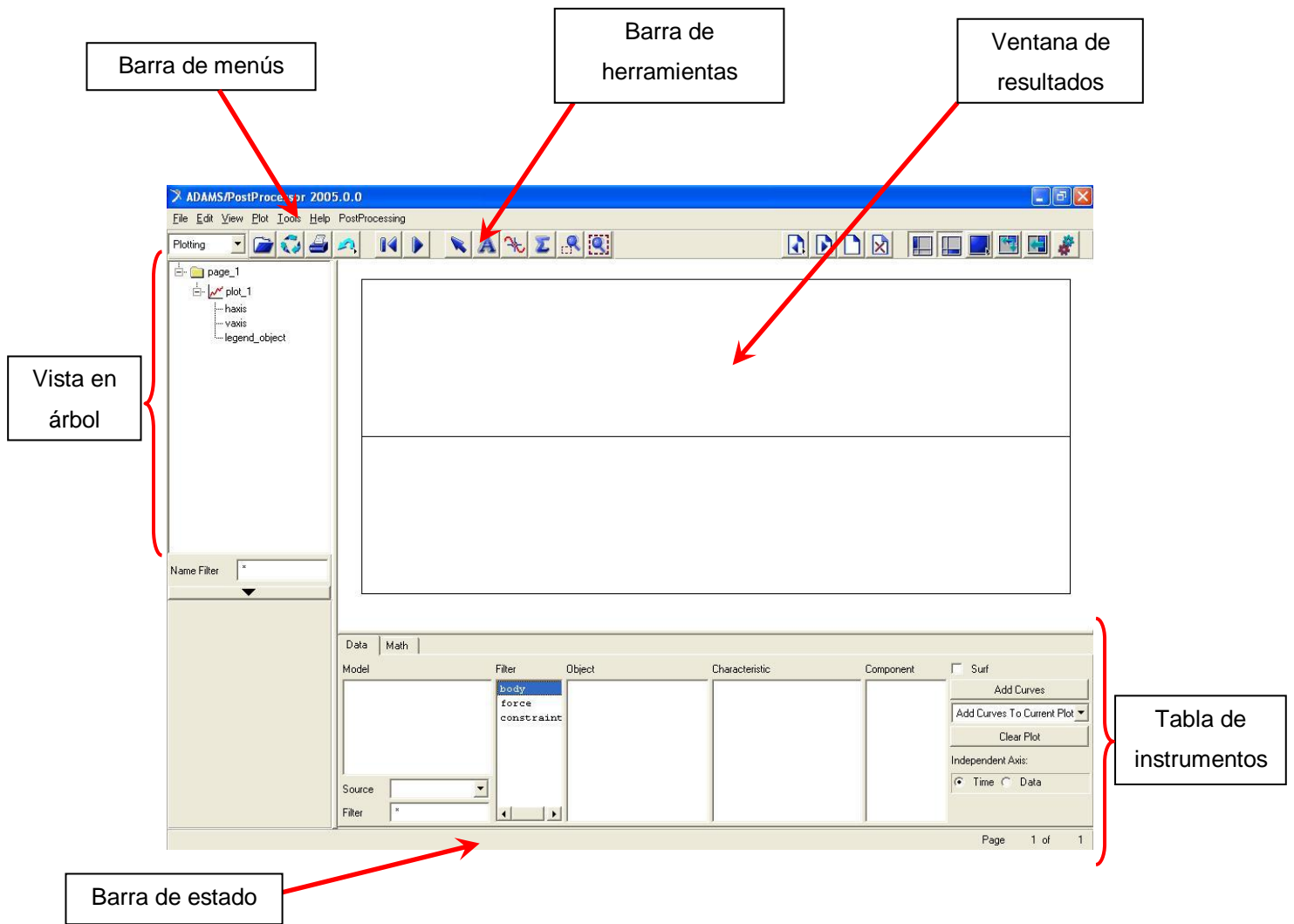


Figura 4.1. Pantalla principal
Adams/PostProcessor.

De forma general, Adams/Postprocessor permite:

- Depuración: Adams/Postprocessor permite depurar el modelo, permitiendo ver el prototipo en marcha, o las deformaciones del mismo en el caso del uso de elementos flexibles.
- Validación: Mediante Adams/Postprocessor, se pueden validar los resultados, ya que permite realizar operaciones matemáticas sobre ellos, así como diferentes análisis estadísticos.
- Mejora: Permite comparar gráficamente las soluciones de dos o más simulaciones, facilitando la mejora del modelo estudiado.
- Presentación de resultados: Se trata de una herramienta adecuada para la elaboración de los informes oportunos, e incluso permite realizar películas de las animaciones del prototipo virtual.

4.2 Adams/Rail

El módulo de Adams denominado Adams/Rail es el que está especializado en el análisis de vehículos ferroviarios completos. Este programa de simulación, por tanto, permite a sus usuarios el estudio y la optimización de cualquier modelo de vehículo ferroviario antes de realizar ningún análisis real con el consiguiente ahorro económico y temporal.

Los análisis que se pueden realizar con este programa son análisis cinemáticos, estáticos, dinámicos y de estabilidad, lo que permite al usuario determinar la estabilidad del vehículo, obtener niveles de confort de los pasajeros, minimizar las causas de descarrilamiento, calcular las cargas a las que está sometida la vía, etcétera [20].

Para crear un modelo en Adams/Rail se tiene que ensamblar los denominados subsistemas, bogies y caja, para crear un conjunto (vehículo ferroviario completo). Dichos subsistemas pueden ser creados por el propio usuario, en el modo *Template builder*, o se pueden utilizar plantillas predefinidas y almacenadas en la biblioteca del programa usando el modo *Standard interface*. Esta última opción es la más sencilla y por lo tanto más utilizada por usuarios inexpertos o para análisis de modelos de no muy alta complejidad. Al denominado conjunto es al que se le realizan los diferentes análisis para la obtención de los datos.

Por consiguiente, Adams/Rail constituye una herramienta apropiada para estudiar y entender el comportamiento del modelo, facilitando el cambio de las propiedades de los diferentes componentes que lo constituye, buscando de esta manera, la mejor solución posible. Por lo tanto, Adams/Rail permite de manera general:

- Mejorar el diseño antes de la construcción del prototipo físico.
- Analizar los cambios en el diseño de manera más rápida y a un menor coste que mediante el uso de modelos reales.
- Realizar una gran variedad de análisis, de manera mucho más fácil que modificando la instrumentación necesaria en un test con prototipos reales.

Para llevar a cabo la construcción de un prototipo virtual, es necesario usar una serie de archivos localizados en la base de datos del programa, los cuales son los subsistemas, conjuntos o ensamblajes, archivos de propiedades, plantillas, banco de pruebas y comunicadores.

4.2.1 Subsistemas

Los subsistemas son cada una de las partes en las que se divide el vehículo completo. Los bogies y la caja donde viajan los pasajeros son ejemplos de subsistemas.

Cuando se crea un nuevo subsistema, éste se hace con referencia a una plantilla. Adams/Rail tiene una serie de plantillas ya definidas de las cuales se pueden crear los subsistemas, pero además se pueden crear plantillas nuevas, esto último depende del modo con el que arranques el programa:

- **Standard interface:** En este modo es en el que se crean los subsistemas a partir de las plantillas almacenadas en la biblioteca del programa o las plantillas creadas por el usuario. Al crear un subsistema, el programa permite modificar algunas de las propiedades de los elementos que lo componen como la rigidez de los resortes o los coeficientes de amortiguamiento de los diferentes amortiguadores. Además permite cambiar la orientación y la posición de los componentes que forman el subsistema.
- **Template builder:** Si se arranca el programa en este modo, el programa permite la creación de plantillas de las cuales se podrá hacer el subsistema. Con este modo se logra diseñar cualquier elemento con las características que desee el usuario, ya sea cambiar las propiedades y la posición de los elementos (esto también lo permite el otro modo) como definir las dimensiones de cualquier tipo de elemento (exclusivo de este modo). Una vez creada la plantilla requerida, se tendrá que volver al modo Standard interface para poder crear el subsistema correspondiente.

En la figura 4.2 se representa un ejemplo de un subsistema creado en Adams/Rail, más específicamente, un bogie delantero:

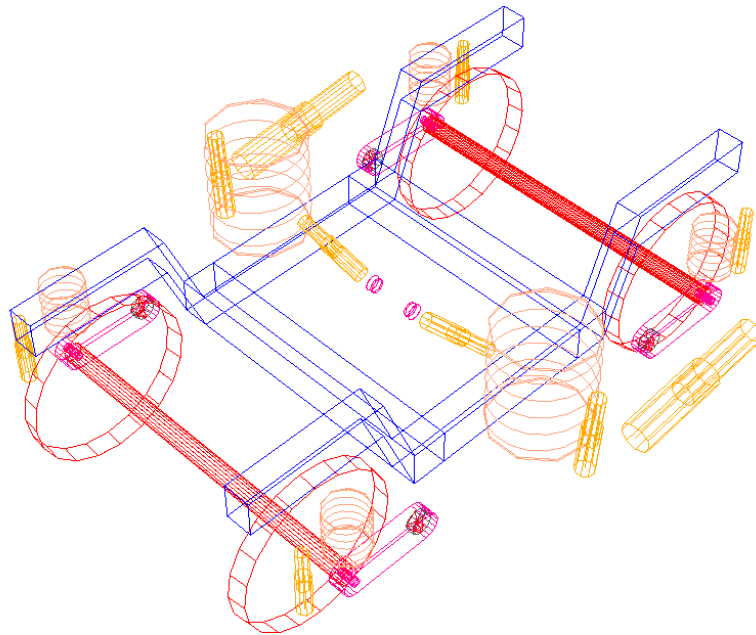


Figura 4.2. Ejemplo subsistema, bogie delantero.

Los subsistemas contienen la descripción de los diferentes componentes que lo definen. Estas descripciones proporcionan la siguiente información [21]:

- Datos de diseño: Como pueden ser los radios de las ruedas, los ángulos que definen la pestaña, localización de diferentes puntos en el subsistema, etc.
- Referencia a los archivos de propiedades: Estos archivos contienen los datos de diseño de los diferentes componentes que constituyen el subsistema, como por ejemplo, la rigidez de los resortes y las características de la amortiguación.
- Referencia a la plantilla que define la construcción del subsistema: En donde se incluyen los diferentes tipos de piezas que lo componen y como las partes se unen e interactúan unas con otras.

4.2.2 Conjunto o ensamblaje

Los ensamblajes se componen de una serie de subsistemas junto a un *test rig*. Una vez formado un ensamblaje es posible realizar los análisis correspondientes al modelo ensamblado.

Los diferentes análisis que se pueden realizar sobre un conjunto se describen a continuación:

- *Análisis de precarga*: Este análisis calcula las fuerzas de precarga en la suspensión del vehículo. Se utiliza el cálculo de las fuerzas de precarga para asegurarse de que la configuración del modelo de vehículo, después de la ejecución del análisis estático, es igual a la configuración de diseño. ADAMS/Rail calcula las fuerzas de precarga de acuerdo con la distribución de las masas del vehículo y automáticamente las aplica a las suspensiones.
- *Análisis lineal*: Se utiliza este tipo de análisis para obtener los autovalores del modelo ferroviario. Para realizar el análisis ADAMS/Rail impide el movimiento temporalmente de los ejes y las ruedas fijándolos al suelo con apoyos fijos. Una vez terminado el cálculo se pueden obtener los resultados en una tabla, mostrarlos en gráficas o realizar una animación donde se observa el movimiento del tren.
- *Análisis de estabilidad*: El análisis de estabilidad de bucle abierto o cerrado se utiliza para estudiar la estabilidad del modelo ferroviario en función de la velocidad del vehículo y diferentes las configuraciones de contacto rueda/raíl. Esta información ayuda a determinar la velocidad crítica del vehículo. Para todos los análisis de estabilidad, se puede visualizar y revisar los modos de vehículo en las diferentes configuraciones. Después de ejecutar un análisis de estabilidad, puede utilizar el kit de herramientas del mismo para generar automáticamente las gráficas.
- *Análisis dinámico*: Este análisis sirve para estudiar el comportamiento del vagón en movimiento. Se puede calcular el nivel de confort, las posibles causas de descarrilamiento y comportamiento del vehículo al paso por curva en función de la vía y del tipo de contacto utilizado.

En la figura 4.3 se representa un ejemplo de un conjunto o ensamblaje de un vagón realizado en ADAMS/Rail.

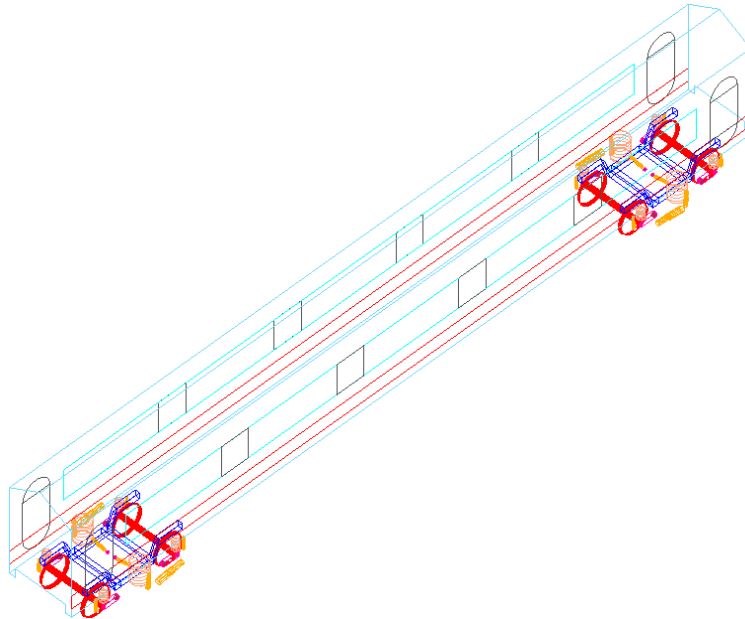


Figura 4.3. Ejemplo conjunto, vehículo ferroviario.

4.2.3 Archivos de propiedades

Estos archivos se basan en ASCII, y contienen los datos para el modelado de los diferentes componentes de vehículo.

Dichos archivos pueden ser creados y modificados mediante cualquier editor de texto, y se utilizan para:

- Aplicar las mismas características o parámetros para muchos componentes dentro de una plantilla o subsistema.
- Compartir un componente entre diferentes plantillas y subsistemas.

4.2.4 Plantillas

Son modelos paramétricos, contruidos por usuarios expertos en el generador de plantillas (Template builder). En estas plantillas es donde se recogen tanto los datos geométricos como los topológicos de los elementos a modelar. En la figura 4.4 se muestra un ejemplo de una plantilla en ADAMS/Rail:

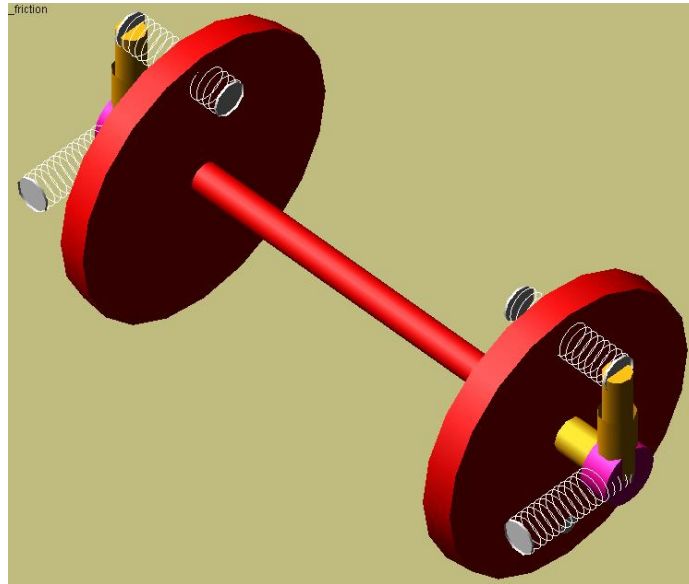


Figura 4.4. Ejemplo plantilla.

4.2.5 Bancos de prueba

Permiten ampliar la funcionalidad de las plantillas. Los bancos de pruebas son similares a las plantillas, la diferencia básica es que, además, éstos contienen diferentes partes que son unidas mediante diferentes accesorios o fuerzas. A parte de eso, los bancos de pruebas pueden contener elementos de accionamiento que proporcionan movimientos o fuerzas, excitando así el conjunto o ensamblaje.

4.2.6 Comunicadores

Estos elementos permiten el intercambio de información entre los subsistemas, plantillas o bancos de pruebas en el ensamblaje.

Un ensamblaje o conjunto requiere la transferencia de la información en dos direcciones, dando lugar a dos tipos de comunicadores:

- Comunicadores de entrada: Solicitan la información a otros subsistemas o bancos de prueba.
- Comunicadores de salida: Proporcionan la información necesaria al resto de subsistemas o bancos de prueba.



CAPÍTULO 5: **MODELO DE VÍA Y TREN**

CAPÍTULO 5. MODELO DE VÍA Y TREN

En el capítulo número 5 de este proyecto, se van a describir, de una manera detallada, los modelos de vía y de tren que van a ser utilizados a la hora de realizar las diferentes simulaciones para alcanzar los objetivos previstos.

Para conseguir dichos objetivos, se van a utilizar en las simulaciones diferentes tipos de trazados por los que circulará el tren, que a su vez podrá estar compuesto de uno o dos vagones.

5.1 Modelo de vía

Para realizar las diferentes simulaciones, se van a tener que crear varios archivos, los cuales representan las características propias de la vía. Dichas características como son el trazado, la longitud entre vías, la forma del perfil, etc. se van a poder modificar con la herramienta *Curve manager* del programa Adams/Rail.

Todos los modelos de vía que van a ser utilizados en las simulaciones tienen una serie de características en común (Ver tabla 5.1).

Características	Valor o descripción
Longitud total	500 m
Aplicación de peralte	Lowrail o interior del raíl
Sección vertical de la vía	Vía dispuesta totalmente horizontal
Ángulo de peraltado	0.1 rad a partir de 100 m
Distancia nominal entre raíles	1.435 m
Distancia entre la cima del raíl y el punto donde se mide la distancia nominal entre raíles	0.014 m
Inclinación del perfil respecto de la vía	0.025 rad
Módulo de Young de los raíles	210 GPa
Coefficiente de Poisson de los raíles	0.27

Tabla 5.1. Características en común de la vía

El perfil de los raíles también va a ser común a todas las simulaciones. En la figura 5.1 se observa el perfil del carril derecho obtenido mediante la herramienta *Curve manager*. Ambos perfiles, tanto el izquierdo como el derecho son exactamente iguales manteniendo la simetría entre ellos.

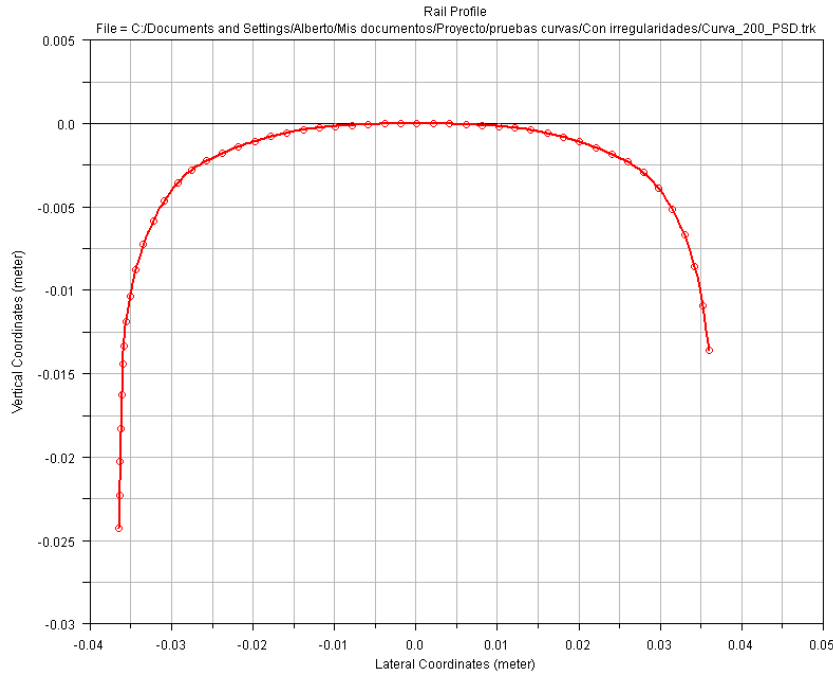


Figura 5.1. Perfil del raíl derecho.

Las simulaciones se van a realizar sobre 4 tipos de trazado diferentes, cada uno de ellos con una configuración y características diferentes. Las propiedades que van a distinguir unos trazados de otros son los radios de curvatura, siendo estos radios de curvatura de 200, 300, 400 y 500 metros.

Para ello se han creado 4 archivos tipo *.trk* (extensión que Adams utiliza para designar a los archivos con las propiedades de la vía), en los cuales se ha modificado su contenido para obtener los diferentes trazados requeridos para la realización de las simulaciones.

En la figura 5.2 se muestran los diferentes trazados con radios de curvaturas de 200, 300, 400 y 500 metros respectivamente.

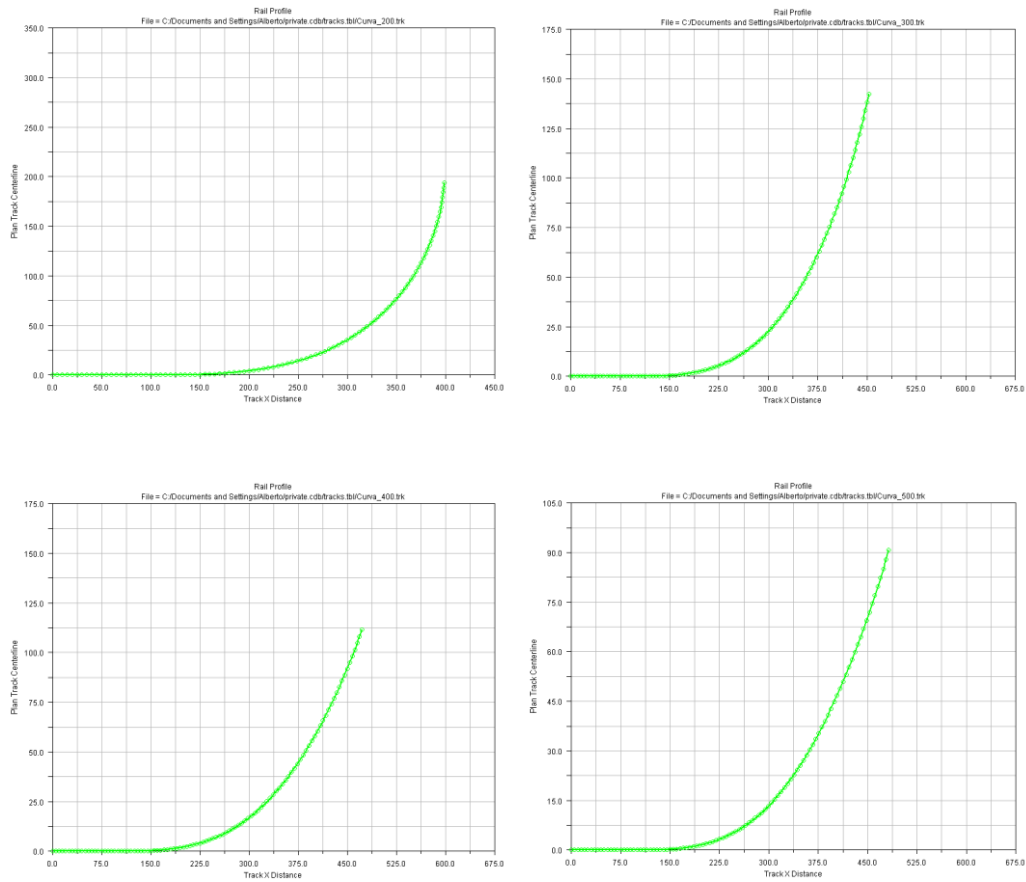


Figura 5.2. Trazados de vía. Radios de curvatura de 200, 300, 400 y 500 m.

Como se muestra en las imágenes anteriores, todos los trazados tienen un tramo recto hasta aproximadamente los 100 metros, después una zona de transición recta-curva para más tarde llegar a la propia curva con su respectivo radio de curvatura.

5.2 Modelo de tren

Una vez definidos los tipos de vías que se van a utilizar en las simulaciones, queda detallar el modelo de tren que va a ser usado en dichas simulaciones.

Adams/Rail posee una base de datos con diferentes tipos de trenes, de los cuales sólo uno es el objeto de las simulaciones. En este proyecto se utiliza el conjunto o ensamblaje denominado por Adams como *ERRI WAGON*.

El término ERRI viene de las iniciales del Instituto Europeo de Investigación Ferroviaria (en inglés European Rail Research Institute). Este centro de investigación, se creó a partir de la UIC (Unión Internacional de Ferrocarriles) en 1990, con motivo del desarrollo de un proyecto con el cual se pretendía la unificación en los sistemas de control, señalización y comunicación en todas las redes de ferrocarriles en Europa. En la actualidad este organismo ha cesado su trabajo [22].

Este instituto creó un prototipo virtual de vehículo moderno de pasajeros para que se realizaran análisis mediante ordenadores y programas de simulación. Cada vagón del *ERRI WAGON* está compuesto por un bogie delantero, un bogie trasero y un cuerpo o caja situado sobre dichos bogies. En la figura 5.4 se refleja la disposición acotada de los bogies y la caja.

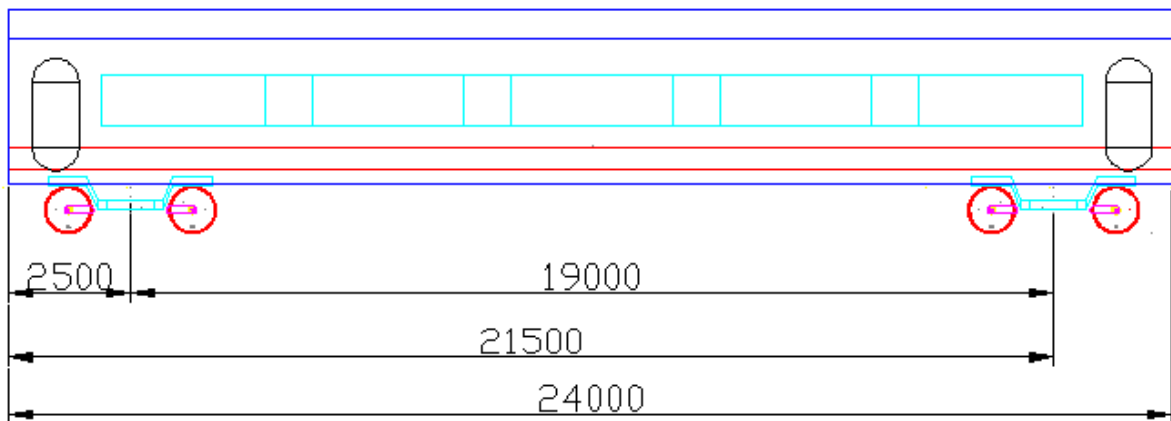


Figura 5.3. Disposición acotada de los bogies medido en milímetros.

A continuación se van a detallar las características y las propiedades de los bogies y de la caja que forman el modelo de tren objeto de las simulaciones.

5.2.1 Características del bogie delantero

El ERRI bogie cuenta con una serie de elementos que son un bastidor, dos ejes con dos ruedas cada uno, una caja de grasa por cada rueda, una suspensión primaria y una suspensión secundaria. Estos elementos están indicados en la figura 5.5.

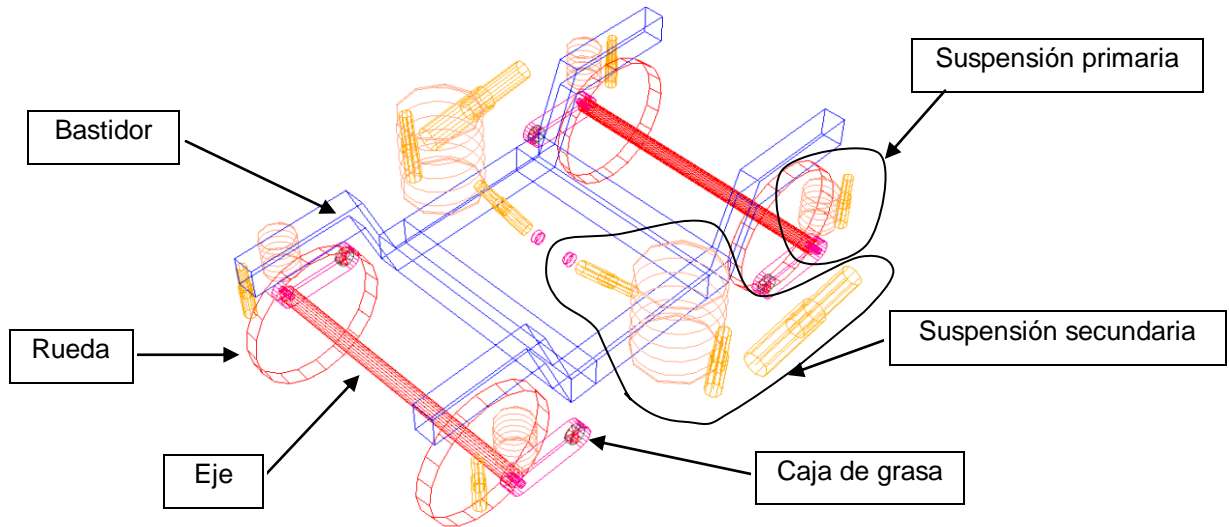


Figura 5.4. ERRI bogie y sus elementos.

En la tabla 5.2 se describen las características físicas del bogie delantero.

Elemento	Masa (kg)	I_{xx} (kg·m ²)	I_{yy} (kg·m ²)	I_{zz} (kg·m ²)
Bastidor	2615	1722	1476	3067
Caja de grasa	155	2.1	5.6	5.6
Eje y rueda	1503	810	810	112

Tabla 5.2. Propiedades físicas del bogie.

Es importante definir las características geométricas del bogie y las precargas a las que están sometidas las suspensiones, tanto la primaria como la secundaria. En la tabla 5.3 se recogen estas características.

Característica	Valor	Precarga	Valor
Distancia entre ejes	2,56 metros	Suspensión primaria lado derecho	48689.9 N
Distancia entre ruedas	1,5 metros	Suspensión primaria lado izquierdo	44767.5 N
Radio de la rueda	0,46 metros	Suspensión secundaria lado derecho	84021.9 N
Longitud de eje	2 metros	Suspensión secundaria lado izquierdo	76177.1 N

Tabla 5.3. Propiedades geométricas y precargas.

Como ya se descrito anteriormente, el ERRI bogie posee suspensión primaria y suspensión secundaria. La primera de ellas, cuya función es filtrar las vibraciones que se generan por el contacto entre la rueda y la vía, es un conjunto de cuatro resortes con cuatro amortiguadores, uno por cada rueda. Estos resortes están fijados por un lado a la caja de grasa y por el otro al bastidor del bogie. Se recuerda que la caja de grasa esta unida al eje mediante rodamientos por lo que las vibraciones que se generan a la hora de circular entre la vía y las ruedas se transmiten a la caja de grasa, de ahí que se sitúe esta suspensión en esa localización. En la tabla 5.4 se detallan la rigidez del muelle de la suspensión primaria en todas las direcciones.

	Rigidez axial (N/m)	Rigidez torsional (N·m/rad)
X	617000	127
Y	617000	127
Z	732000	0

Tabla 5.4. Rigidez suspensión primaria.

La suspensión secundaria, que es la encargada de filtrar las vibraciones que se transmiten entre el bastidor del bogie y la caja donde viajan los pasajeros, posee las características de rigidez que se reflejan en la tabla 5.5.

	Rigidez axial (N/m)	Rigidez torsional (N·m/rad)
X	160000	183.3
Y	160000	183.3
Z	430000	0

Tabla 5.5. Rigidez suspensión secundaria.

La suspensión primaria tiene un amortiguador por cada resorte, el cual presenta unas características de fuerza frente a velocidad representadas en la figura 5.6.

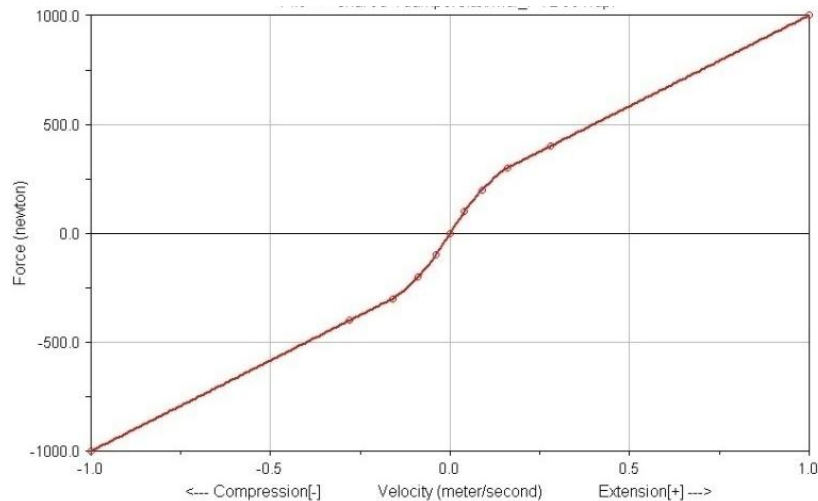


Figura 5.5. Fuerza vs velocidad amortiguador suspensión primaria.

Para el caso de la suspensión secundaria ocurre que a cada lado del bogie existen tres amortiguadores, los cuales vamos a denominar como amortiguador A, B y C que corresponden según se muestra en la figura 5.7.

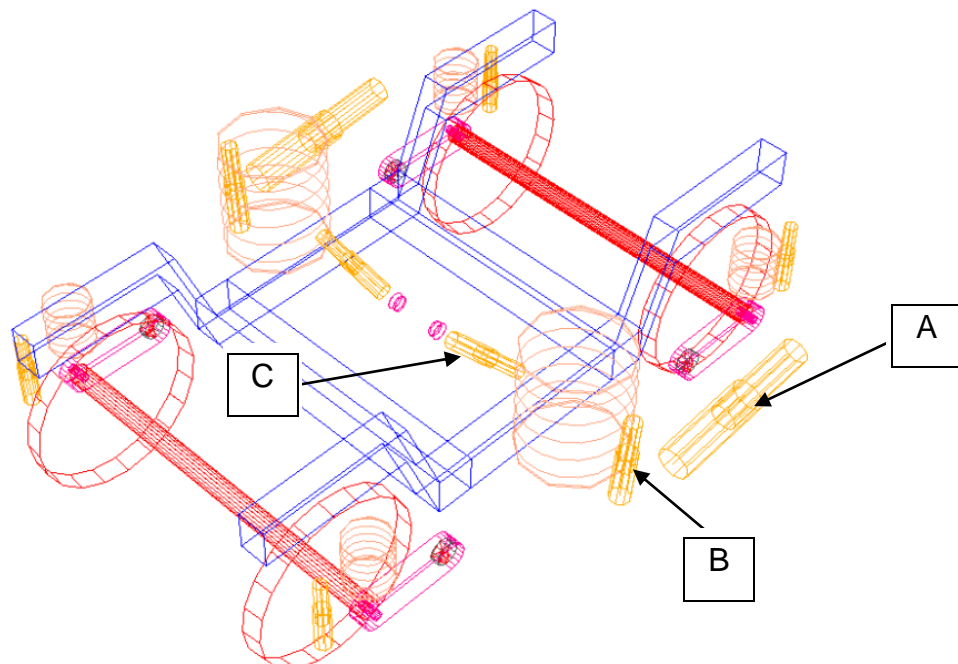


Figura 5.6. Denominación amortiguadores suspensión secundaria.

A continuación se va a detallar el comportamiento de cada amortiguador mediante su gráfica de fuerza frente a velocidad, representadas en la figura 5.8.

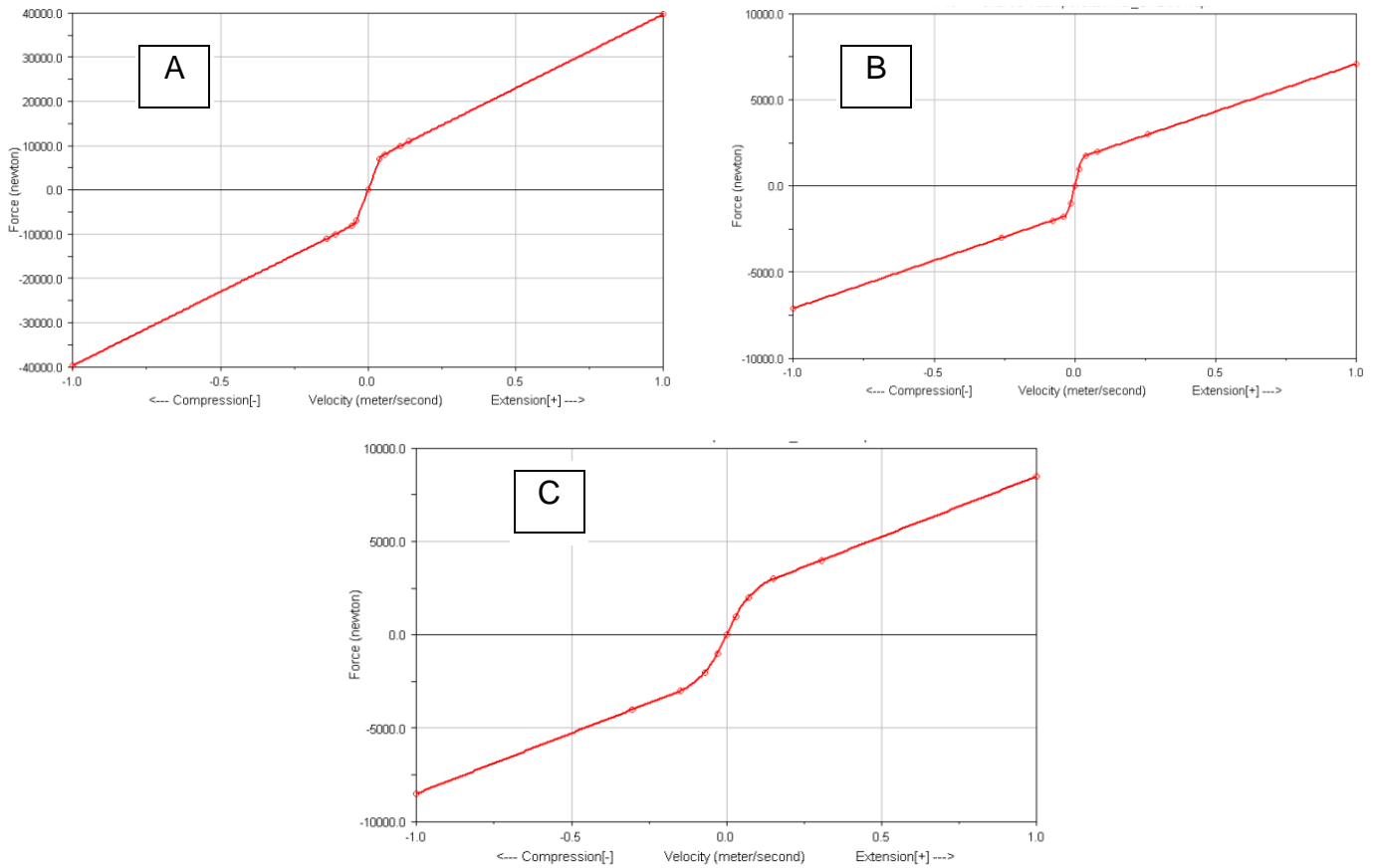


Figura 5.7. Fuerza vs velocidad amortiguadores suspensión secundaria.

Para definir completamente al bogie solo falta especificar el perfil de la rueda que se utiliza para las simulaciones. En la figura 5.9 se representa dicho perfil además de su derivada.

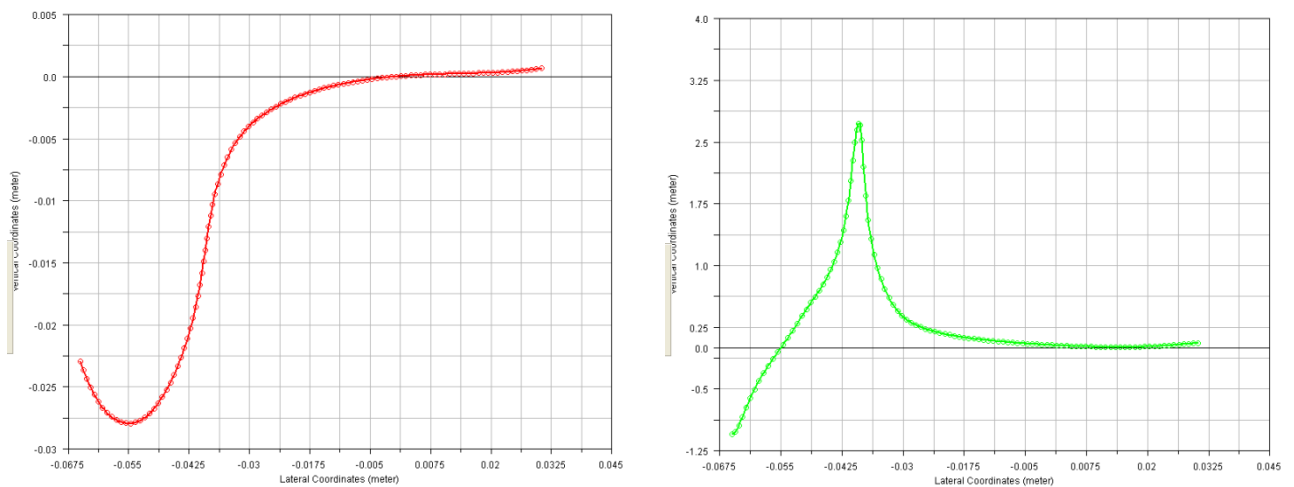


Figura 5.8. Perfil de la rueda y su derivada.

5.2.2 Características del bogie trasero

Tanto el bogie delantero como el trasero son, como cabe esperar, el mismo tipo de bogie, las diferencias radican en la posición y orientación de un amortiguador de la suspensión secundaria (denominado anteriormente como A) y en las precargas a las que están sometidos los resortes de ambas suspensiones. En la figura 5.10 se observa las diferentes posiciones del amortiguador dependiendo de si es el bogie trasero o delantero.

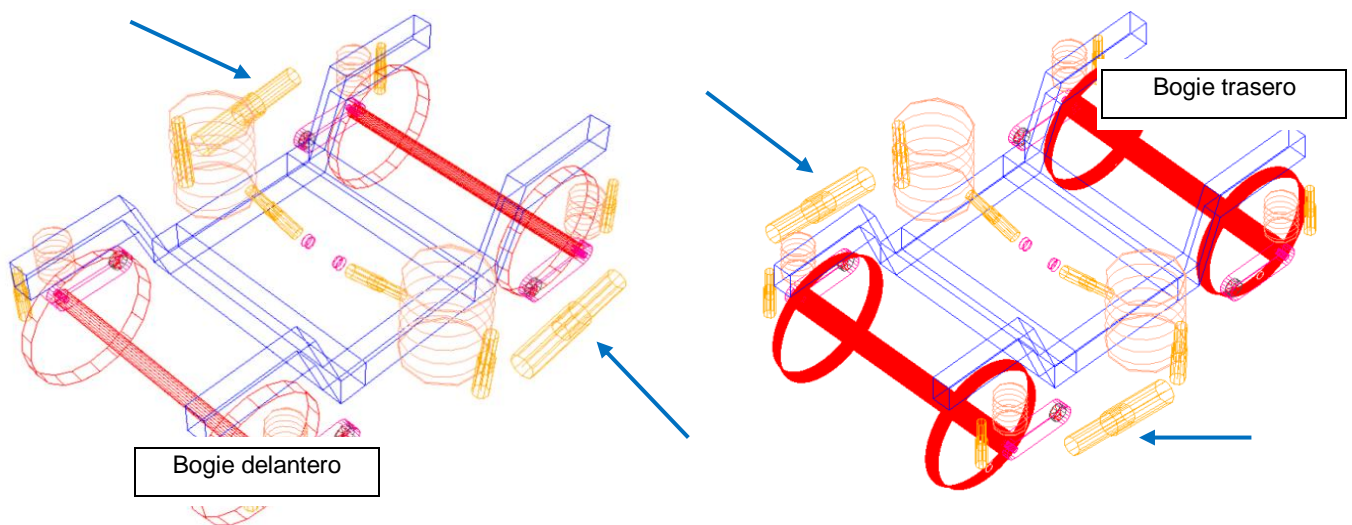


Figura 5.9. Cambio de posición de amortiguador en bogie delantero/trasero.

En lo referente a las precargas a las que están sometidos los resortes, tanto de la suspensión primaria como de la secundaria, se va a detallar, en la tabla 5.6, los valores de dichas precargas.

	Precarga (N)
Suspensión primaria lado derecho	47038.4
Suspensión primaria lado izquierdo	43116
Suspensión secundaria lado derecho	80718.8
Suspensión secundaria lado izquierdo	72874

Tabla 5.6. Precargas suspensión bogie trasero.

5.2.3 Características de la caja o cuerpo

La caja es el compartimento cerrado donde se encuentran los equipos necesarios para alojar en él a los pasajeros y la carga. La caja se apoya sobre los ejes o bogies mediante los elementos de la suspensión secundaria. En la tabla 5.7 y 5.8 se detallan las características físicas y geométricas de la caja utilizada en las simulaciones.

Elemento	Masa (kg)	I_{xx} (kg·m ²)	I_{yy} (kg·m ²)	I_{zz} (kg·m ²)
Caja o cuerpo	32000	56800	1970000	1970000

Tabla 5.7. Características físicas de la caja.

	Valor
Longitud	24 m
Ancho	2.2 m
Altura	3 m

Tabla 5.8. Características geométricas de la caja.

En la figura 5.10 se muestra la imagen de la caja del tren utilizado en las diferentes simulaciones.

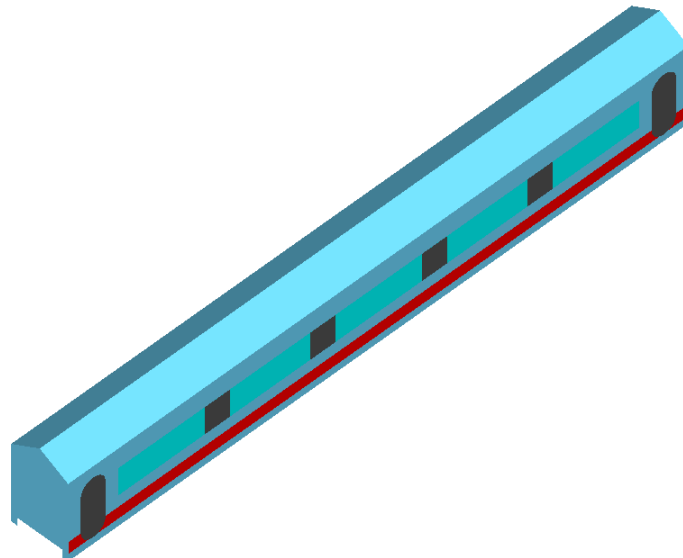


Figura 5.10. Caja del vagón tipo ERRI representado en Adams/Rail.



CAPÍTULO 6: **RESULTADOS DE LAS** **SIMULACIONES**

CAPÍTULO 6. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES

En este capítulo se muestran las gráficas obtenidas mediante Adams/Rail para el cálculo de los niveles de confort en curva, tanto del método de Sperling como el procedimiento reflejado en la normativa empleada por la Unión Internacional de Ferrocarriles.

Este capítulo se estructura para un mayor entendimiento, en dos grandes grupos, las simulaciones para un vagón y las simulaciones para trenes con 2 vagones. Para cada grupo se han realizado las simulaciones con los cuatro tipos de trazados diferentes, es decir, variando el radio de curvatura desde 200 metros hasta 500 metros. Por último, para cada trazado se realizan las simulaciones variando la velocidad de inicio de los trenes para, de este modo, conseguir reflejar el comportamiento de un tren en las condiciones de circulación que se habían descrito.

6.1 Simulaciones para un vagón

Se han realizado un total de 26 simulaciones para un tren de un solo vagón. En cada simulación se muestran las gráficas de las aceleraciones en sus tres direcciones además de las dos gráficas correspondientes a los índices de confort de Sperling y de la UIC, por tanto un total de cinco gráficas por simulación. Las velocidades comienzan en 15 m/s y va aumentando de 5 en 5 m/s, hasta que se alcance la condición descarrilamiento o se supere la escala máxima en alguno de los dos índices de confort. En la figura 6.1 se muestra una imagen de la simulación realizada mediante Adams/Rail para un vagón.

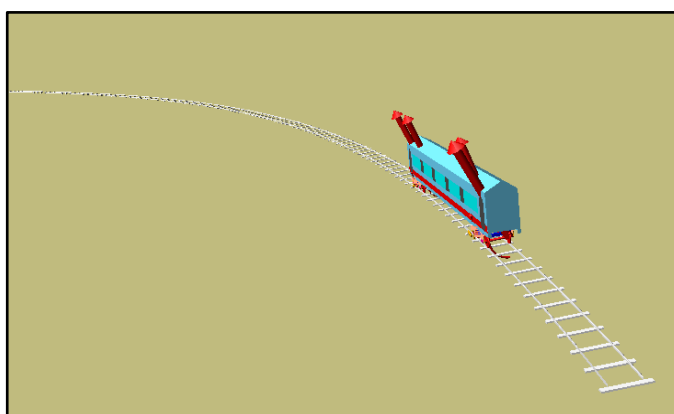


Figura 6.1. Simulación en Adams/Rail de un vagón.

6.1.1 Curva con 200 metros de radio

6.1.1.1 Velocidad de 15 m/s

En la figura 6.2 se muestra como la aceleración longitudinal tiene valores negativos (va frenando) con un valor máximo de -1 m/s^2 . La aceleración lateral tiene su máximo poco después de comenzar la curva con un valor de aproximadamente 0.9 m/s^2 . La aceleración vertical tiene valores más pequeños que los anteriores y se producen al principio de la simulación. El índice de confort de Sperling muestra un valor de 1.44 y el índice desarrollado por la UIC tiene un valor de 0.82.

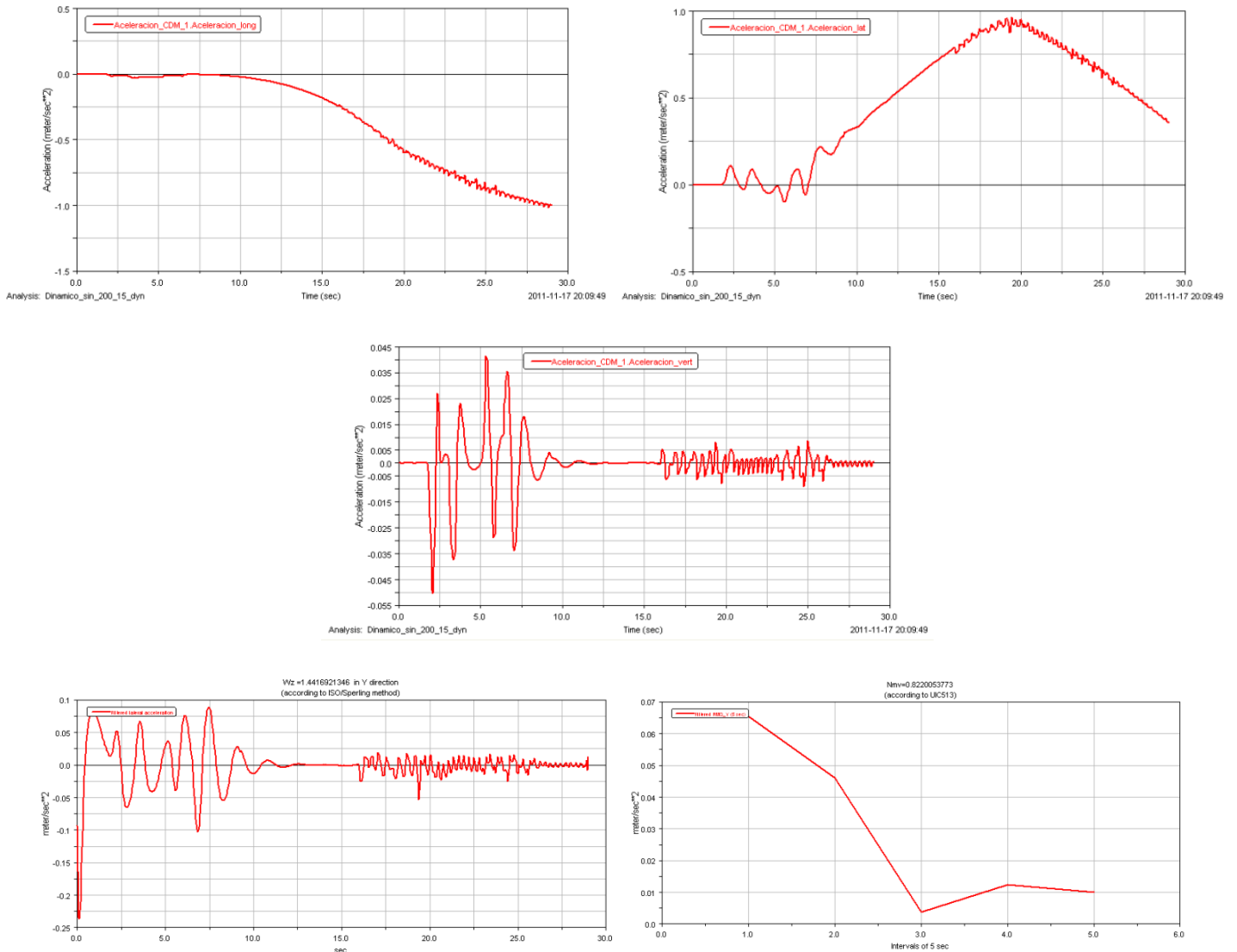


Figura 6.2. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 15 para 1 vagón.

6.1.1.2 Velocidad de 20 m/s

En las aceleraciones se observa que, en este caso, la línea es más regular que en el caso anterior pero con valores máximos más altos. Se obtiene por tanto, para las aceleraciones unos de valores de: -1.95 m/s^2 para la longitudinal, de 1.7 m/s^2 para la lateral y de 0.07 m/s^2 para la vertical. Para los dos índices de confort se obtiene un valor de 1.54 (Ver figura 6.3.).

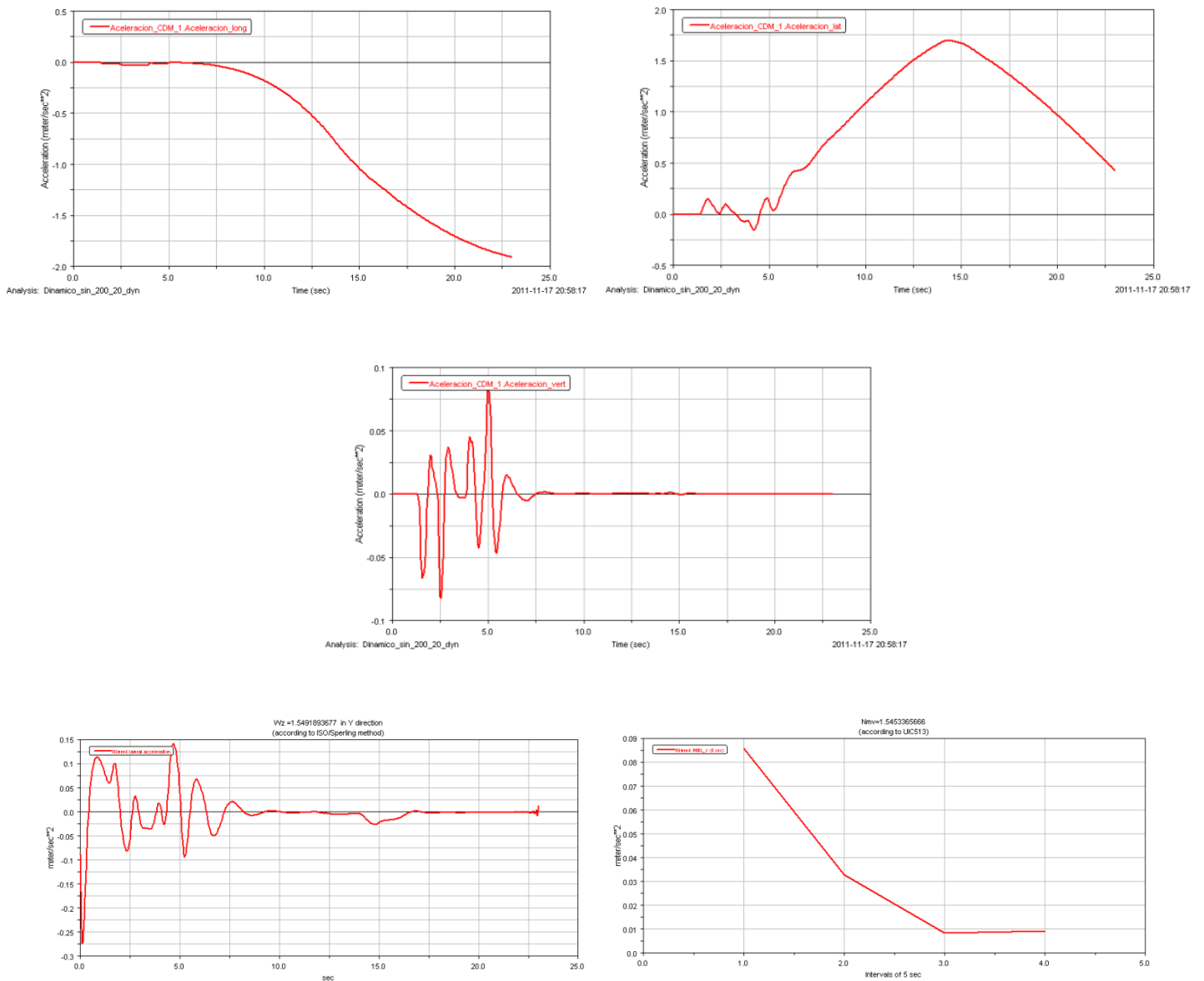


Figura 6.3. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 20 para 1 vagón.

6.1.1.3 Velocidad de 25 m/s

Para esta velocidad los valores máximos alcanzados para las aceleraciones longitudinal, lateral y vertical son, respectivamente de, -3 m/s^2 , 2.7 m/s^2 y 0.112 m/s^2 . Con referencia a los índices de confort se puede decir que aumentan de valor con respecto a los casos anteriores, en los que la velocidad es menor, alcanzando un valor de 1.87 para Sperling y un valor de 2.58 para UIC (Ver figura 6.4).

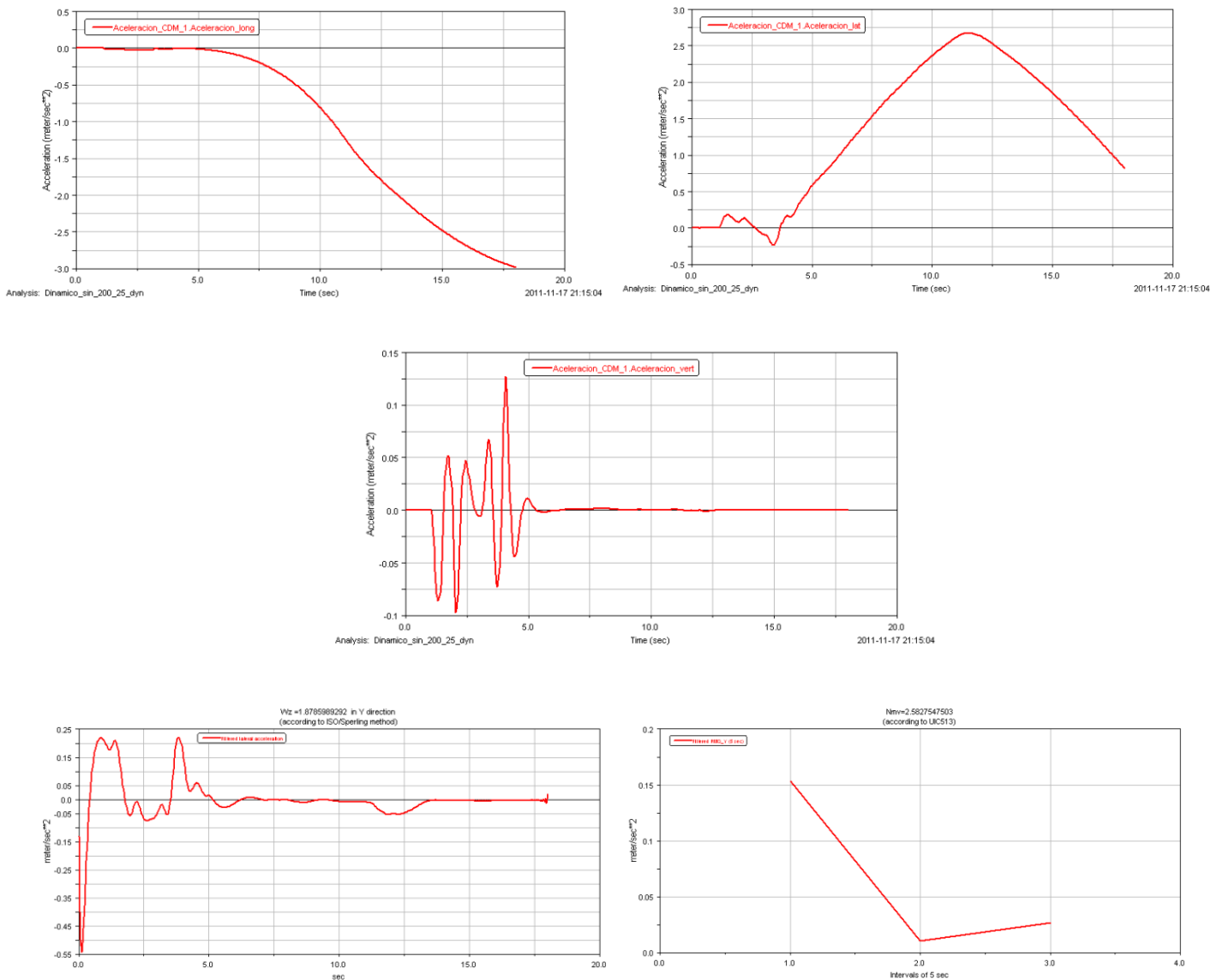


Figura 6.4. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 25 para 1 vagón.

6.1.1.4 Velocidad de 30 m/s

En este caso en concreto, ocurre que el tren descarrila en mitad de la curva. La simulación se para antes de recorrer la longitud total de la vía y el programa indica que la condición de descarrilamiento ha sido superada. Aún así se van a mostrar las gráficas de lo que ocurre hasta el momento del descarrilamiento. En la figura 6.5 se ve como las aceleraciones se vuelven inestables cuando se acercan al punto del descarrilamiento.

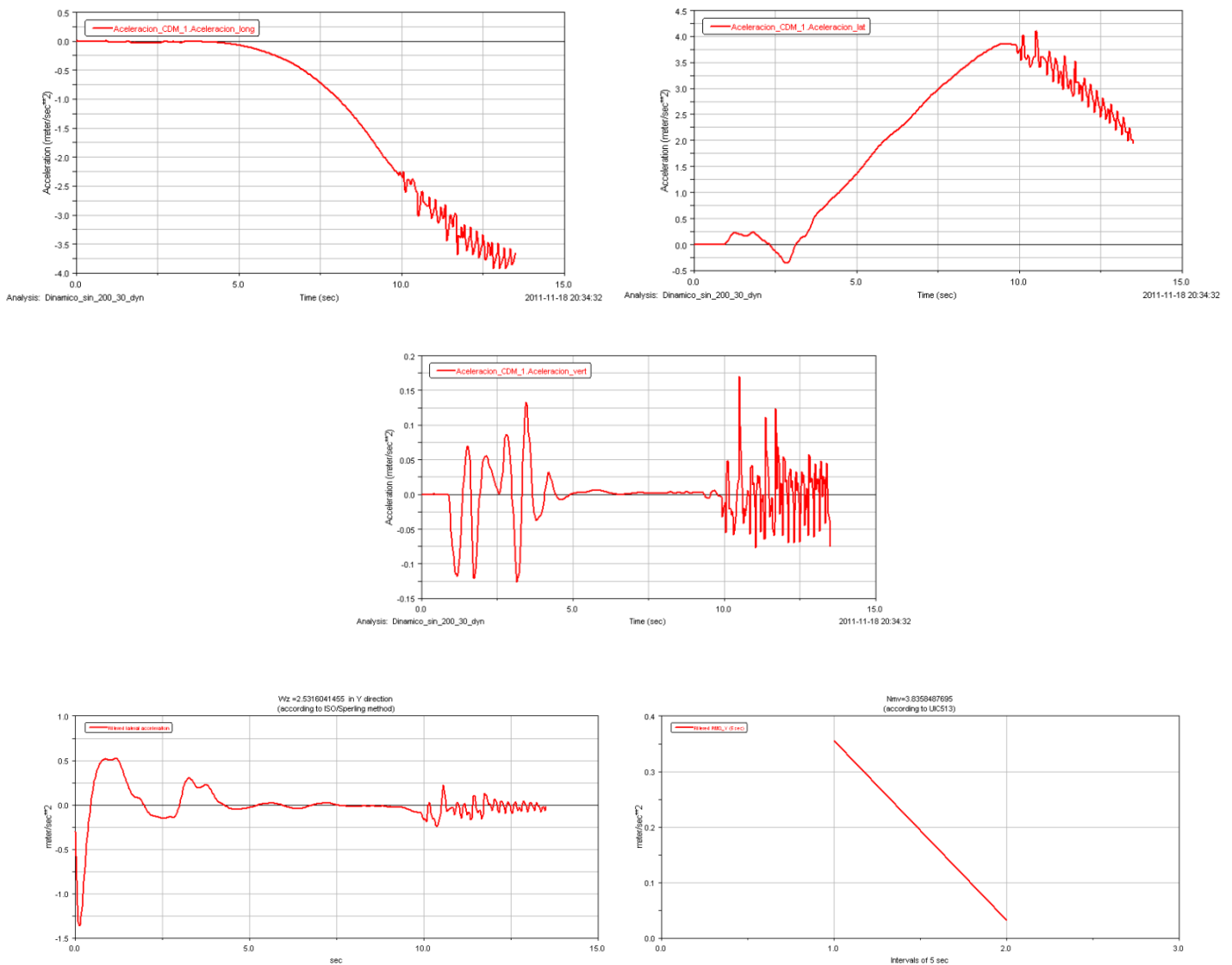


Figura 6.5. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 30 para 1 vagón.

6.1.2 Curva con 300 metros de radio

6.1.2.1 Velocidad de 15 m/s

En la figura 6.6 se puede observar que las gráficas de las aceleraciones tienen en todos los casos la misma forma aproximadamente, cambiando sólo los valores máximos, alcanzando para este caso, un valor de la aceleración longitudinal de -0.6 m/s^2 , para la aceleración lateral de 0.67 m/s^2 y para la aceleración vertical un valor de -0.05 m/s^2 . Los índices de confort muestran valores para Sperling de 1.44 y para la UIC de 0.55.

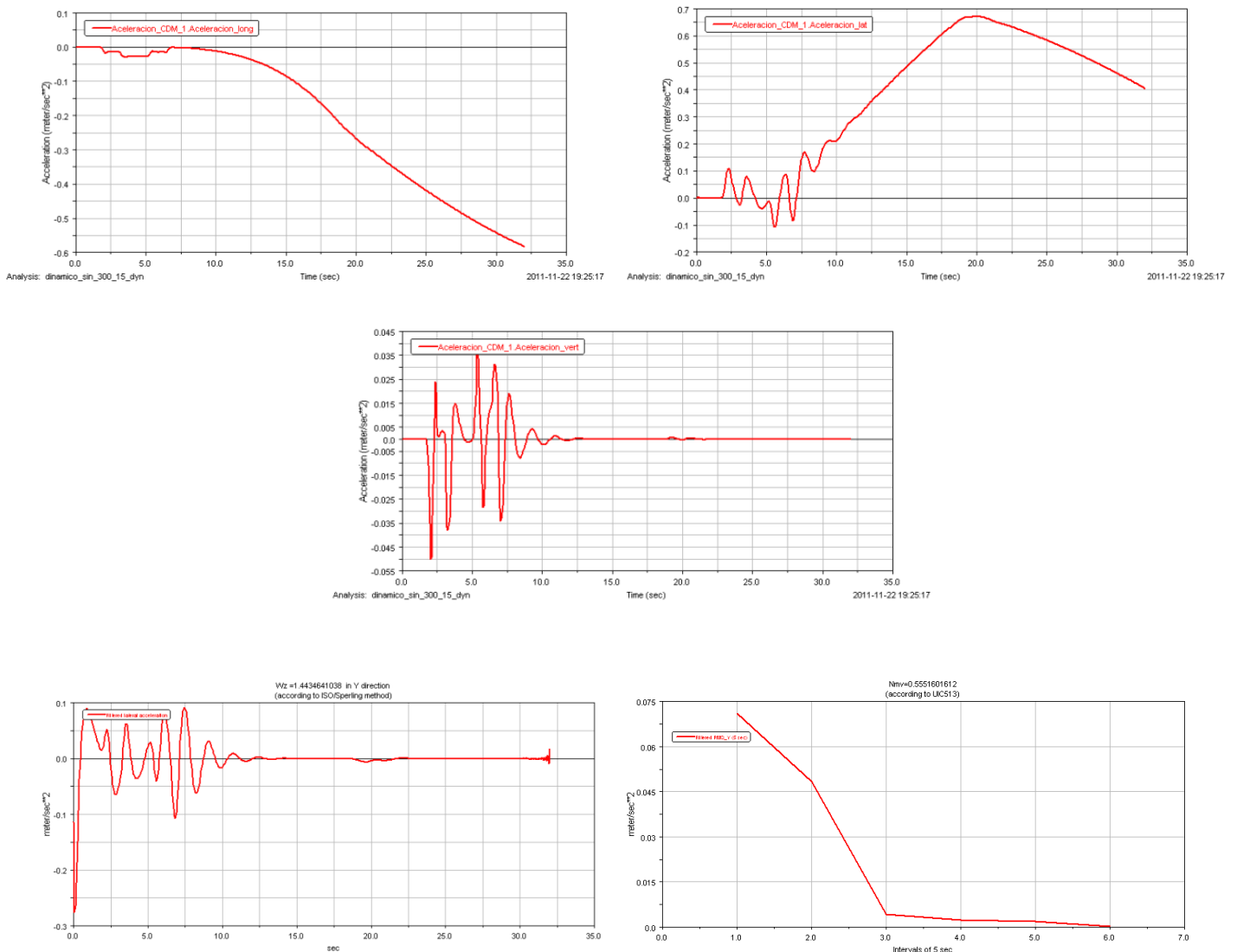


Figura 6.6. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 15 para 1 vagón.

6.1.2.2 Velocidad de 20 m/s

Al ir aumentando de velocidad se comprueba que los valores de las aceleraciones son mayores, que implica que también los diferentes índices de confort aumenten. Para esta velocidad se obtiene una aceleración longitudinal de -1 m/s^2 , para la aceleración lateral de 1.2 m/s^2 , y para la aceleración vertical de -0.08 m/s^2 . Para los índices de confort se han obtenido valores de 1.74 para Sperling y 1.05 para la UIC (Ver figura 6.7).

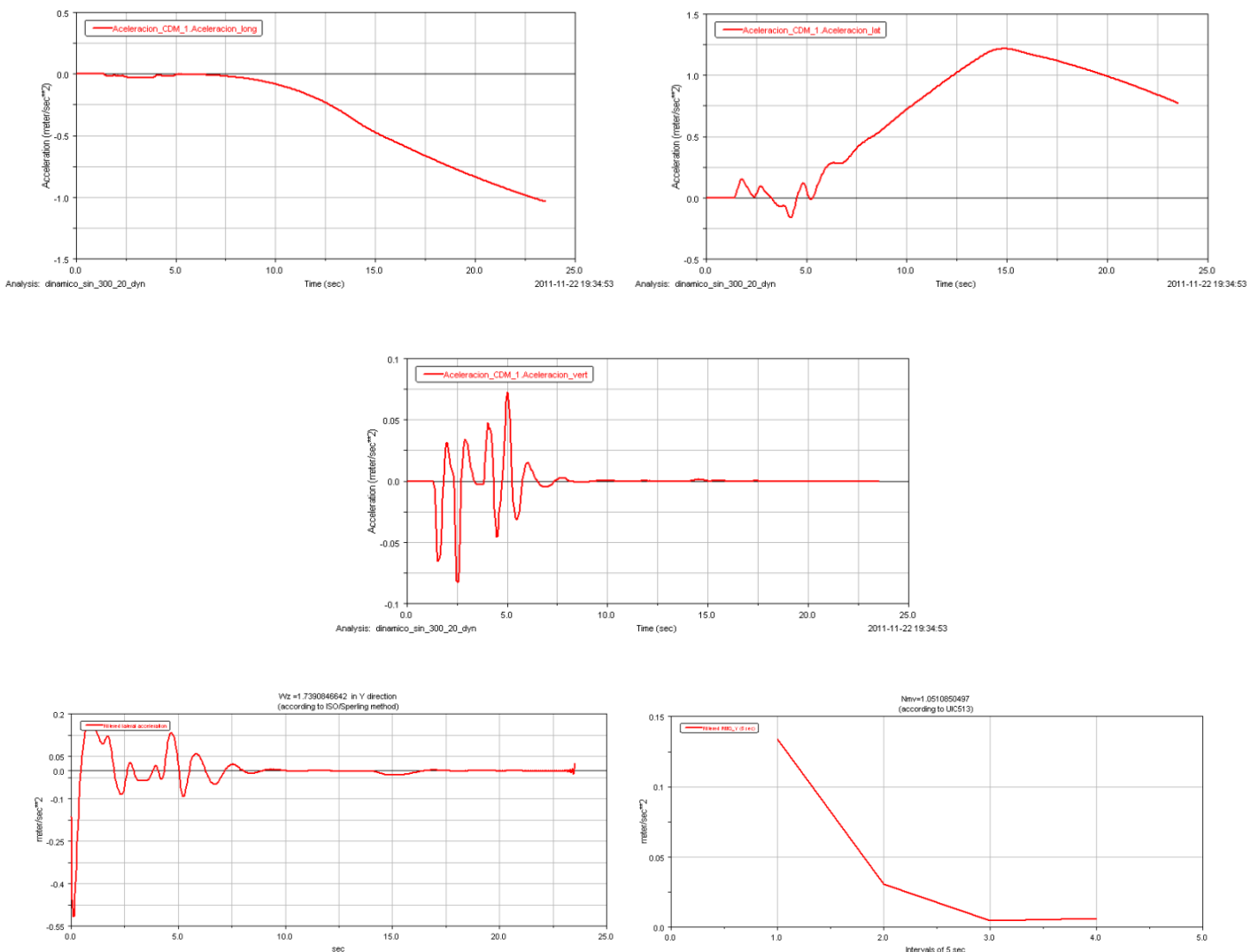


Figura 6.7. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 20 para 1 vagón.

6.1.2.3 Velocidad de 25 m/s

En esta simulación, las aceleraciones longitudinal, lateral y vertical alcanzan un valor máximo de, respectivamente, -1.6 m/s^2 , 1.8 m/s^2 ; 0.125 m/s^2 . El valor alcanzado en los índices de confort son para Sperling de 2.02 y para la UIC de 1.72. Nótese que la gráfica del confort perteneciente a la UIC de la figura 6.7, según se aumenta la velocidad, disminuye los tramos que tiene ya que el tiempo de simulación es menor (Ver figura 6.8).

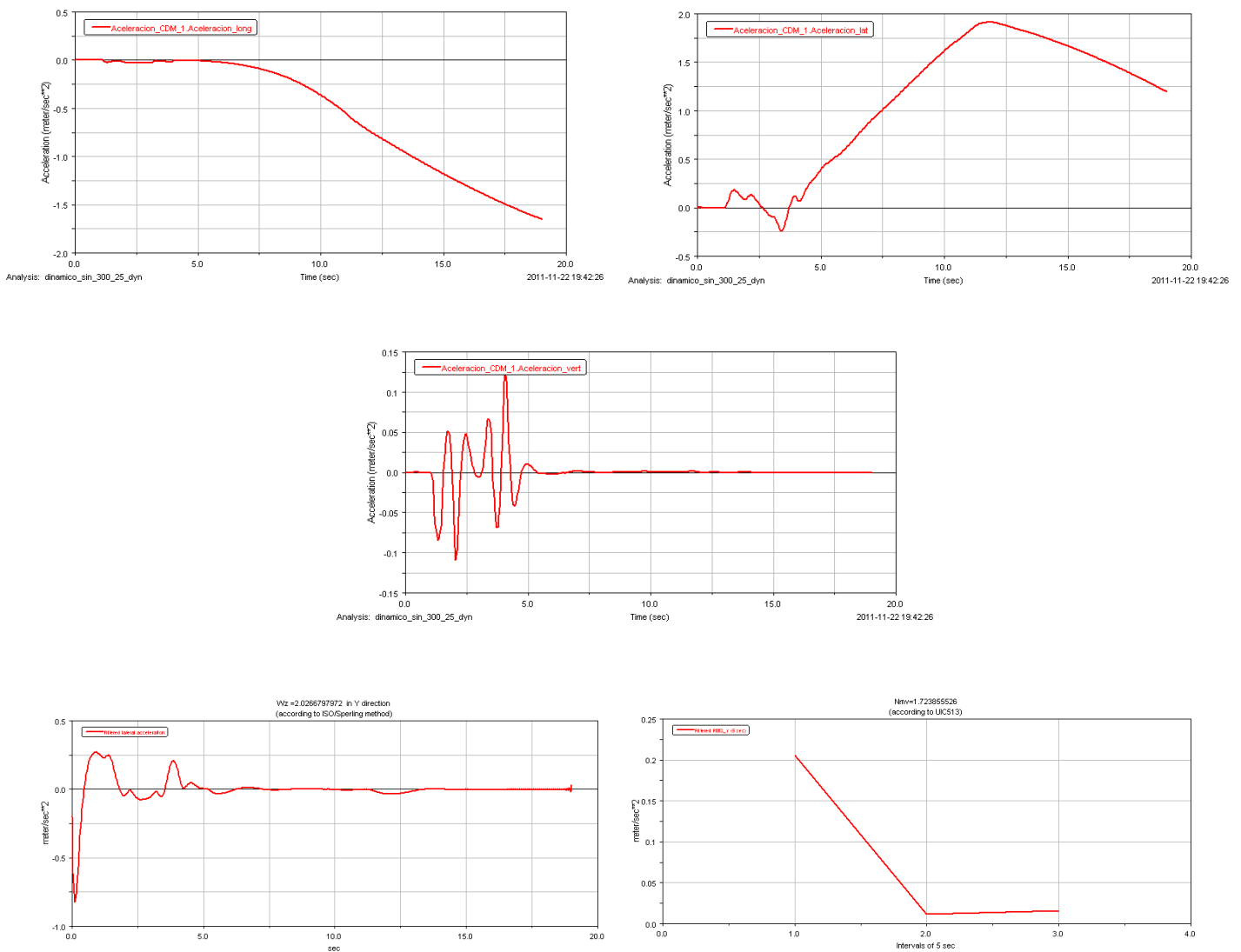


Figura 6.8. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 25 para 1 vagón.

6.1.2.4 Velocidad de 30 m/s

En la figura 6.9 se observa como la aceleración longitudinal alcanza un valor de -2.3 m/s^2 y como la lateral obtienen un valor de 2.5 m/s^2 . La vertical continua siendo muy inferior a las otras dos con un valor de 0.12 m/s^2 . Para los índices de confort de Sperling y de la UIC se obtienen un valor de, respectivamente, 2.42 y de 2.51.

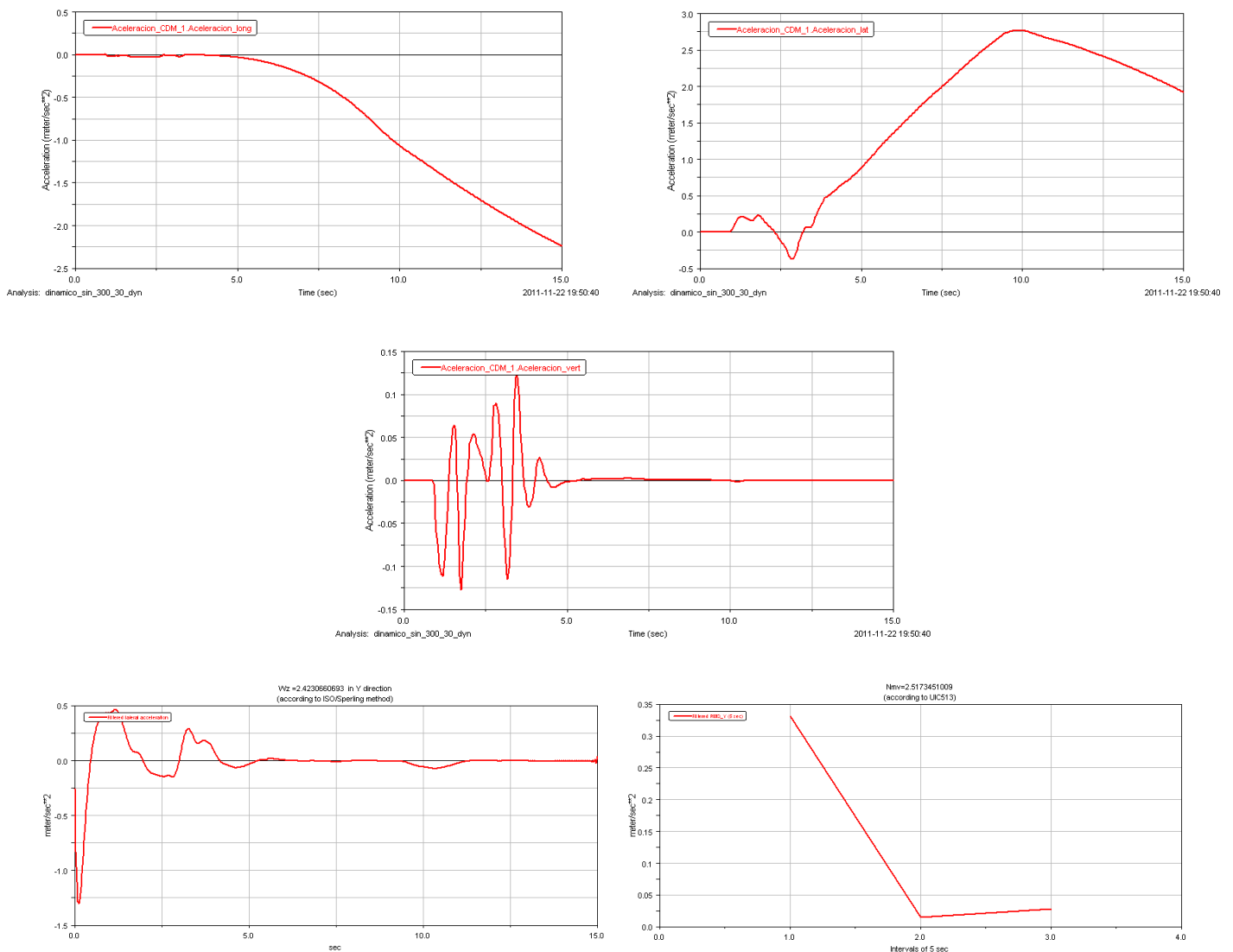


Figura 6.9. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 30 para 1 vagón.

6.1.2.5 Velocidad de 35 m/s

Para esta velocidad se alcanza un valor de -3.5 m/s^2 para la aceleración longitudinal, un valor de 3.75 m/s^2 para la lateral y un valor de -0.17 m/s^2 para la aceleración vertical. En referencia a los índices de confort, se alcanza un valor de 2.65 para el índice de Sperling y un valor de 3.65 para la Unión Internacional de Ferrocarriles (Ver figura 6.10).

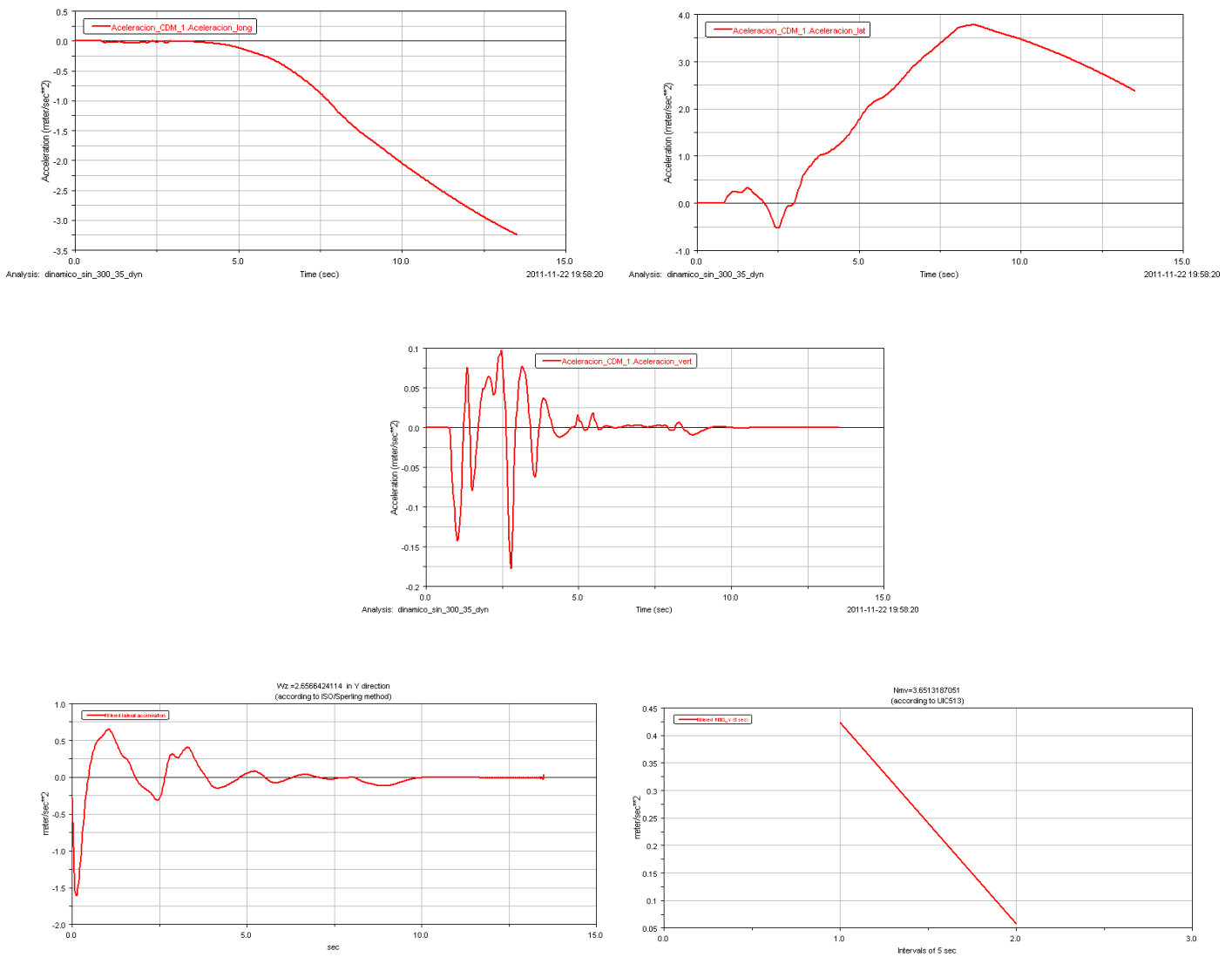


Figura 6.10. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 35 para 1 vagón.

6.1.2.6 Velocidad de 40 m/s

Para esta velocidad, el tren no es capaz de recorrer el trazado entero ya que alcanza la condición de descarrilamiento antes. En las gráficas de las aceleraciones, se observan varias sacudidas que preceden al descarrilamiento del tren que se produce aproximadamente en el segundo 9 cuando el tren lleva recorrido alrededor de unos 350 metros, se recuerda que la longitud total de la vía son 500 metros en todas las simulaciones. En la figura 6.11 se observa como los índices de confort no superan el valor máximo de su escala aunque haya descarrilado el tren. Estos índices alcanzan, para Sperling un valor de 3.08 y para la UIC un valor de 4.16.

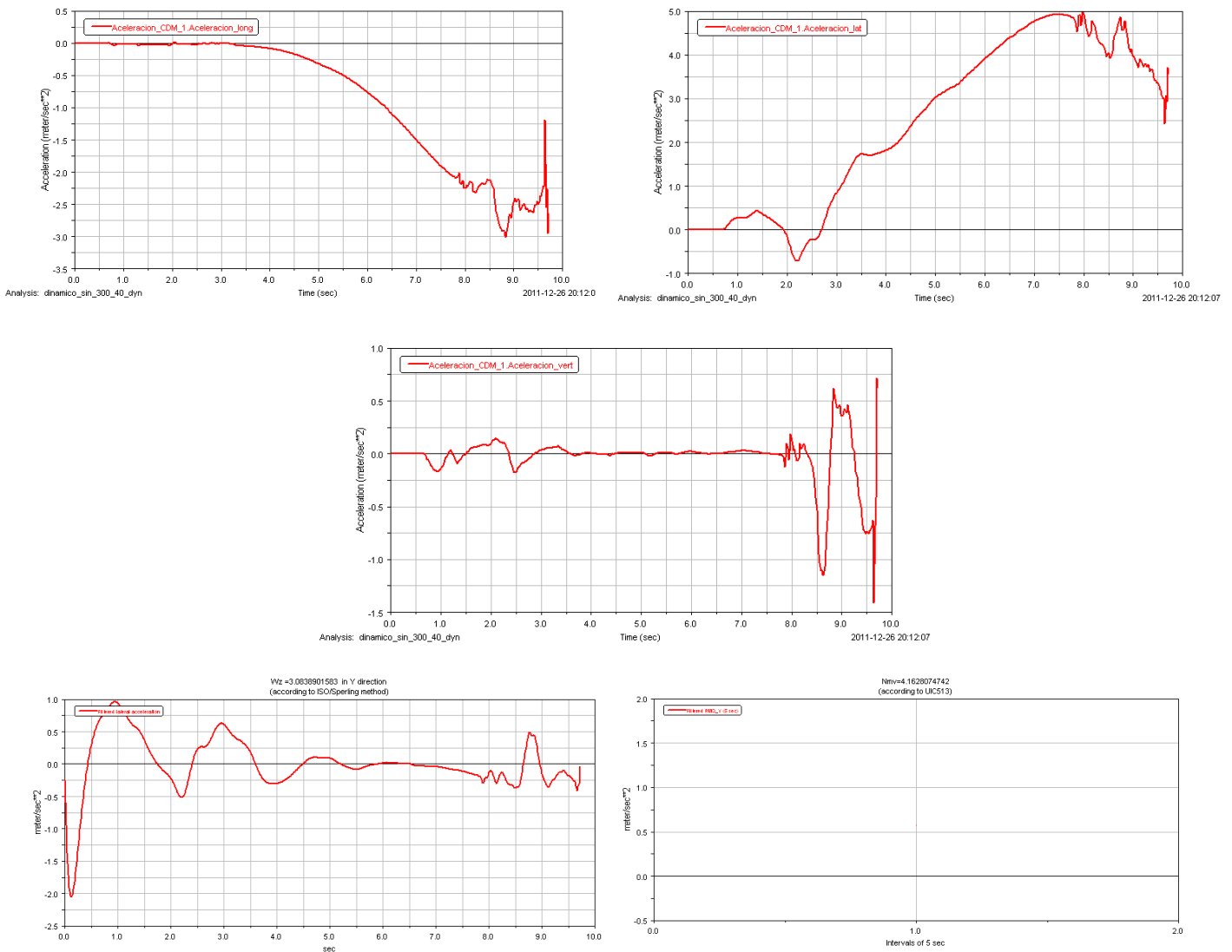


Figura 6.11. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 40 para 1 vagón.

6.1.3 Curva con 400 metros de radio

6.1.3.1 Velocidad de 15 m/s

Como se viene observando a lo largo de este capítulo, los valores de las aceleraciones para velocidades bajas son también bajos, alcanzando para la aceleración longitudinal un valor de -0.36 m/s^2 , para la aceleración lateral un valor de 0.52 m/s^2 y por último para la aceleración vertical un valor de -0.05 m/s^2 . Los valores de los índices de confort también presentan valores bajos cuando las velocidades y las aceleraciones son bajas, obteniéndose para esta simulación un valor de 1.44 para Sperling y un valor de 0.46 para la UIC. En la figura 6.12 se observan los resultados obtenidos en esta simulación.

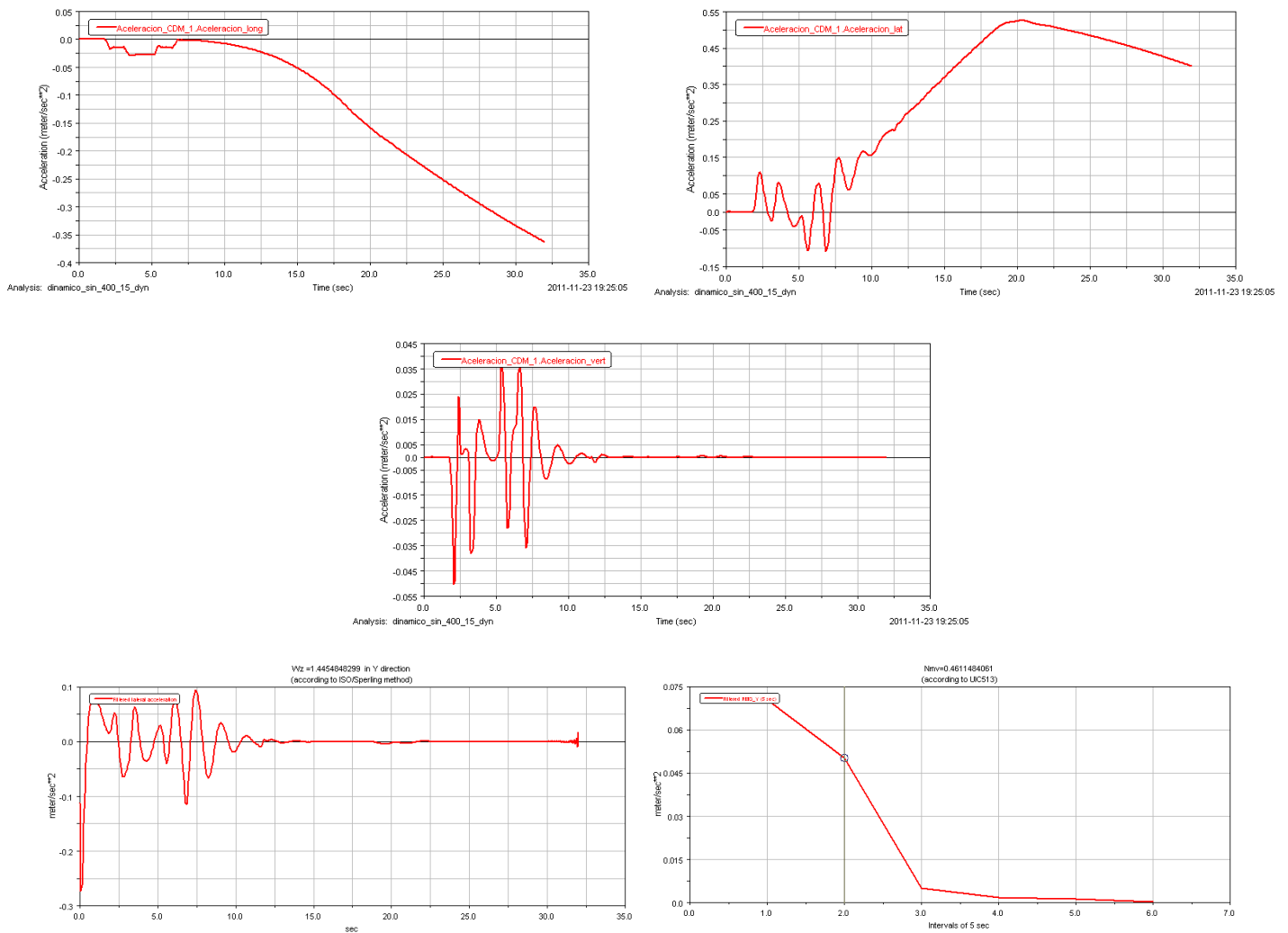


Figura 6.12. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 15 para 1 vagón.

6.1.3.2 Velocidad de 20 m/s

En este caso se observa en la figura 6.13 que los valores de las aceleraciones son algo mayores que en la simulación anterior pero aun bajos, con valores de -0.64 m/s^2 para la aceleración longitudinal, de 0.9 m/s^2 para la aceleración lateral y de -0.08 m/s^2 para la aceleración vertical. Los índices de confort muestran valores de 1.72 (Sperling) y 0.82 (UIC).

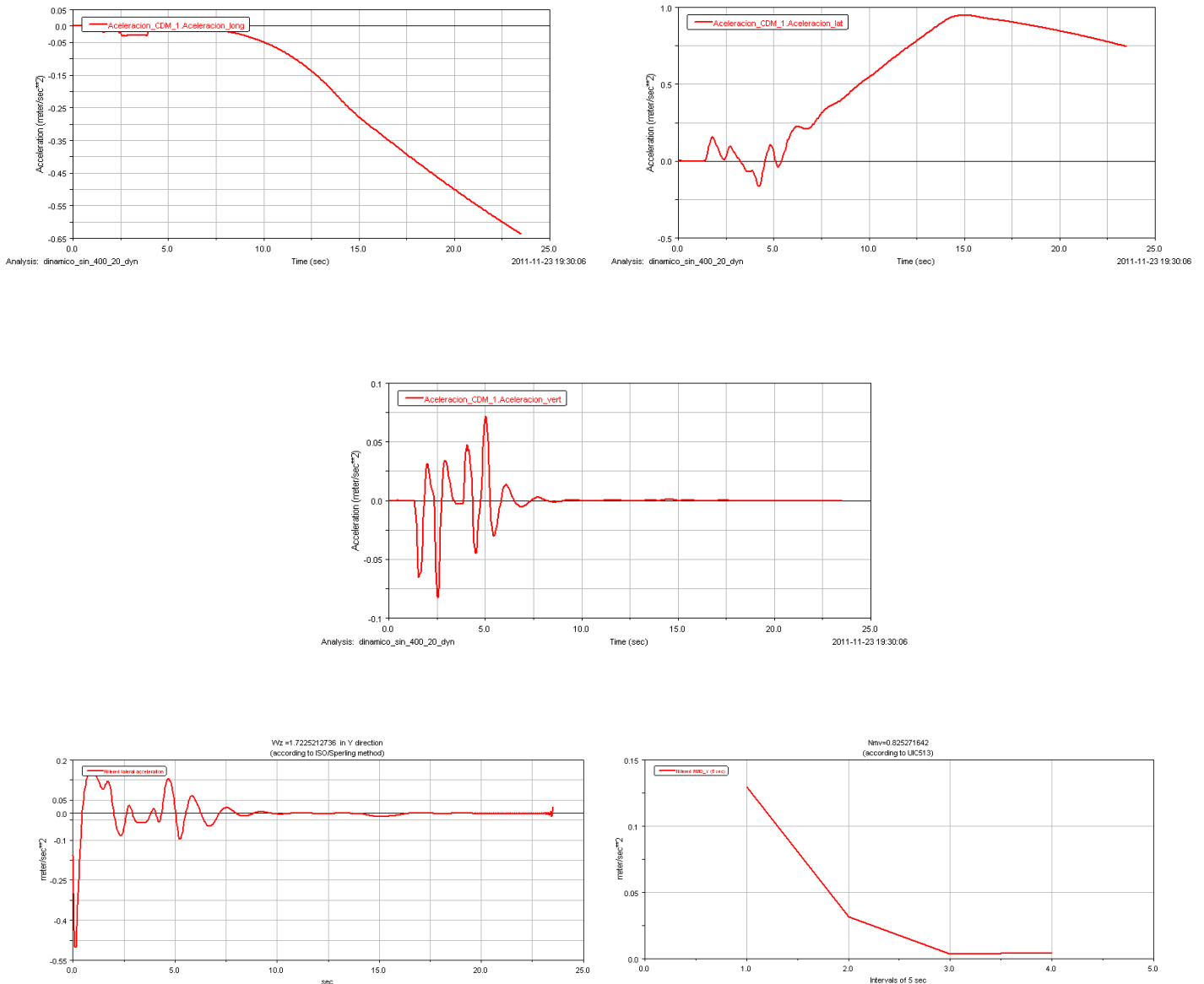


Figura 6.13. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 20 para 1 vagón.

6.1.3.3 Velocidad de 25 m/s

Para esta velocidad se sigue observando que en el tramo inicial hay fluctuaciones en la aceleración que se normalizan al aproximarse a la curva. Estas fluctuaciones se observan con mayor facilidad en la gráfica de la aceleración vertical ya que, en las otras aceleraciones, al iniciar la curva, se empieza a obtener valores más significativos que ocultan dichas fluctuaciones. En ese caso se obtienen valores máximos de -1 m/s^2 para la aceleración longitudinal, de 1.5 m/s^2 para la lateral y de 0.12 m/s^2 para la vertical. Los índices de confort marcan un 2 para Sperling y un 1.32 para UIC (Ver figura 6.14).

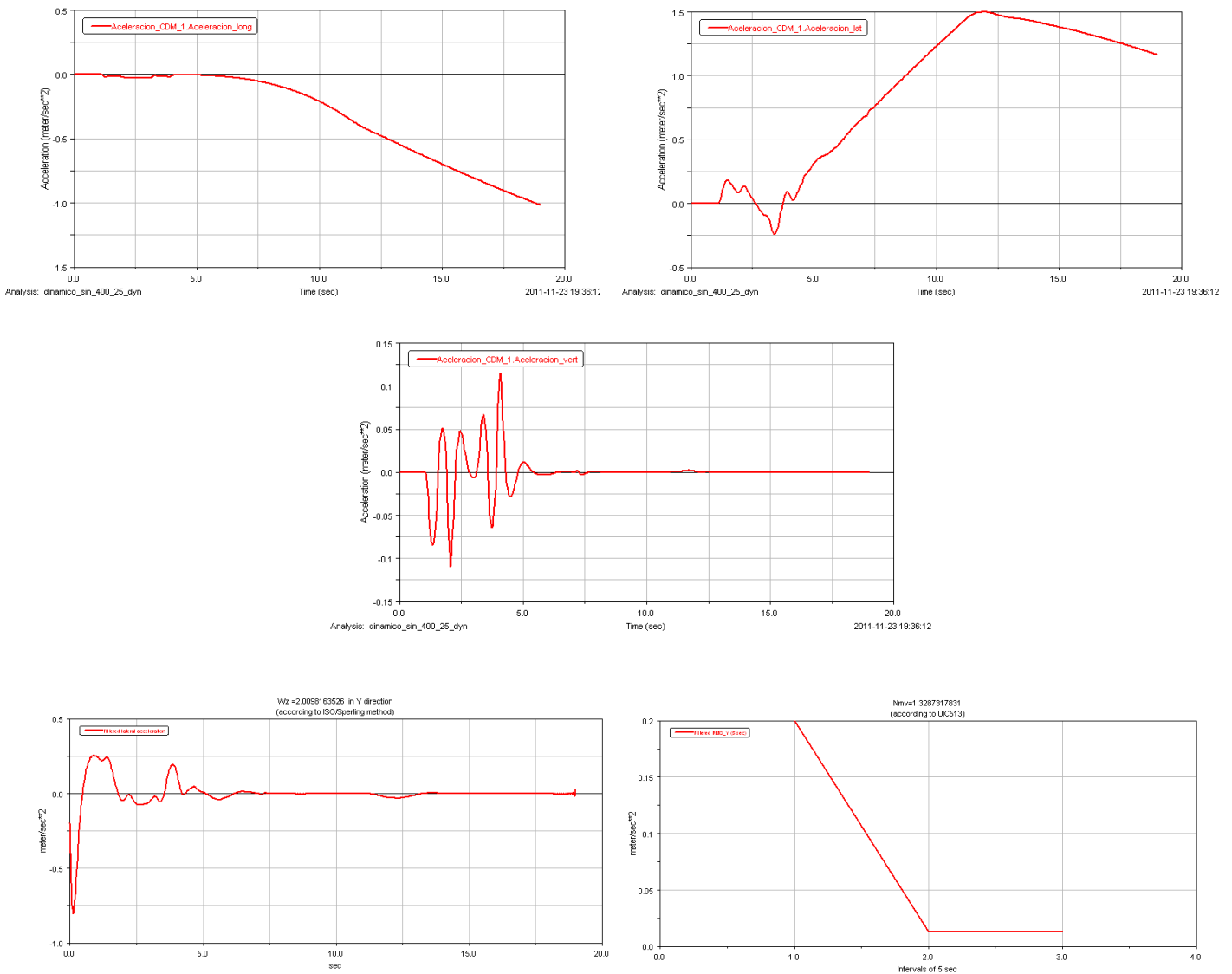


Figura 6.14. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 25 para 1 vagón.

6.1.3.4 Velocidad de 30 m/s

En las graficas mostradas en la figura 6.15 se ve que las aceleraciones sufren algo inestabilidad al final del trazado, pero no influyen en los valores máximos que son -1.5, 2.2 y 0.12 m/s² para las aceleraciones longitudinal, lateral y vertical, respectivamente. El índice de confort de Sperling alcanza el valor de 2.34 mientras que el utilizado por la UIC obtiene un valor de 1.95, cumpliéndose que aumentan cuando mayor es la velocidad.

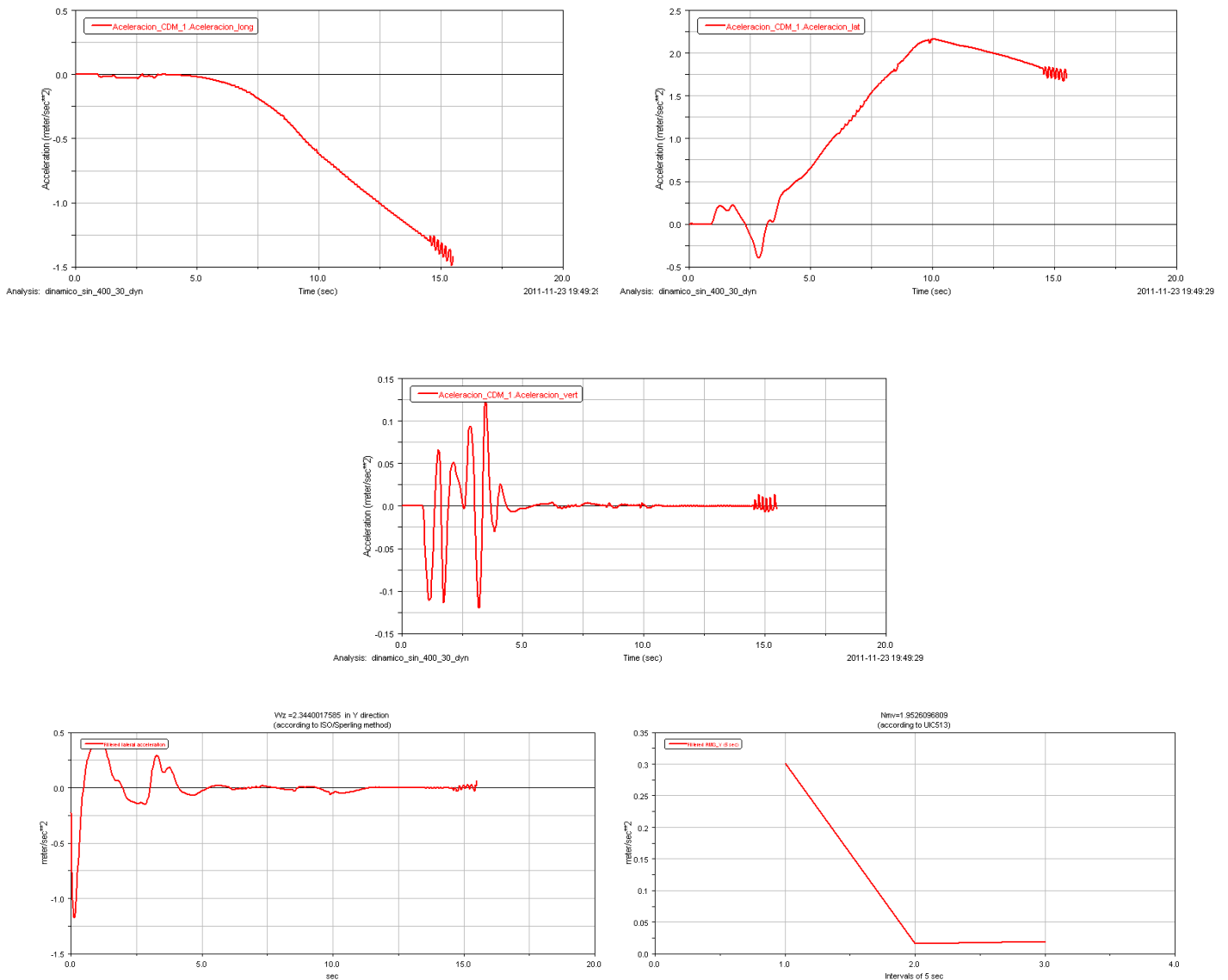


Figura 6.15. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 30 para 1 vagón.

6.1.3.5 Velocidad de 35 m/s

En este caso se obtienen unos valores máximos de -2 m/s^2 para la aceleración longitudinal, de 3 m/s^2 para la aceleración lateral y de -0.17 m/s^2 para la aceleración vertical. Con respecto a los índices se observa que el índice de Sperling es menos variable respecto de las aceleraciones que el índice desarrollado por la UIC, obteniéndose para el primero un valor de 2.62 y para el último de 2.83 (Ver figura 6.16).

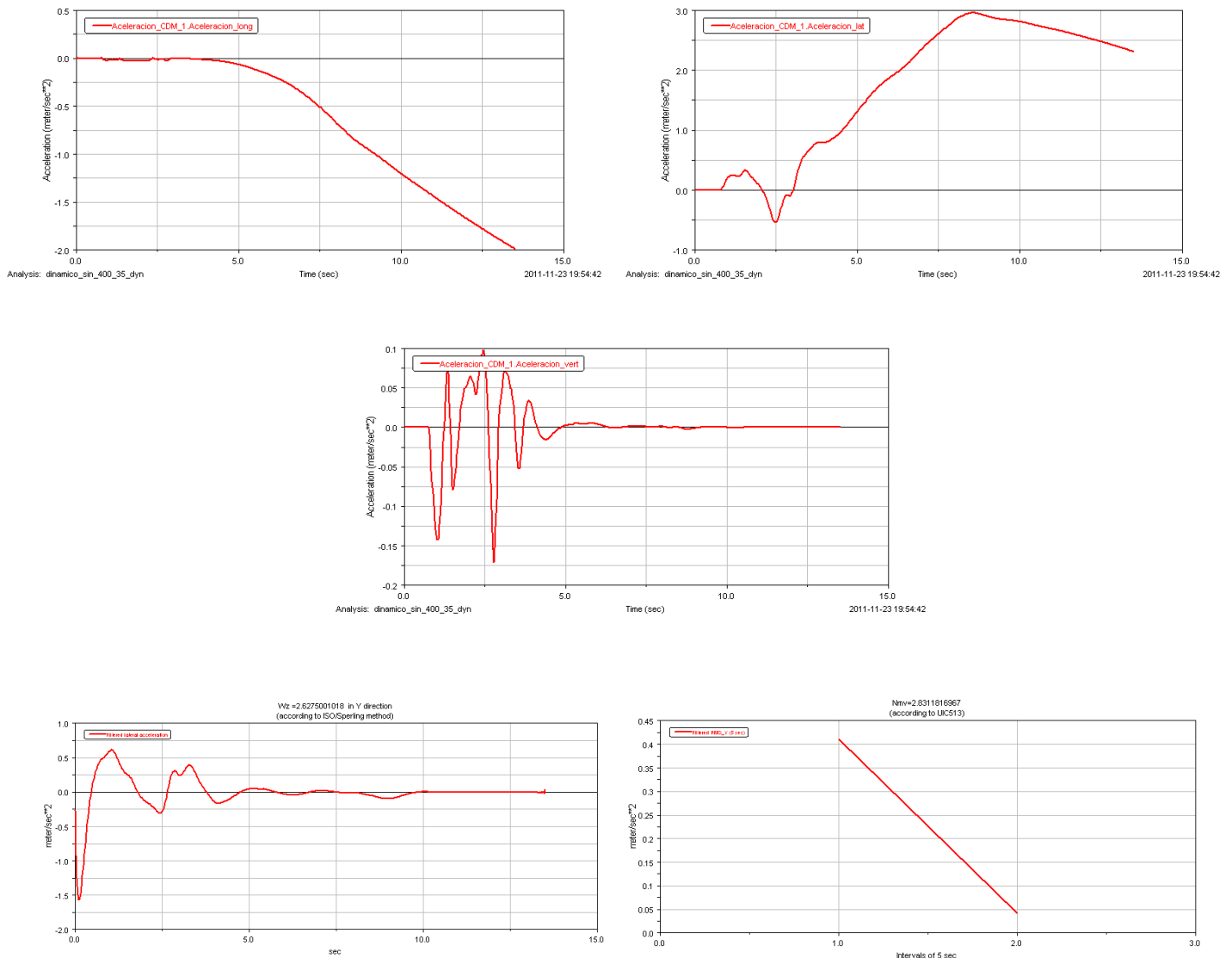


Figura 6.16. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 35 para 1 vagón.

6.1.3.6 Velocidad de 40 m/s

En la figura 6.17 se observa que las aceleraciones poseen una línea más irregular que en los casos con velocidades bajas, sobre todo se observa esto en la parte final de la simulación. Esto conlleva a que aumente los índices de confort a valores de 2.93 para Sperling y de 3.76 para la UIC. Las aceleraciones alcanzan valores máximos de -2.8 m/s^2 (longitudinal), de 3.9 m/s^2 (lateral) y de -0.175 m/s^2 (vertical).

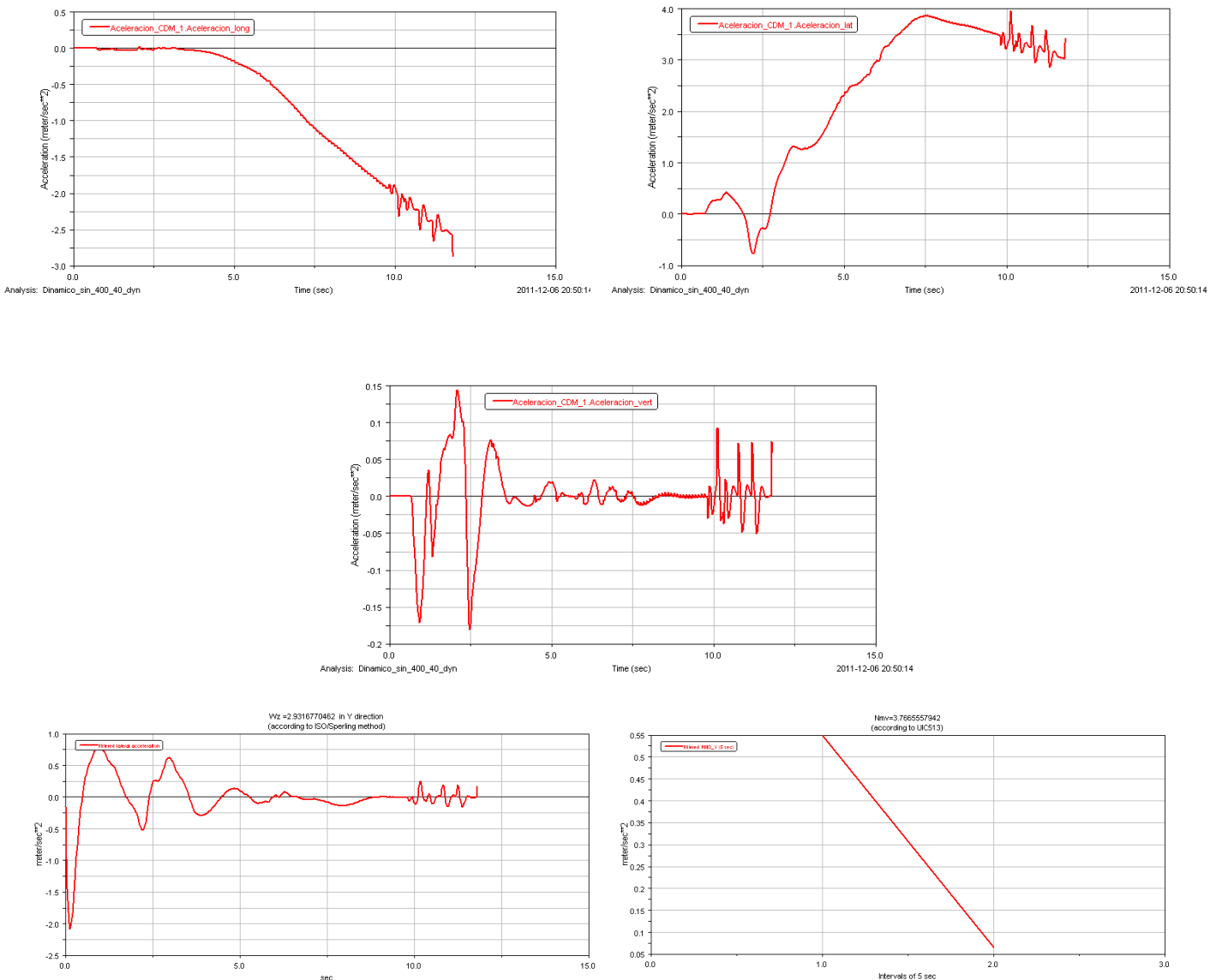


Figura 6.17. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 40 para 1 vagón.

6.1.3.7 Velocidad de 45 m/s

Como ocurría anteriormente, a velocidades altas las aceleraciones son muy irregulares con varios altibajos. La aceleración longitudinal alcanza los -3.1 m/s^2 , la lateral de 5.5 m/s^2 y la vertical de -0.65 m/s^2 . Estos valores altos de aceleración repercuten directamente sobre los valores de los índices de confort que también aumentan llegando a marcar 3.09 para Sperling y 3.97 para la Unión Internacional de Ferrocarriles (Ver figura 6.18).

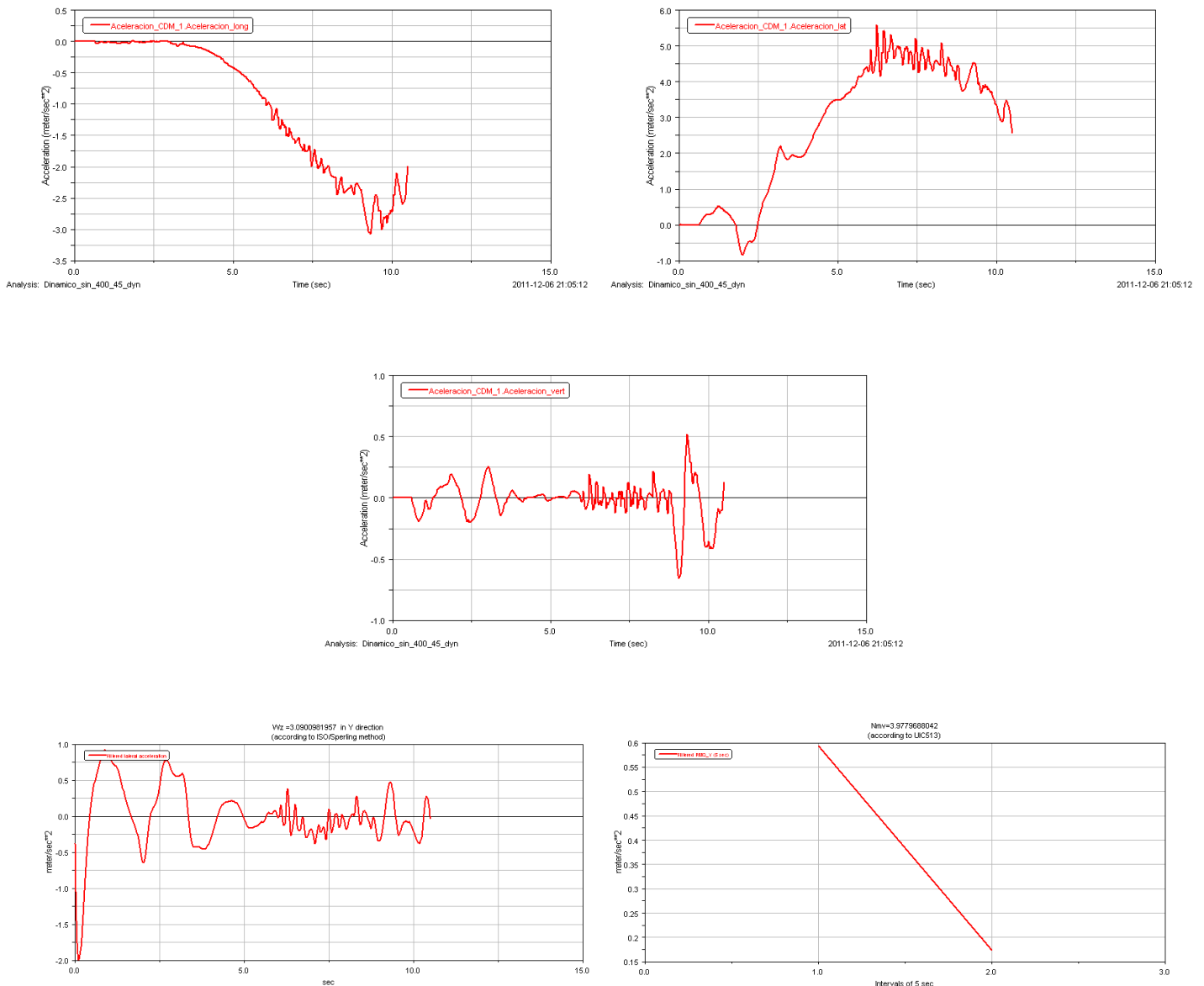


Figura 6.18. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 45 para 1 vagón.

6.1.3.8 Velocidad de 50 m/s

En la figura 6.19 se observa como las aceleraciones, a esta velocidad, no son más altas que en el caso anterior pero si que la forma cambia bastante y donde más se aprecia es en la aceleración lateral que mantenía en casi todas las simulaciones la misma forma. Los valores máximos alcanzados en esta simulación son de -2.1 m/s^2 (longitudinal), de 5.6 m/s^2 (lateral) y de -1.2 m/s^2 (vertical). En cuanto a los índices de confort se observa como el índice utilizado en la UIC supera el último valor en la escala de incomodidad, fijado en 5. En las simulaciones anteriores nunca se había alcanzado este valor porque descarrilaba antes el tren. Se ha obtenido, por tanto, 3.72 para Sperling y 5.63 para la UIC.

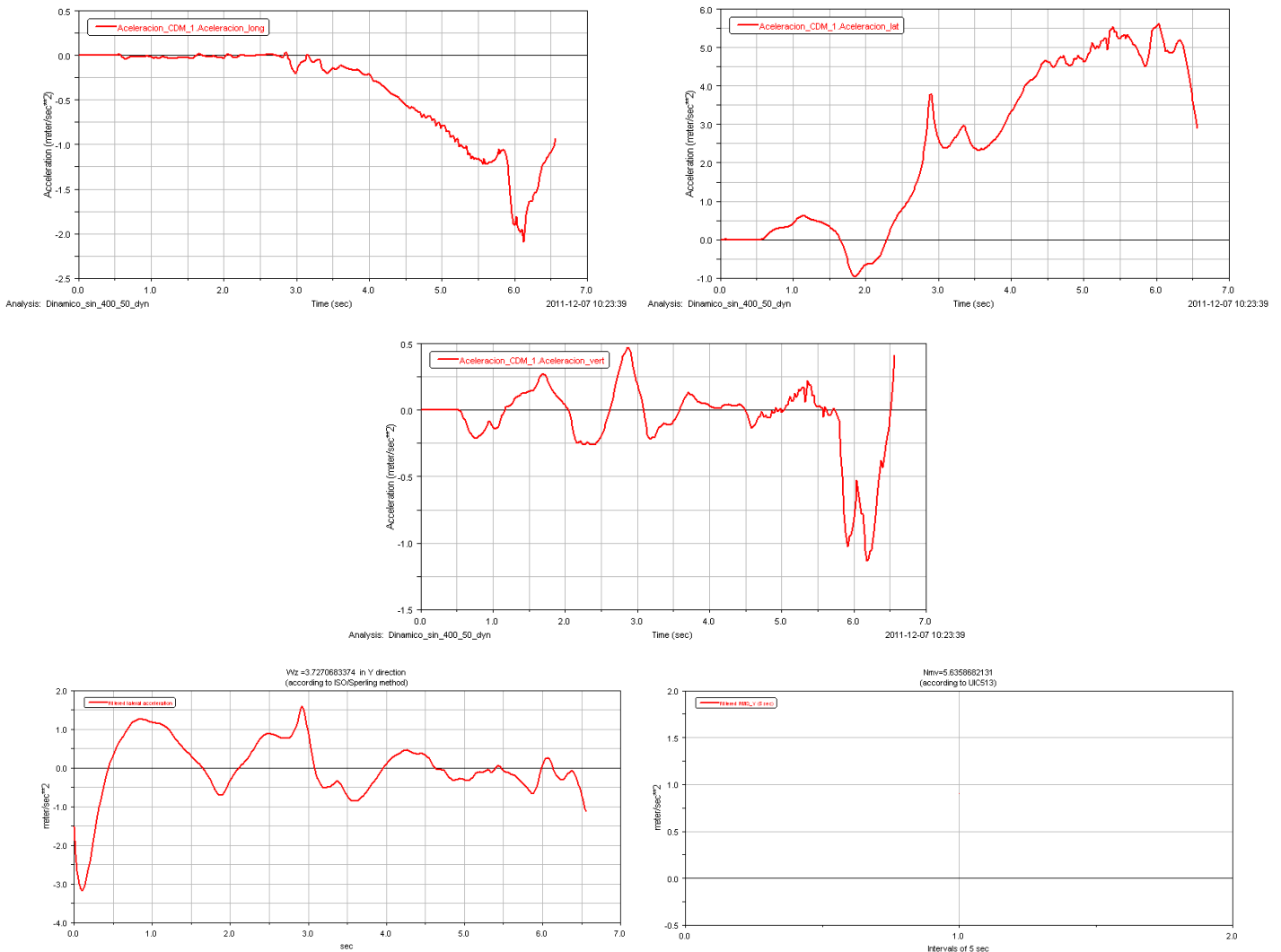


Figura 6.19. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 50 para 1 vagón.

6.1.4 Curva con 500 metros de radio

6.1.4.1 Velocidad de 15 m/s

Se vuelve a comprobar que cuando las velocidades de inicio son bajas las aceleraciones también lo son, alcanzando para esta velocidad unos valores máximos de -0.4 m/s^2 para la aceleración longitudinal, de 0.4 m/s^2 para la aceleración lateral y de -0.05 m/s^2 para la aceleración vertical. En cuanto a los índices de confort, se observa como el índice Sperling alcanza un valor de 1.41 y el desarrollado por la UIC un valor de 0.39. Ver la figura 6.20 para comprobar los resultados expuestos anteriormente.

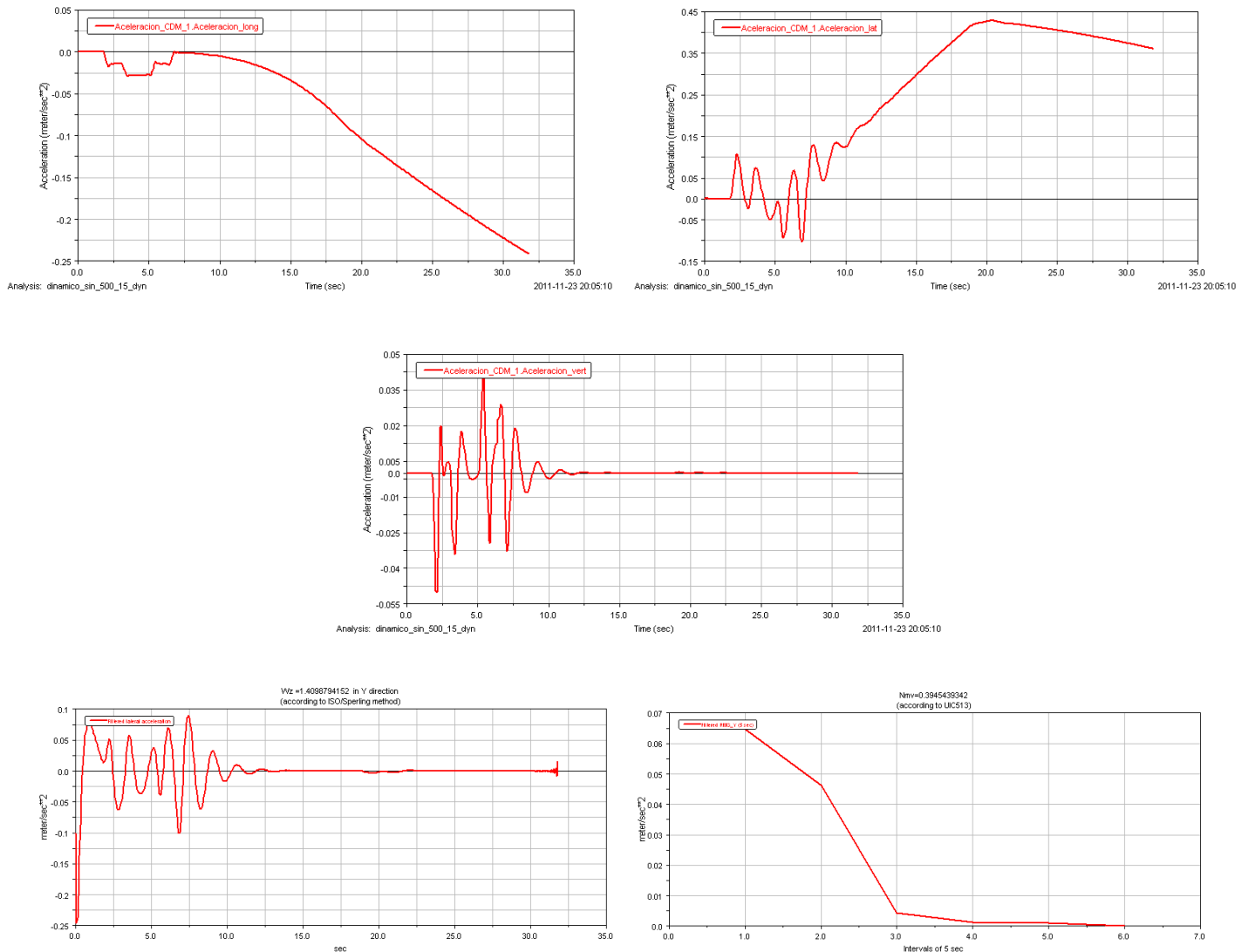


Figura 6.20. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 15 para 1 vagón.

6.1.4.2 Velocidad de 20 m/s

En esta simulación los valores pico alcanzados para las aceleraciones son de -0.42 m/s^2 para la aceleración longitudinal, de 0.77 m/s^2 para la aceleración lateral y de 0.07 m/s^2 para la aceleración vertical. En cuanto a los índices de confort, observamos que alcanzan un valor de 1.67 para el método de Sperling y de 0.69 para la Unión Internacional de Ferrocarriles (Ver figura 6.21).

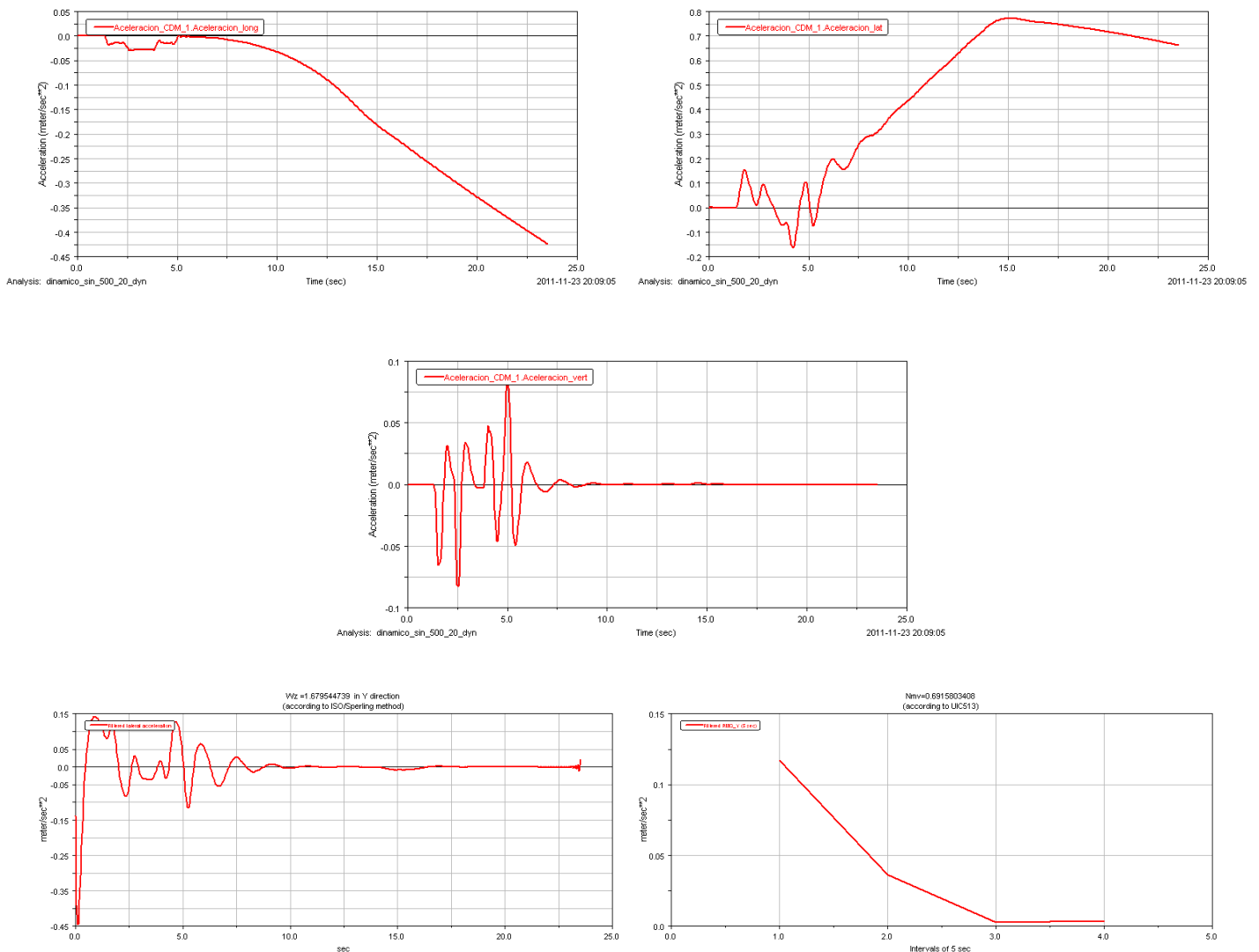


Figura 6.21. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 20 para 1 vagón.

6.1.4.3 Velocidad de 25 m/s

Al ir aumentando la velocidad, como se puede apreciar en la figura 6.22, las aceleraciones también lo hacen, marcando, en este caso, valores máximos de -0.67 m/s^2 para la aceleración longitudinal, de 1.2 m/s^2 para la aceleración lateral y de 0.12 m/s^2 para la aceleración vertical. Los dos índices de confort también aumentan al aumentar la velocidad, alcanzando un valor de 1.94 para Sperling y un valor de 1.08 para el método desarrollado por la UIC.

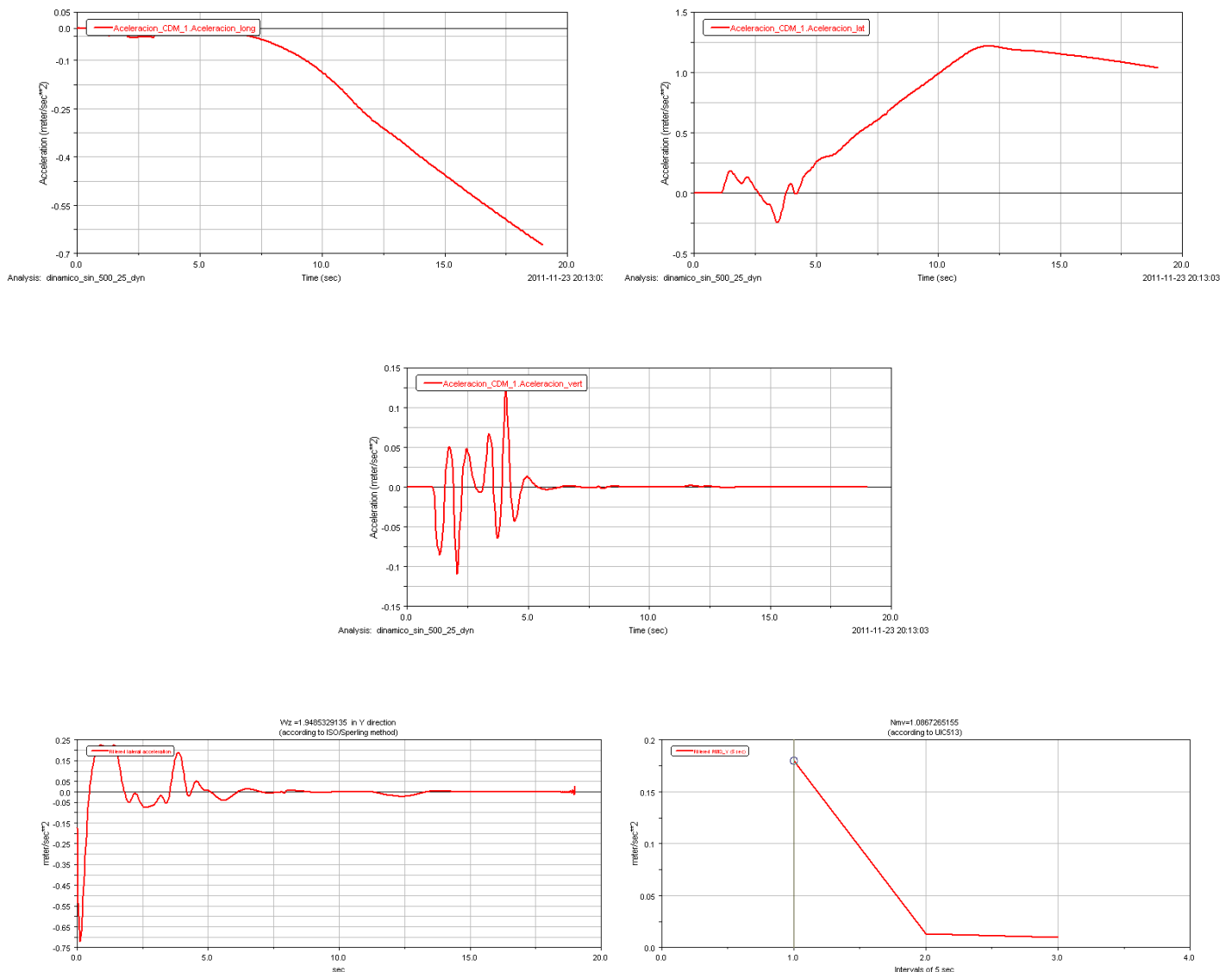


Figura 6.22. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 25 para 1 vagón.

6.1.4.4 Velocidad de 30 m/s

En este caso, las aceleraciones alcanzan valores máximos de -0.95 m/s^2 (aceleración longitudinal), de 1.75 m/s^2 (aceleración lateral) y de 0.12 m/s^2 (aceleración vertical). Los índices de confort llegan a marcar un valor de 2.26 para Sperling y un valor de 1.59 para la UIC. En la figura 6.23 se recogen las gráficas de las aceleraciones e índices de confort.

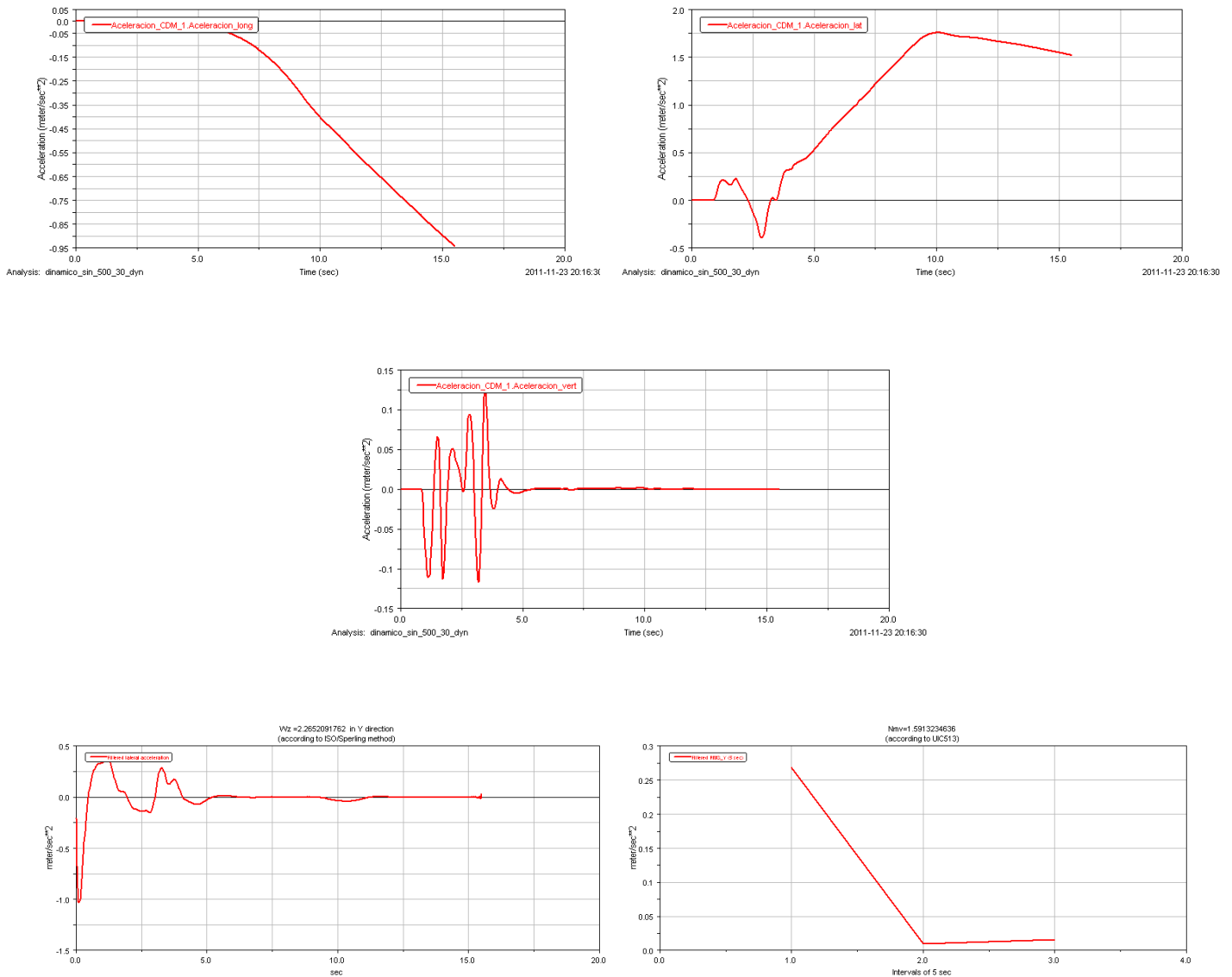


Figura 6.23. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 30 para 1 vagón.

6.1.4.5 Velocidad de 35 m/s

En la figura 6.24 se observa como empiezan a visualizarse irregularidades en la parte final de las líneas de las aceleraciones. Se alcanzan valores pico de -1.3 m/s^2 para la aceleración longitudinal, de 2.4 m/s^2 para la aceleración lateral y de -0.16 m/s^2 para la aceleración vertical. También se observa que en todas las simulaciones la aceleración lateral es la que más aumenta al aumentarse la velocidad, a velocidades bajas es prácticamente igual a la longitudinal pero a velocidades altas es mayor. En cuanto a los índices de confort, el método Sperling marca 2.54 mientras que el desarrollado por la UIC alcanza 2.31.

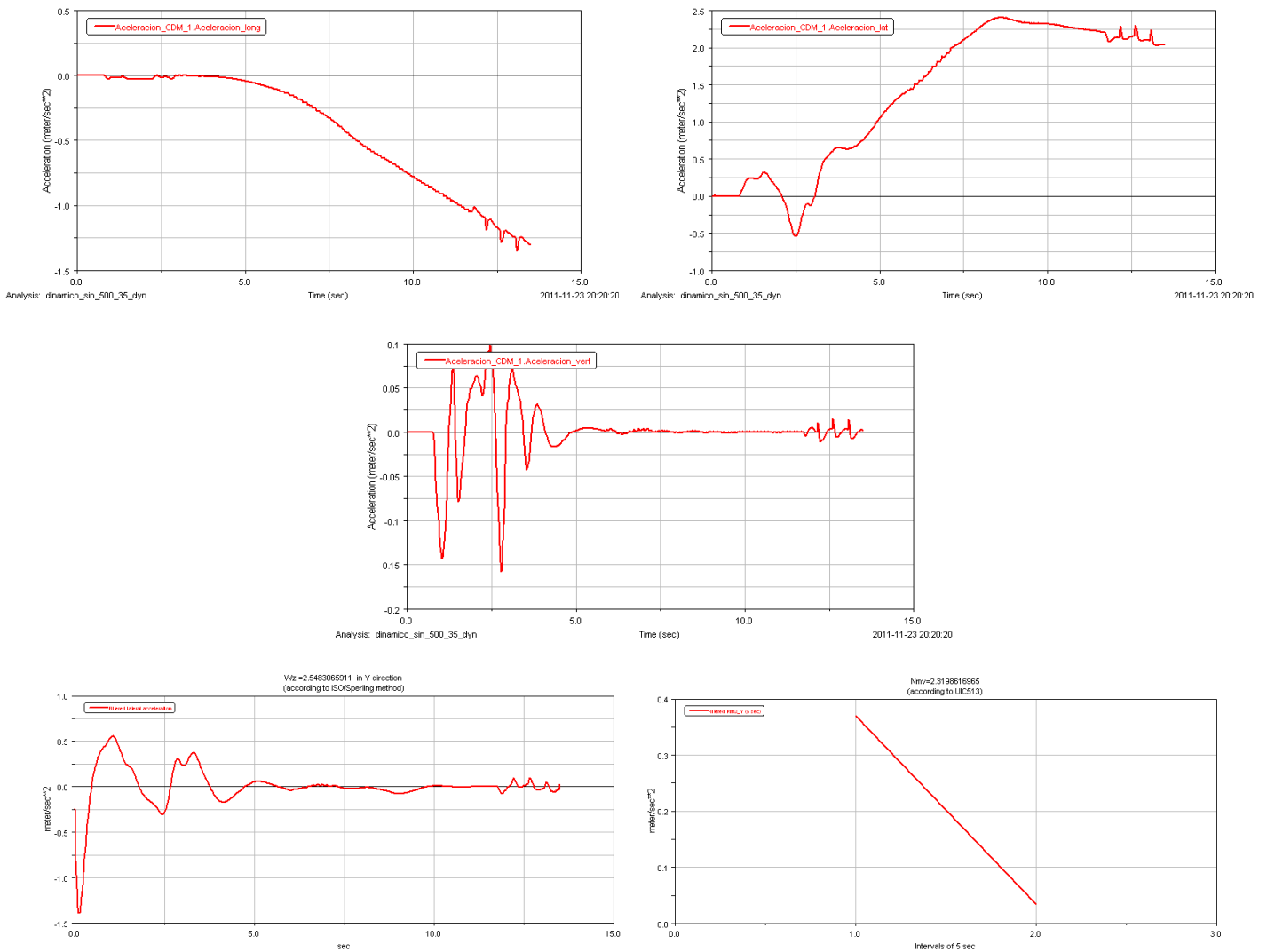


Figura 6.24. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 35 para 1 vagón.

6.1.4.6 Velocidad de 40 m/s

Se comprueba que al aumentar la velocidad, las irregularidades descritas en el anterior apartado también aumentan, además de aumentar los valores de aceleración alcanzando en este caso unos valores de -1.7 m/s^2 para la aceleración longitudinal, de 3.15 m/s^2 para la aceleración lateral y de -0.17 m/s^2 para la aceleración vertical. Los índices de confort alcanzados en esta simulación son de 2.84 para Sperling y de 3.11 para la UIC (Ver figura 6.25).

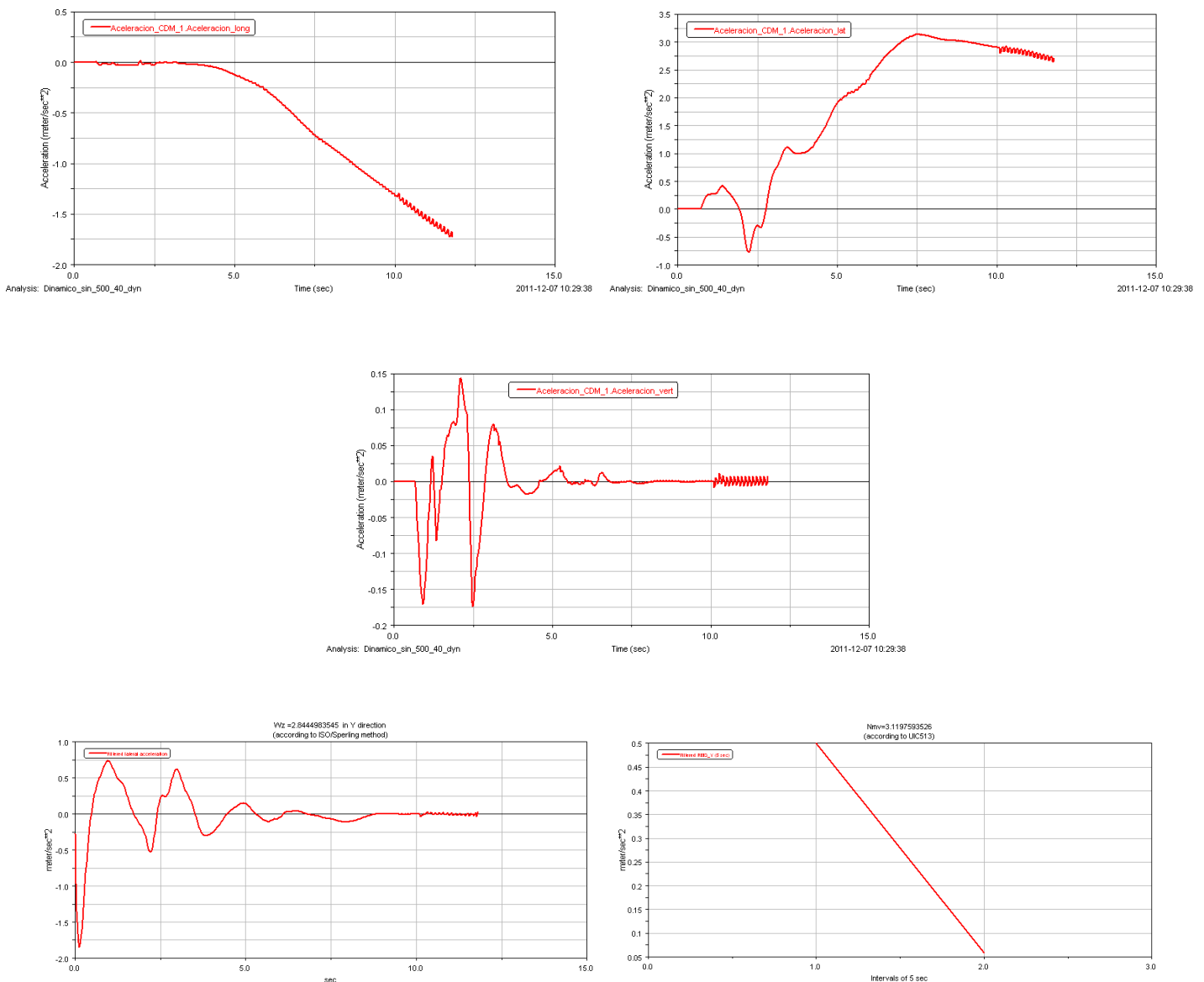


Figura 6.25. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 40 para 1 vagón.

6.1.4.7 Velocidad de 45 m/s

En la figura 6.26 se observa que, para esta simulación, los valores se acercan a los críticos, alcanzando para las aceleraciones un valor de -2.25 m/s^2 para la aceleración longitudinal, de 4.1 m/s^2 para la aceleración lateral y de 0.23 m/s^2 para la aceleración vertical. Los índices de confort llegan a 3.11 para Sperling y a 3.95 para la Unión Internacional de Ferrocarriles.

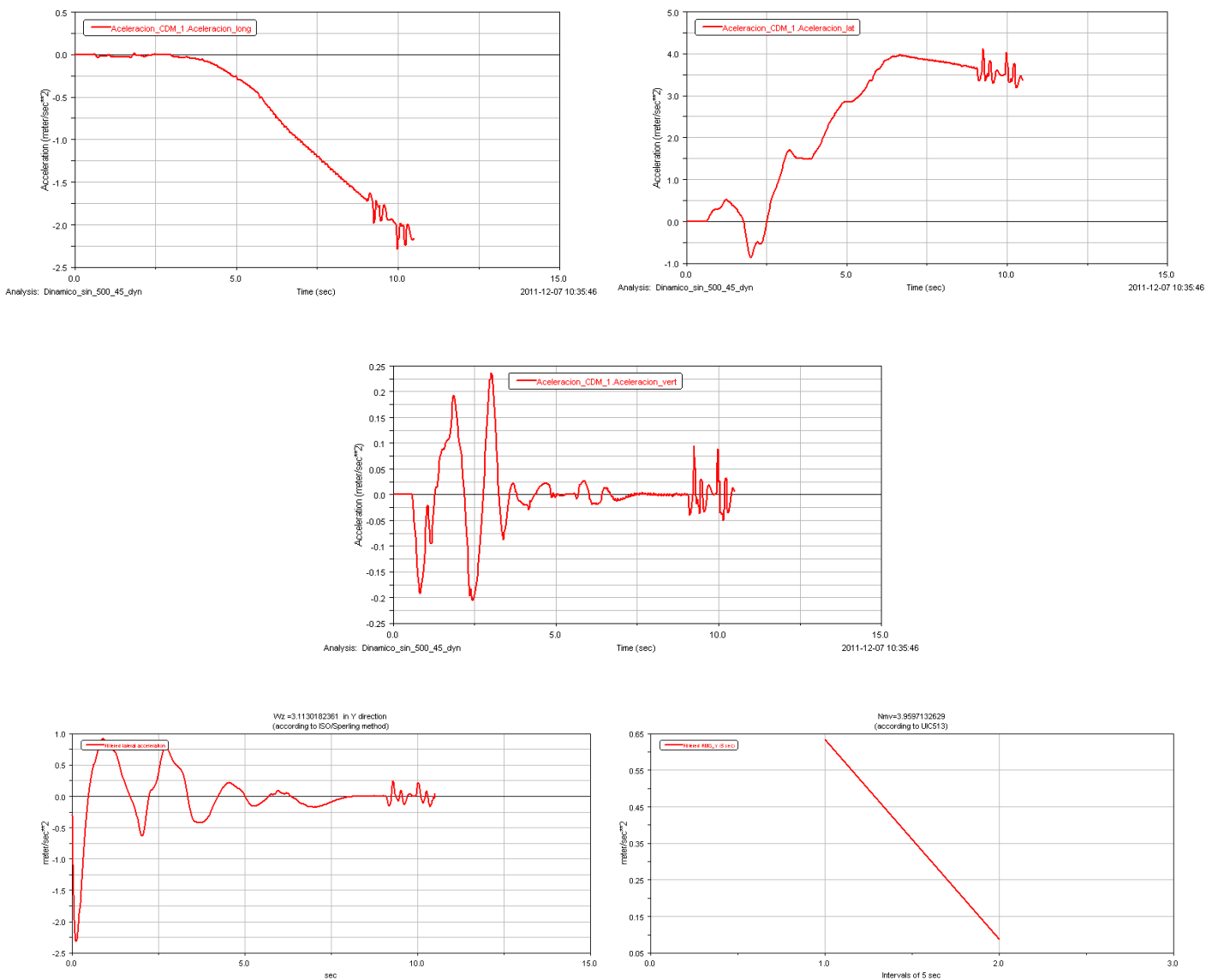


Figura 6.26. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 45 para 1 vagón.

6.1.4.8 Velocidad de 50 m/s

Para esta velocidad alta, se observa que las aceleraciones son muy irregulares y muy altas, lo que conlleva que el valor del índice de confort de la UIC supere la escala más alta, por tanto esta es la última simulación con este radio de curvatura. En la figura 6.27 se observa que la aceleración longitudinal alcanza un valor máximo de -2.8 m/s^2 , la lateral de 5.2 m/s^2 y la vertical de -0.55 m/s^2 . Los índices de confort alcanzan un valor de 3.41 para Sperling y de 5.46 para la UIC, observándose que solo hay un punto en la gráfica de este índice, ya que solo existe un intervalo de 5 segundos debido a la alta velocidad del tren. De nuevo se supera el valor crítico antes de que descarrile el tren, suceso que no ocurría cuando los radios de curvatura eran más pequeños.

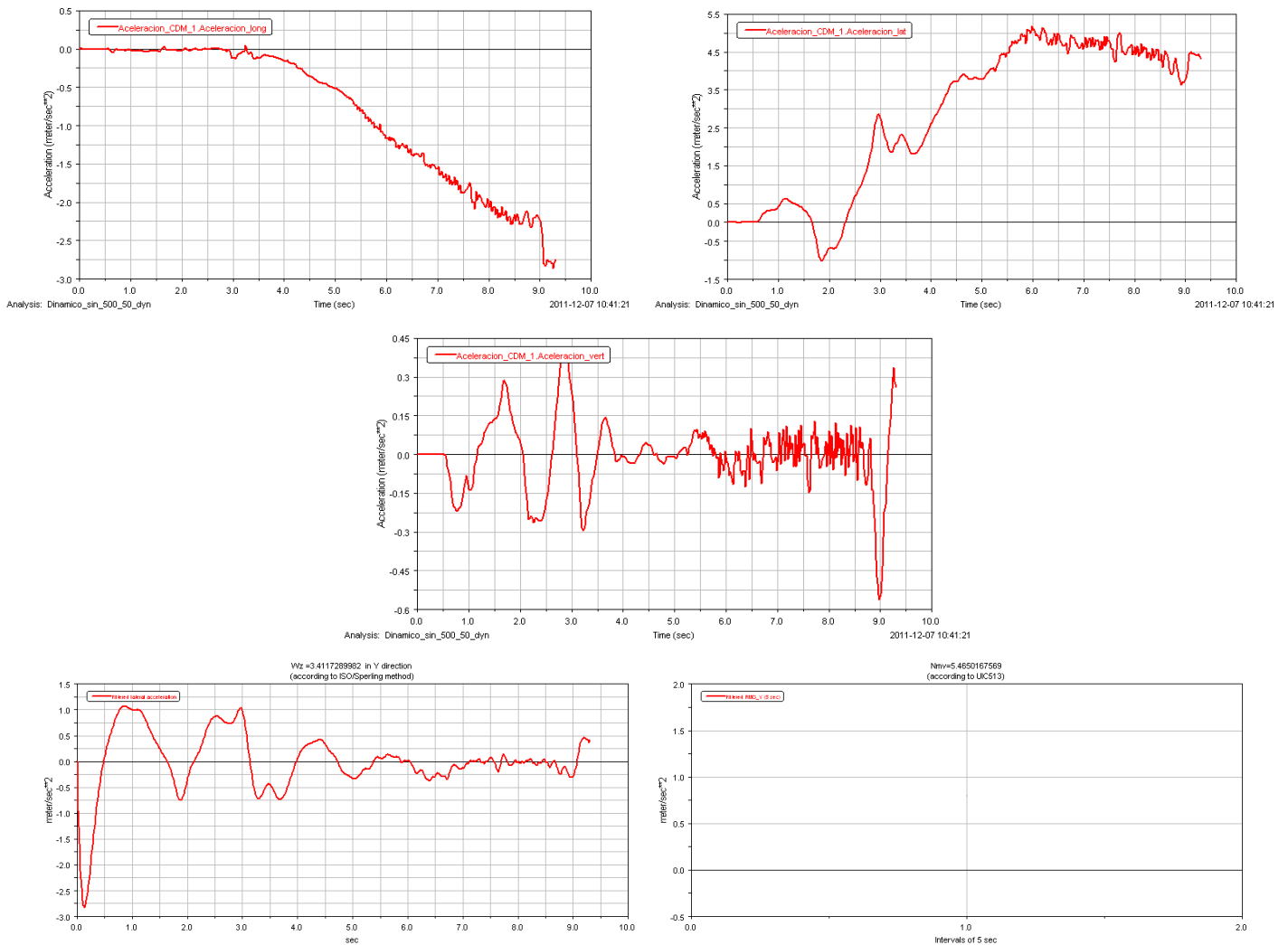


Figura 6.27. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 50 para 1 vagón.

6.2 Simulaciones para dos vagones

A continuación se van a mostrar los resultados obtenidos en las simulaciones en las que el tren cuenta con dos vagones. En este apartado las simulaciones proporcionan 7 gráficas distintas, 3 son las correspondientes a las aceleraciones en las 3 direcciones, 2 son para el índice de confort de Sperling para el primer y segundo vagón y las 2 restantes para el índice de confort de la UIC también para el primer y segundo vagón.

En las gráficas de las aceleraciones se muestran dos líneas, una roja que pertenece al primer vagón mientras que la azul es perteneciente al segundo vagón. Las velocidades comienzan, como en el apartado anterior, en 15 m/s y va aumentando de 10 en 10 m/s, hasta alcanzar el descarrilamiento o superar la escala máxima en algún índice de confort.

En la figura 6.28 se puede observar una imagen tomada desde Adams/Rail en la que se muestra al tren con dos vagones circulando por la curva.

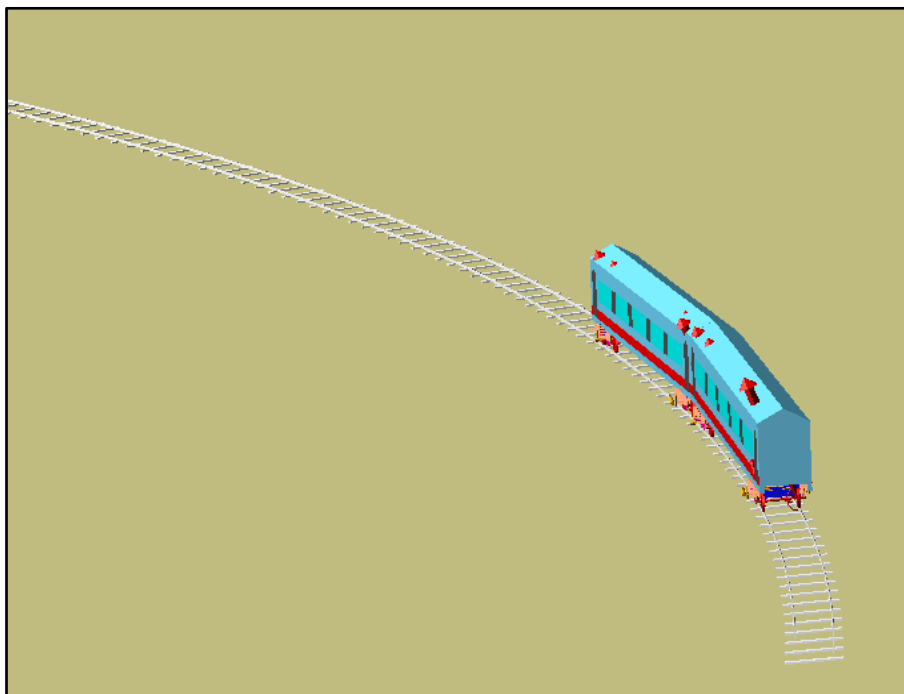


Figura 6.28. Simulación en Adams/Rail de dos vagones.

6.2.1 Curva con 200 metros de radio

6.2.1.1 Velocidad de 15 m/s

Las aceleraciones son prácticamente iguales pero desfasadas un cierto tiempo, ya que el primer vagón llega antes a la que curva que el vagón posterior. En esta simulación los valores máximos alcanzados para las aceleraciones son de -1 m/s^2 (longitudinal), de 0.9 m/s^2 (lateral) y de -0.05 m/s^2 (vertical). En cuanto a los índices de confort, para el primer vagón se alcanza un valor de 1.32 (Sperling) y de 0.75 (UIC), para el segundo vagón se obtiene un valor de 1.39 (Sperling) y de 0.76 (UIC) (Ver figura 6.29).

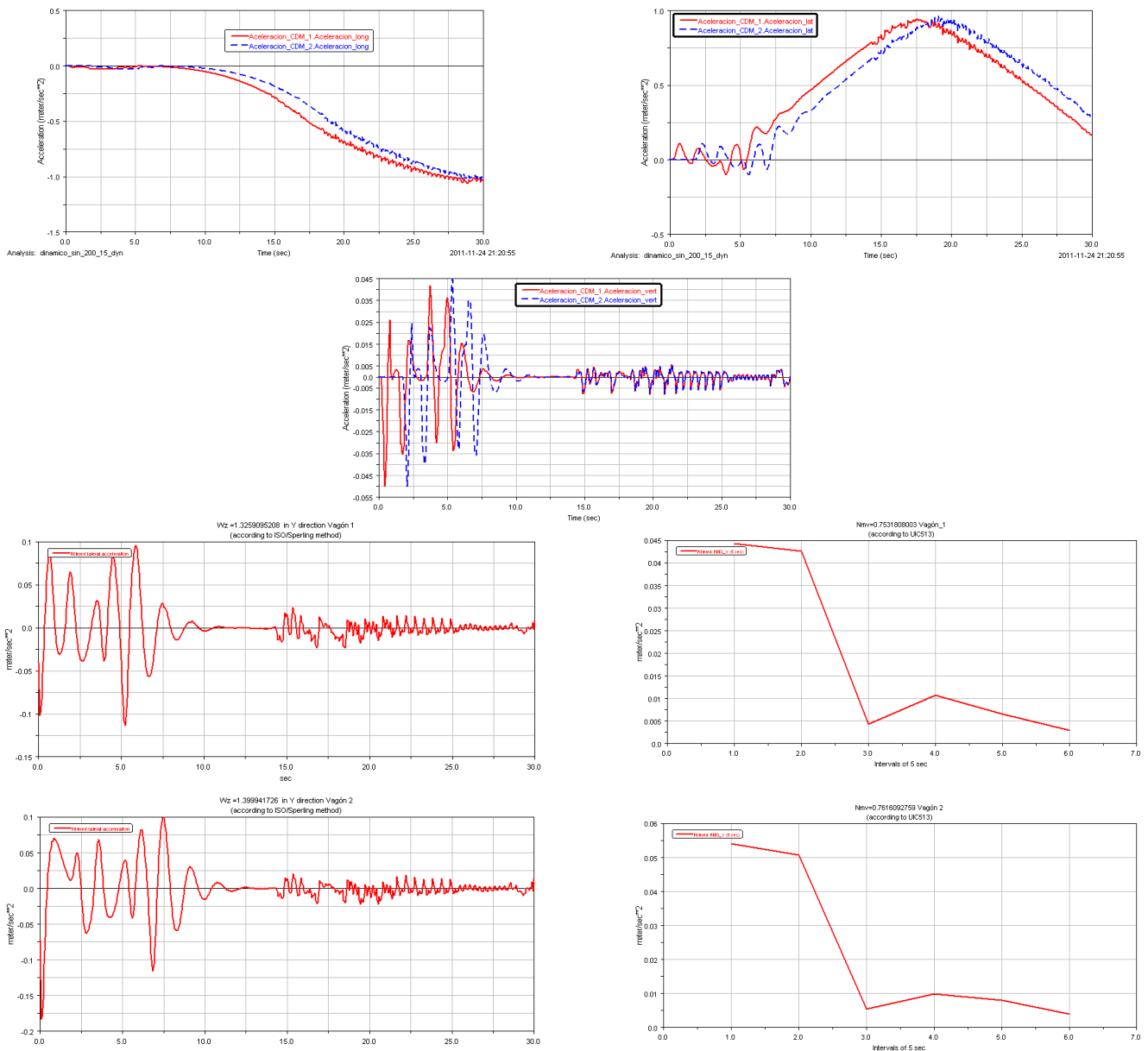


Figura 6.29. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 15 para 2 vagones.

6.2.1.2 Velocidad de 25 m/s

Para esta velocidad, las aceleraciones alcanzan valores de -3 m/s^2 para la longitudinal, de 2.7 m/s^2 para la lateral y de 0.14 m/s^2 para la vertical. Los índices de confort han tomado unos valores de 1.64 con Sperling y de 2.55 con el método de la UIC, ambos para el primer vagón. Los índices para el segundo vagón alcanzan un valor de 1.88 con Sperling y 2.58 para la UIC (Ver figura 2.30).

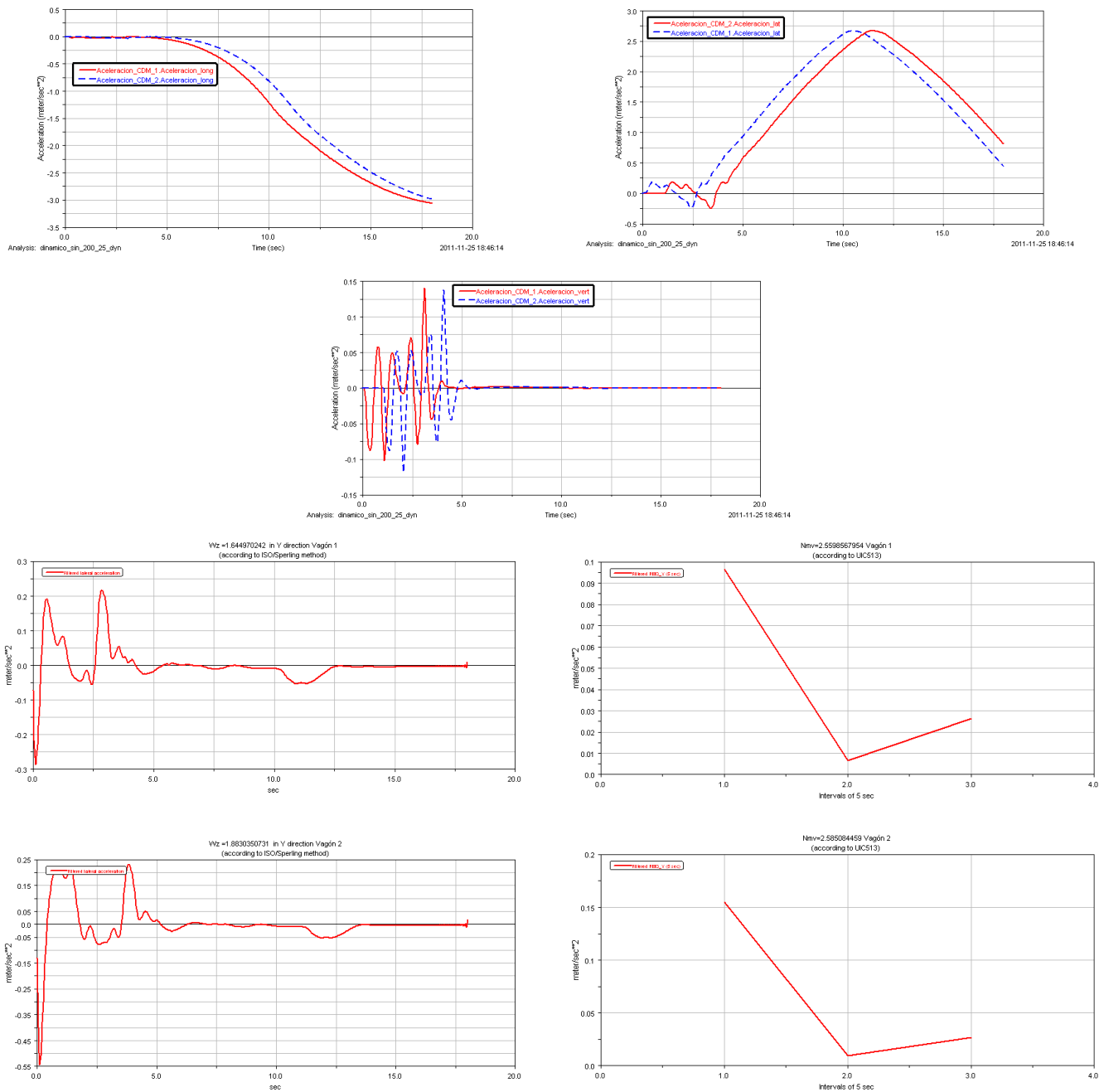


Figura 6.30. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 25 para 2 vagones.

6.2.1.3 Velocidad de 30 m/s

En este caso hay un hecho relevante y es que el tren consigue recorrer la longitud total de la vía sin descarrilar, ya que en la simulación con un vagón sí que descarrilaba. En las gráficas de aceleración se refleja que hay mucha inestabilidad a la hora de tomar la curva, pero no es suficiente para hacerlo descarrilar. La aceleración longitudinal toma un valor de -4.5 m/s^2 , la aceleración lateral de 4.1 m/s^2 y la vertical de 0.23 m/s^2 . Para el primer vagón los índices de confort son 1.98 (Sperling) y 3.68 (UIC) y para el segundo vagón los índices son 2.20 (Sperling) y 3.70 (UIC) (Ver figura 6.31).

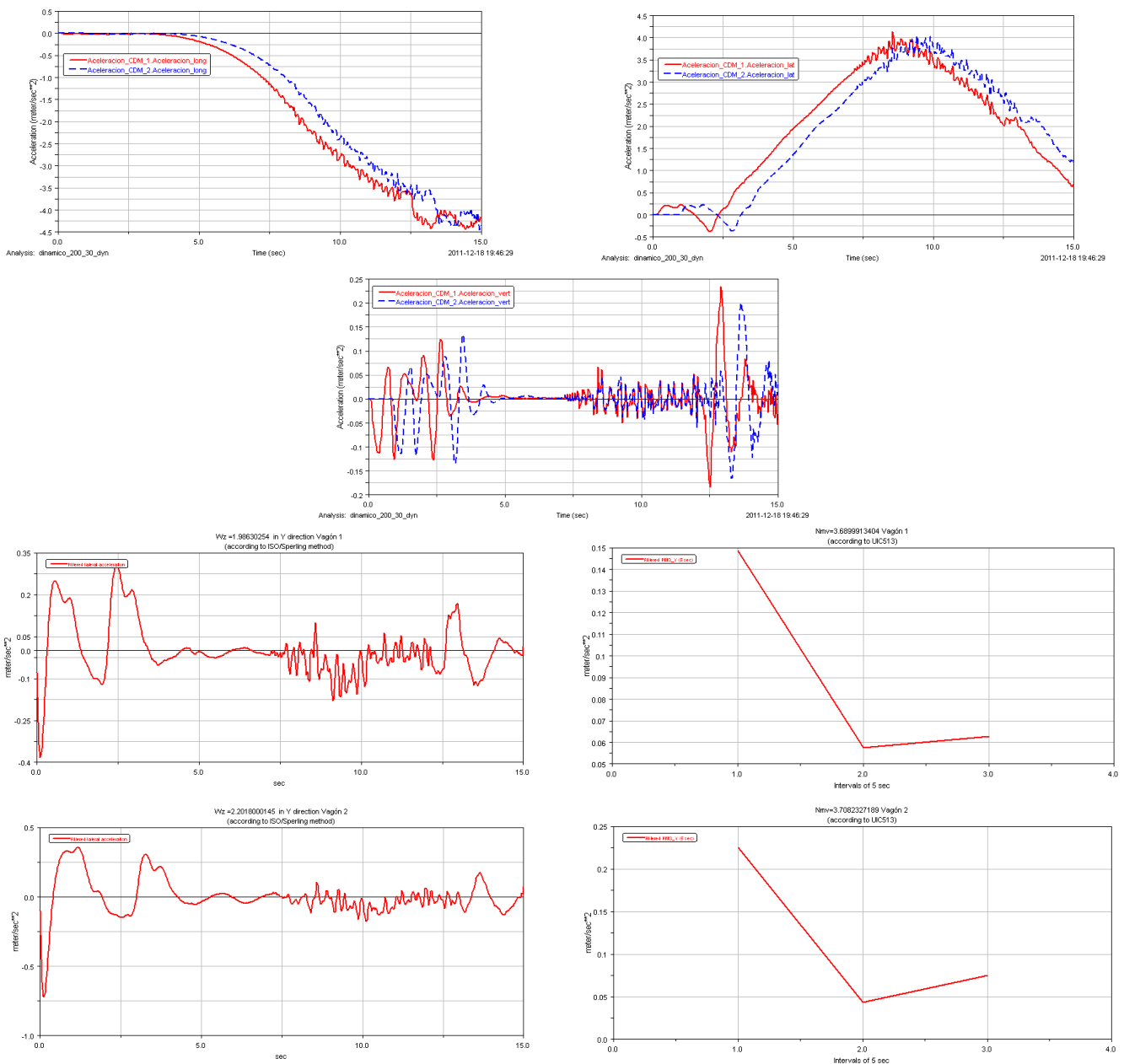


Figura 6.31. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 30 para 2 vagones.

6.2.1.4 Velocidad de 35 m/s

A esta velocidad ya sí que el tren termina descarrilando. En la figura 6.32 se observa que, aunque el tren descarrile, los índices de confort no todos llegan a superar el valor más alto en sus escalas, solo lo hace el índice de la UIC del segundo vagón. En este caso los valores alcanzados por los índices de confort son, para el primer vagón, 3.18 (Sperling) y 4.23 (UIC), y para el segundo vagón son 3.43 (Sperling) y 5.29 (UIC).

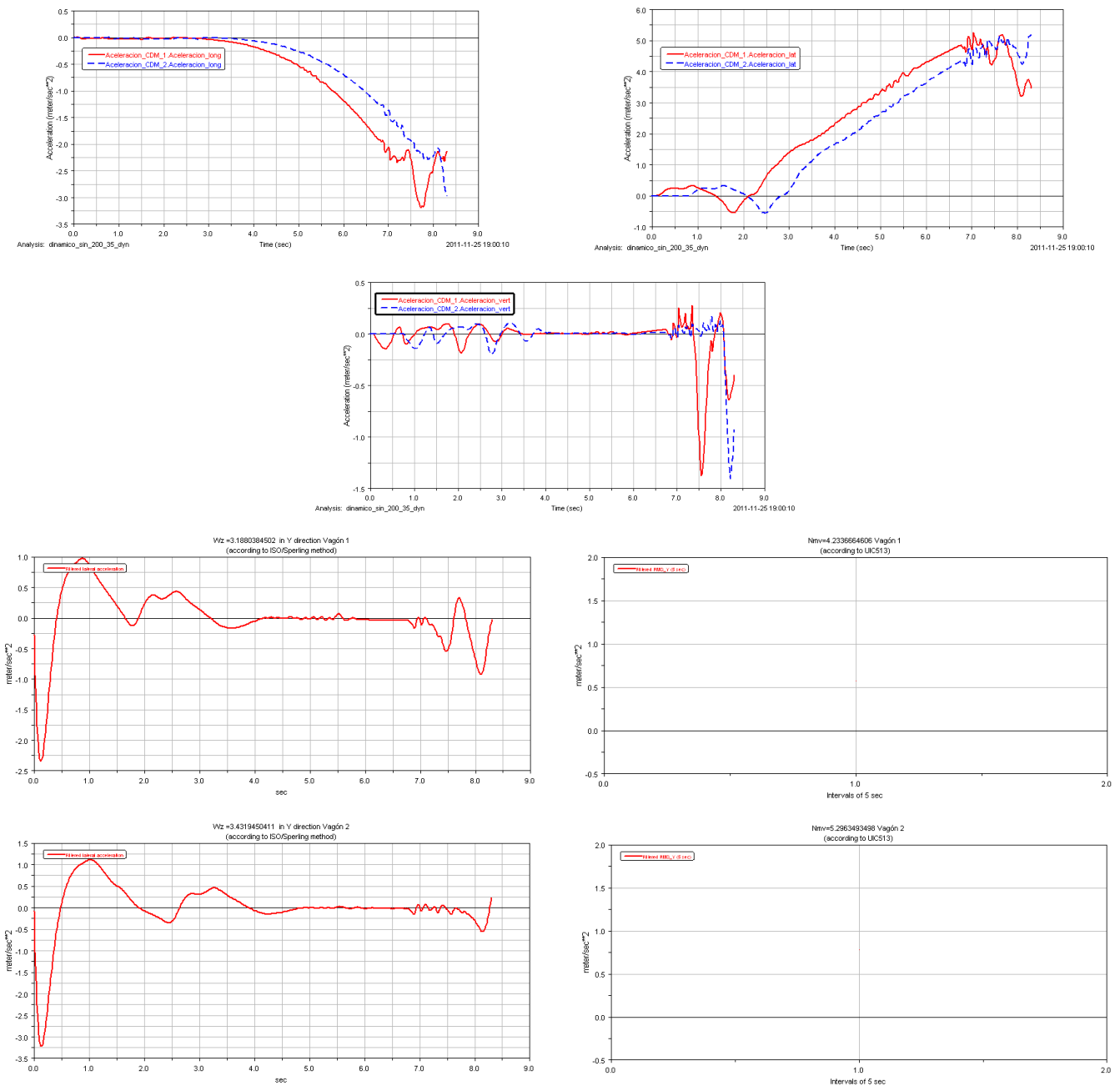


Figura 6.32. Aceleración y confort. Curva 200, velocidad 35 para 2 vagones.

6.2.2 Curva con 300 metros de radio

6.2.2.1 Velocidad de 15 m/s

Para esta velocidad las aceleraciones máximas alcanzadas por el tren son, para la longitudinal de -0.55 m/s^2 , para la lateral de 0.67 m/s^2 y para la vertical de -0.05 m/s^2 . Con respecto a los índices de confort, se observa que al ser una velocidad baja los índices también lo son. Para el primer vagón Sperling alcanza 1.43 y el método desarrollado por la UIC 0.54, para el segundo vagón se obtiene para Sperling un valor de 1.49 y para la UIC un valor de 0.56 (Ver figura 6.33).

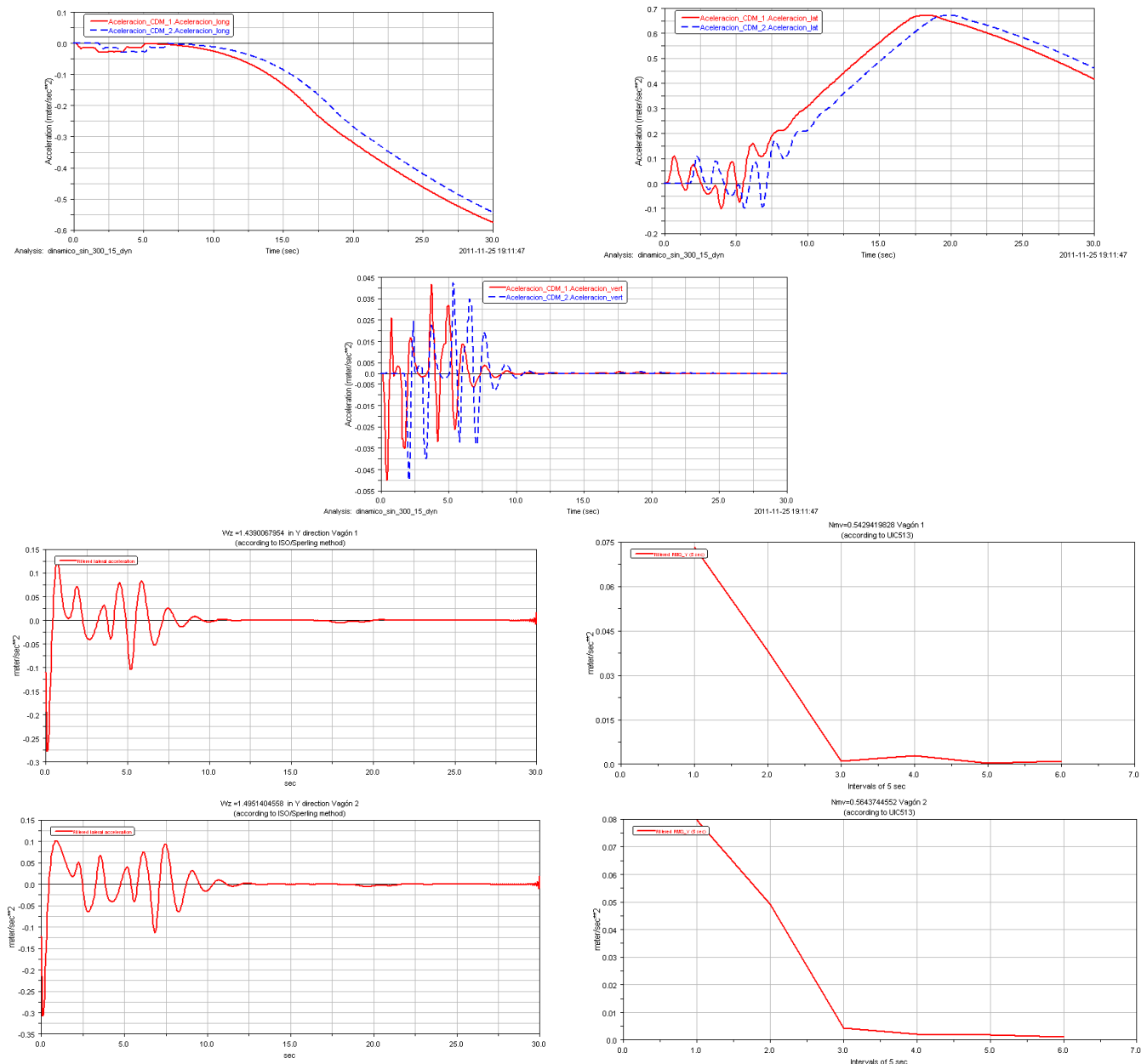


Figura 6.33. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 15 para 2 vagones.

6.2.2.2 Velocidad de 25 m/s

Por los resultados que se han ido obteniendo, se comprueba que el vagón trasero obtiene valores más altos que el delantero, pero siempre muy parejos. Los máximos alcanzados por las aceleraciones son de -1.65 m/s^2 (longitudinal), de 1.8 m/s^2 (lateral) y de 0.13 m/s^2 (vertical). En cuanto a los índices de confort se observa que Sperling marca en el primer vagón 1.99 y en el segundo 2.10 y que el valor del índice de la UIC alcanza 1.67 en el primer vagón y 1.72 en el segundo. En la figura 6.34 se observan las gráficas de las aceleraciones y de los niveles de confort.

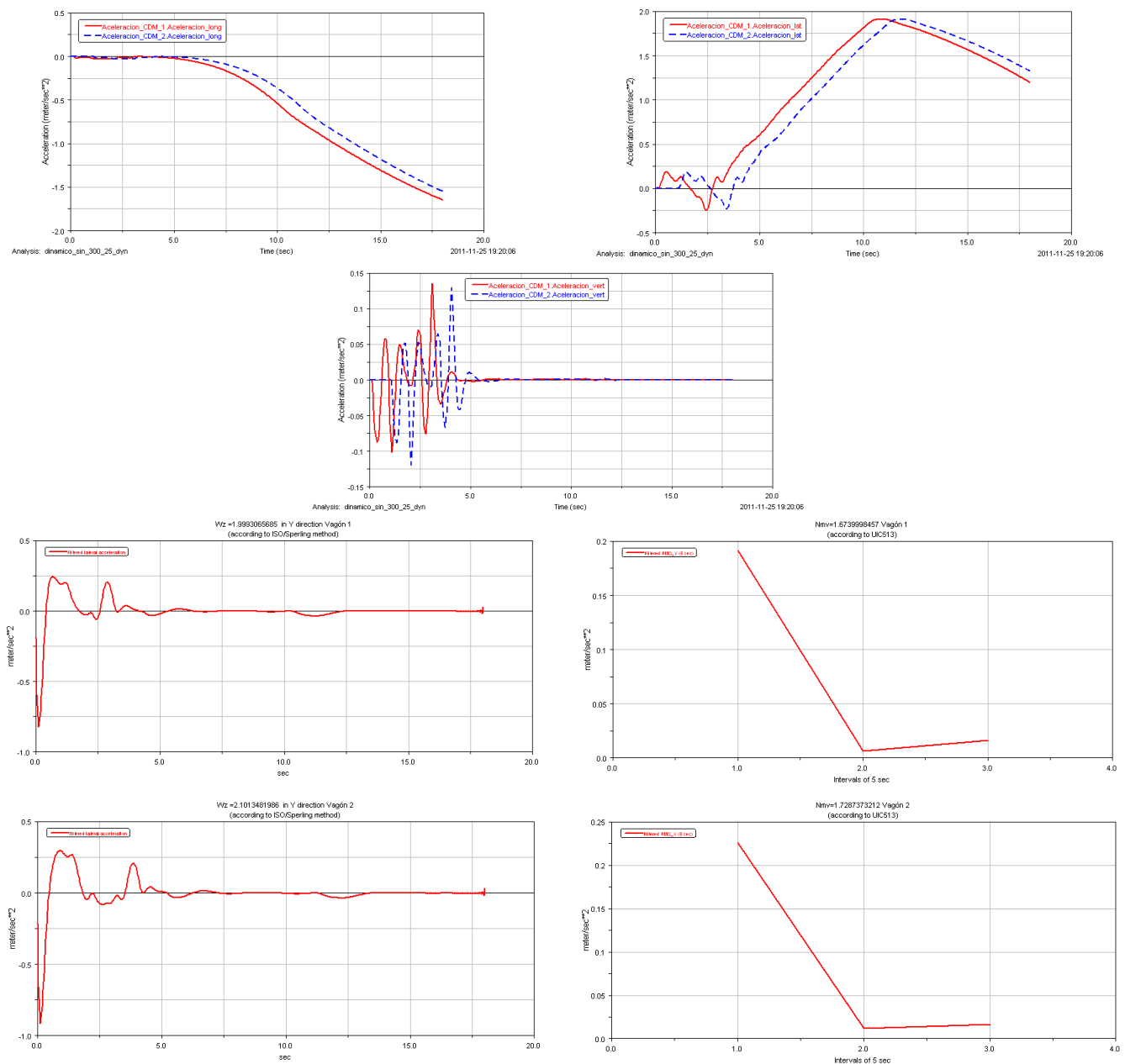


Figura 6.34. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 25 para 2 vagones.

6.2.2.3 Velocidad de 35 m/s

En este caso en el que la velocidad es alta, se observa como al final del tiempo de simulación las aceleraciones se vuelven muy inestables, aun así el tren no descarrila ni alcanza el valor más alto en las escalas de los índices. La aceleración longitudinal alcanza un valor de -3.3 m/s^2 , la lateral de 4 m/s^2 y la vertical de -0.17 m/s^2 . Para el primer vagón Sperling se eleva a 2.62 y el índice de la UIC a 3.56, y para el segundo vagón se obtiene para Sperling un valor de 2.74 y para la UIC un valor de 3.69 (Ver figura 6.35).

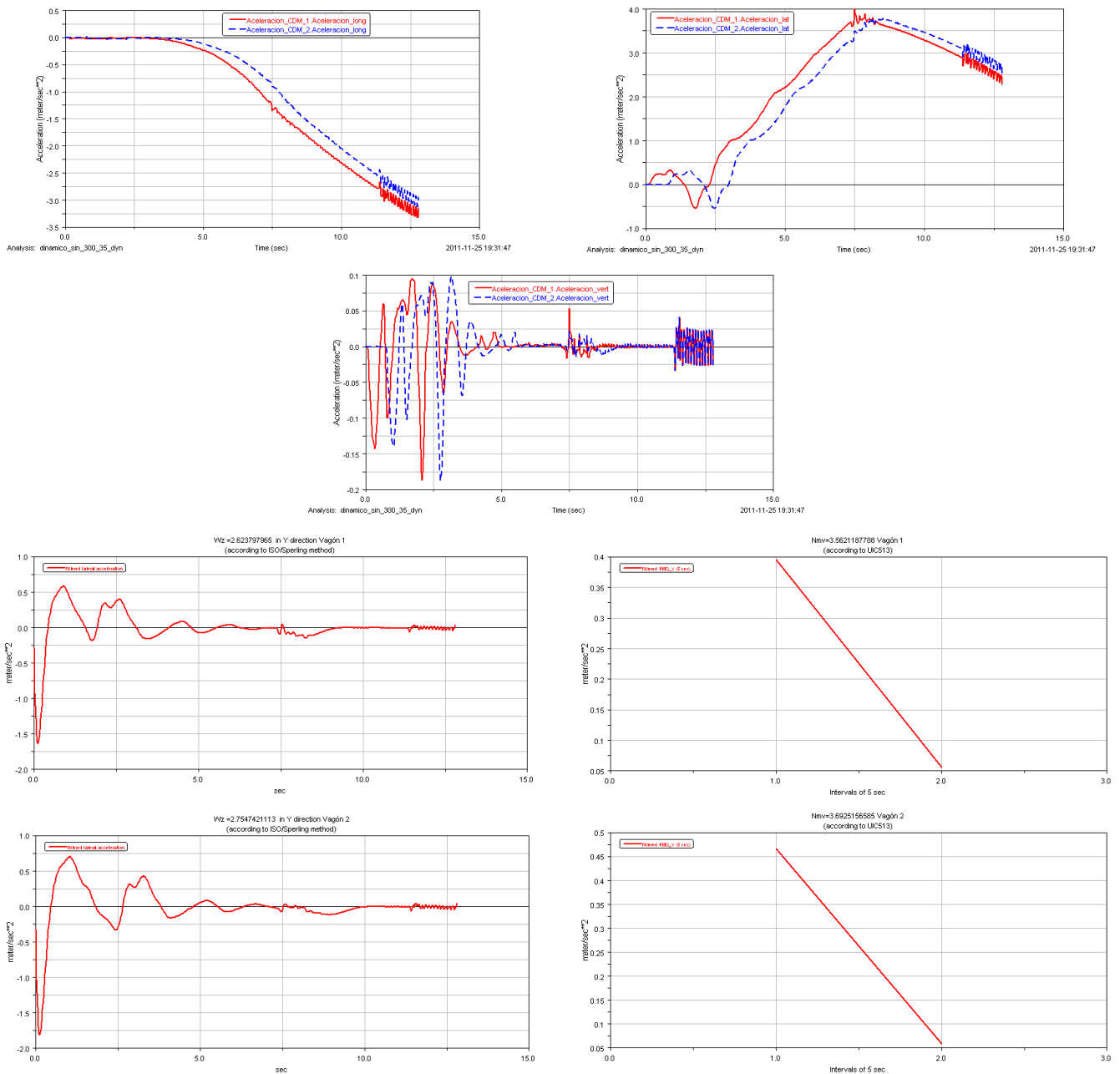


Figura 6.35. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 35 para 2 vagones.

6.2.2.4 Velocidad de 40 m/s

Para esta velocidad el tren descarrila en mitad de la curva. Se observa en la figura 6.36 como en la parte final de las gráficas de aceleración el tren sufre varias sacudidas. Los índices de confort son bastante elevados pero ninguno de ellos alcanza el valor máximo de su escala, alcanzando para el primer vagón 3.21 con Sperling y 4.2 con el método de la UIC, mientras que para el segundo vagón se alcanzan los 3.39 mediante Sperling y 4.86 con el índice de la UIC.

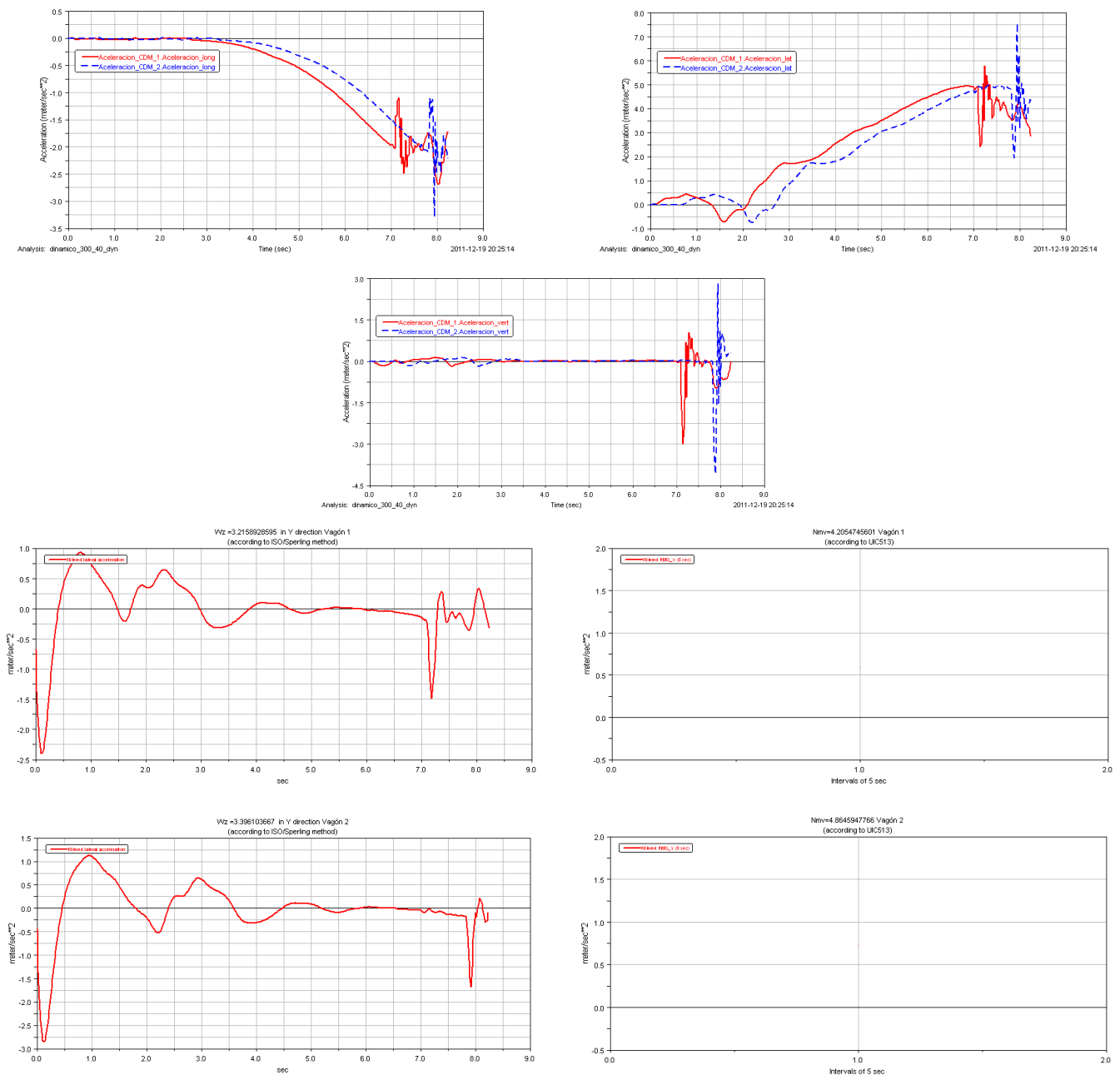


Figura 6.36. Aceleración y confort. Curva 300, velocidad 40 para 2 vagones.

6.2.3 Curva con 400 metros de radio

6.2.3.1 Velocidad de 15 m/s

En este caso de velocidad baja, las aceleraciones también son bajas, alcanzando para la aceleración longitudinal un valor máximo de -0.36 m/s^2 , para la aceleración lateral de 0.53 m/s^2 y para la aceleración vertical se alcanza un valor de -0.05 m/s^2 . Los índices de confort, tanto en el primer como en el segundo vagón, también van a ser bajos, obteniéndose en este caso para el primer vagón un índice de Sperling de 1.44 y para la UIC de 0.45, mientras que para el segundo vagón Sperling llega a 1.48 y la UIC a 0.47 (Ver figura 6.37).

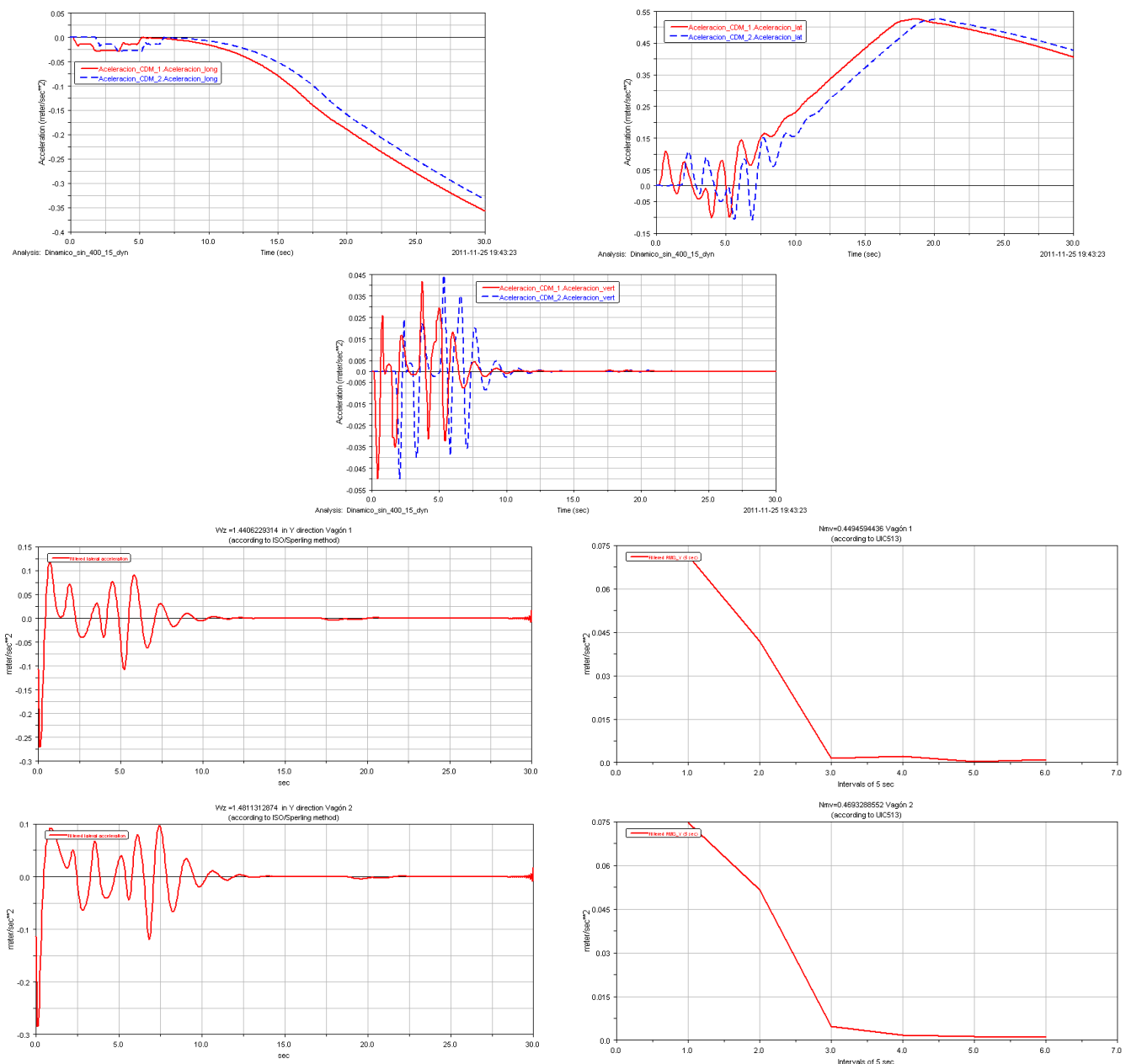


Figura 6.37. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 15 para 2 vagones.

6.2.3.2 Velocidad de 25 m/s

Para esta velocidad se alcanzan valores pico en la aceleración longitudinal de -1 m/s^2 , en la lateral de 1.5 m/s^2 y en la vertical de 0.13 m/s^2 . En cuanto a los índices de confort, se obtiene para el primer vagón un valor de 1.98 para Sperling y de 1.26 para la UIC. Con respecto al segundo vagón se obtiene un valor de 2.05 para Sperling y un valor de 1.33 para el método desarrollado por la UIC. En la figura 6.38 se muestran las gráficas de las aceleraciones y de los índices de confort.

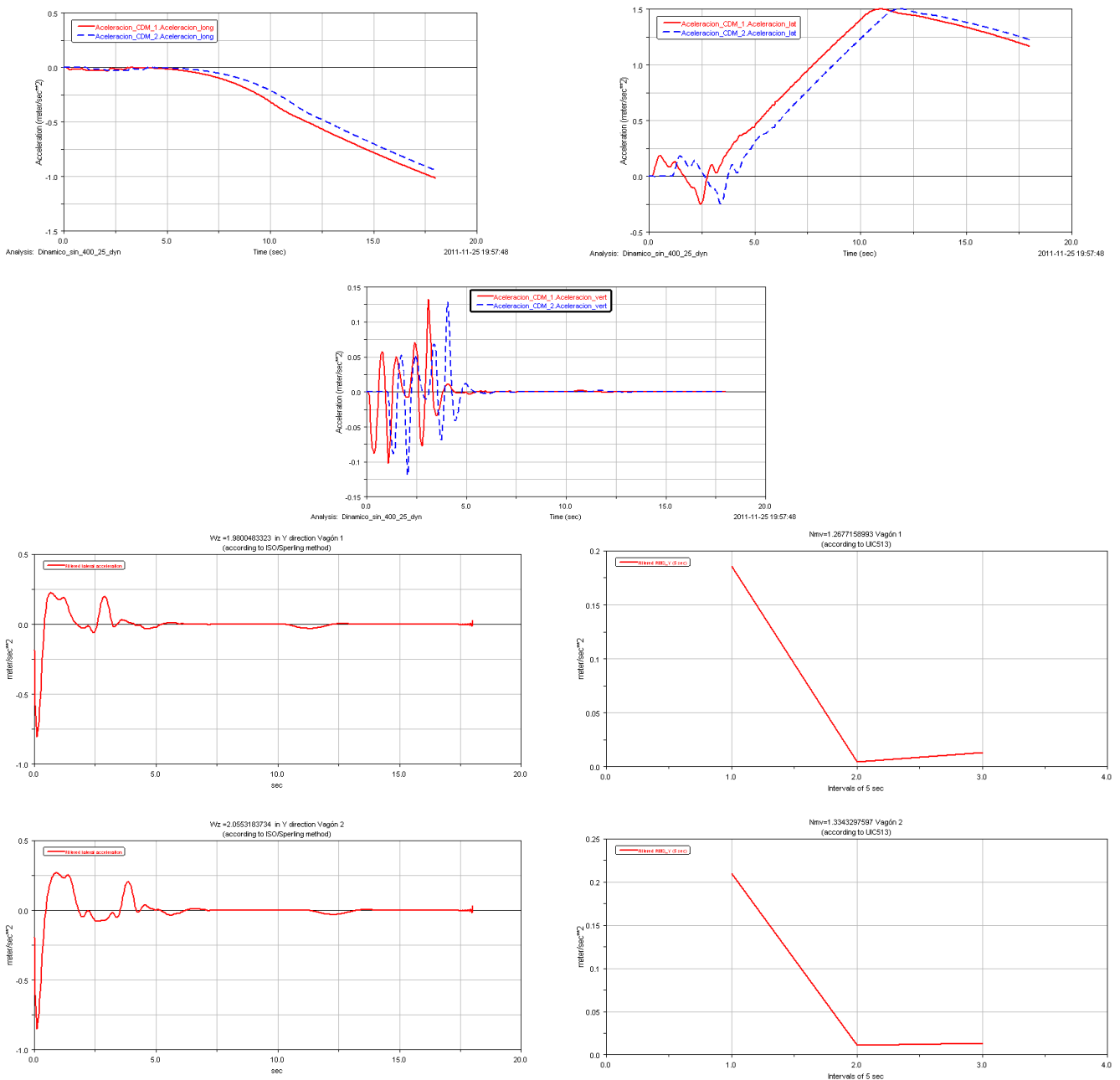


Figura 6.38. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 25 para 2 vagones.

6.2.3.3 Velocidad de 35 m/s

Para esta velocidad se observa cómo se registran pequeñas sacudidas al final de la simulación, señal de que la velocidad ya es considerablemente alta. Se alcanzan valores máximos en la aceleración de -2.2 m/s^2 (longitudinal), de 3 m/s^2 (lateral) y de -0.17 m/s^2 (vertical). Con referencia a los índices de confort, el primer vagón marca un valor de 2.58 con Sperling y un valor de 2.67 con la UIC. El segundo vagón alcanza un valor de 2.68 con Sperling mientras que la UIC marca un nivel de confort de 2.83 (Ver figura 6.39).

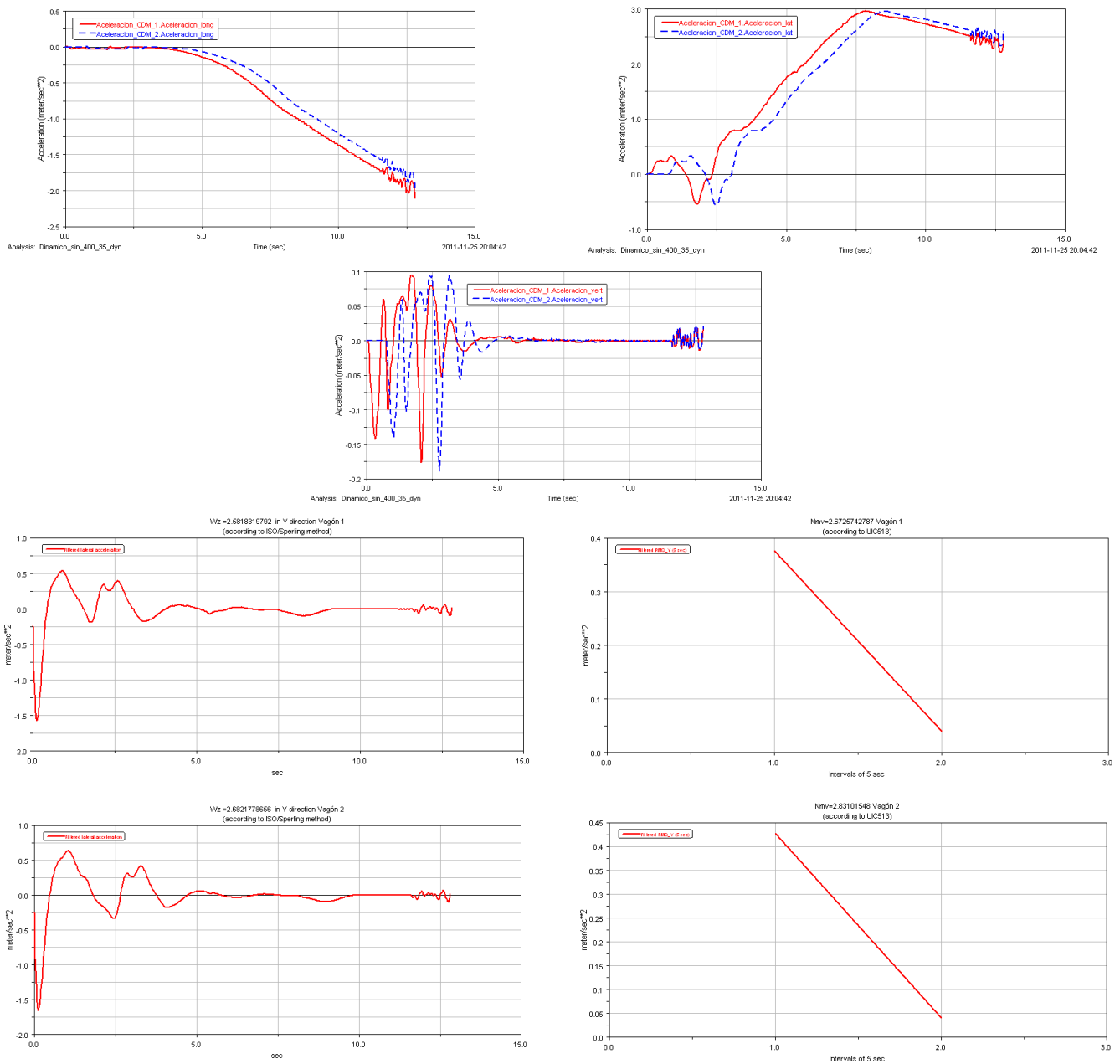


Figura 6.39. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 35 para 2 vagones.

6.2.3.4 Velocidad de 45 m/s

En este caso las inestabilidades se hacen más grandes y se producen antes, pero todavía no se alcanzan los valores más altos en las escalas de los índices de confort y el tren no descarrila. La aceleración longitudinal alcanza -3.2 m/s^2 , la lateral alcanza los 5.5 m/s^2 y la vertical un valor de -0.6 m/s^2 . Los índices de Sperling marcan 3.04 para el primer vagón y 3.23 para el segundo. El índice utilizado por la Unión Internacional del Ferrocarril marca 3.75 en el primer vagón, mientras que para el segundo alcanza 4.63. Se observa como el segundo vagón tiene un índice de confort mayor que el primero (Ver figura 6.40).

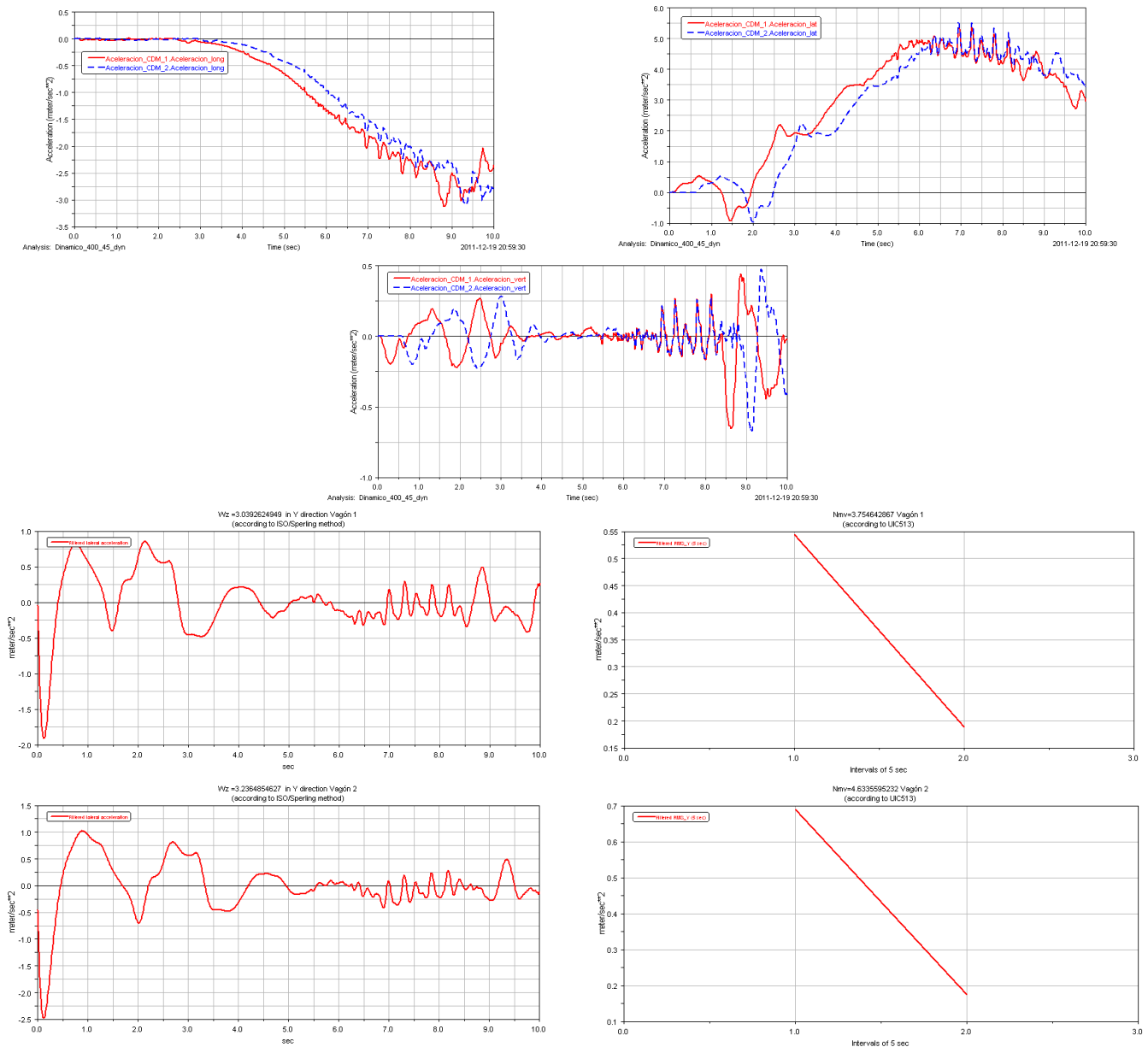


Figura 6.40. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 45 para 2 vagones.

6.2.3.5 Velocidad de 50 m/s

Aquí las inestabilidades se vuelven altas y el tren termina descarrilando al poco de iniciar el trazado curvo, por tanto no tiene demasiado sentido decir los valores máximos de las aceleraciones ya que el descarrilamiento es el grado más alto. En cuanto a los índices de confort se observa que el método de la UIC supera el valor más alto de su escala, alcanzando 5.60 en el primer vagón y 5.98 en el segundo. El índice Sperling no alcanza el nivel más alto en su escala pero también obtiene un valor alto, con 3.75 en el primer vagón y 3.84 en el segundo. En la figura 6.41 se muestran las gráficas de las aceleraciones e índices de confort hasta el momento del descarrilamiento.

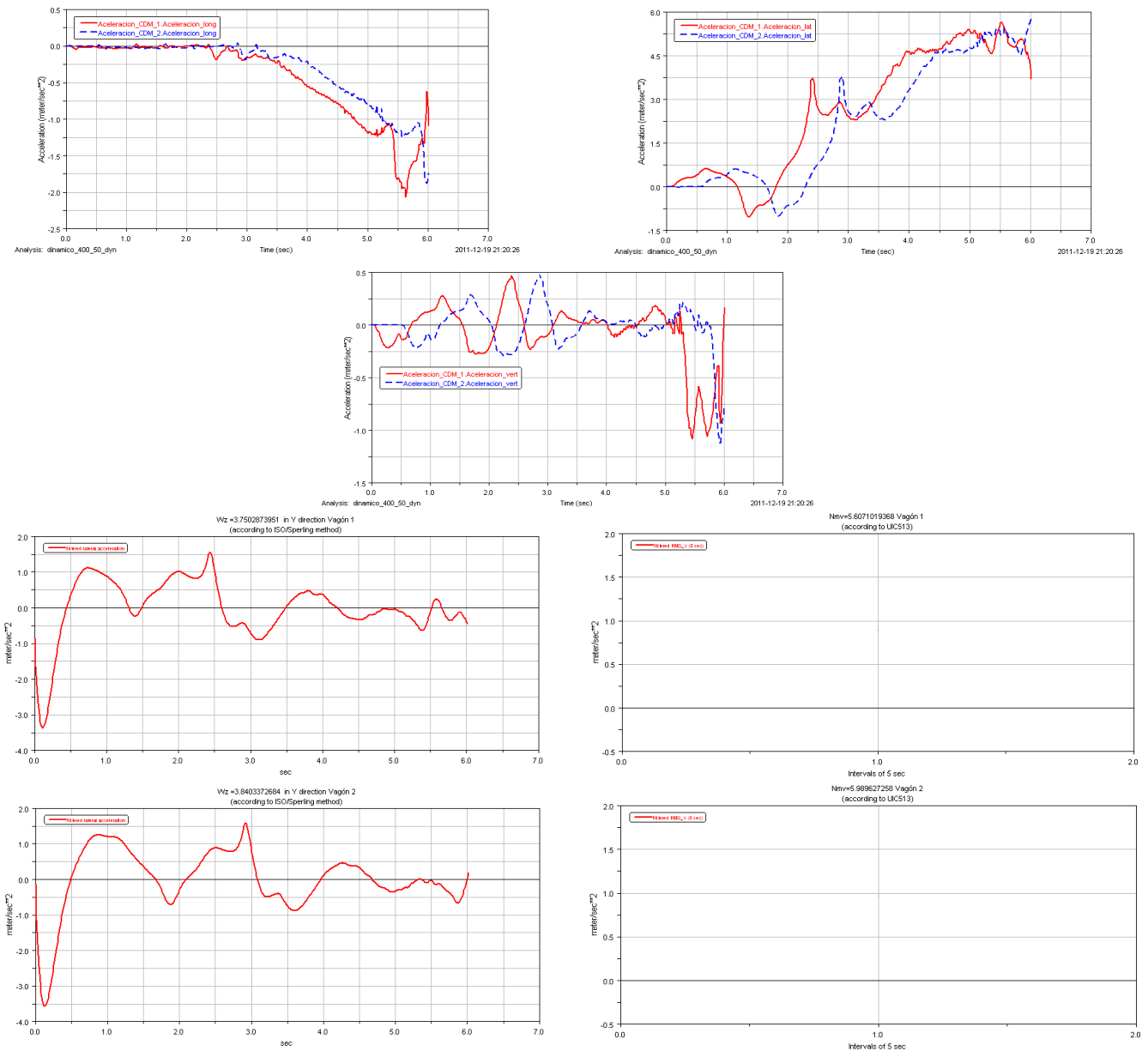


Figura 6.41. Aceleración y confort. Curva 400, velocidad 50 para 2 vagones.

6.2.4 Curva con 500 metros de radio

6.2.4.1 Velocidad de 15 m/s

El vagón trasero sufre una sacudida al comenzar la curva, lo que debe producirse por algún fallo del programa ya que, la velocidad es baja y el radio de curvatura grande. Las aceleraciones máximas se marcan en la sacudida con un valor de -0.65 m/s^2 (longitudinal), de 0.55 m/s^2 (lateral) y de 0.75 m/s^2 (vertical). El índice Sperling marca un valor de 1.40 en el primer vagón y un valor de 1.63 en el segundo, mientras que la UIC toma un valor de 0.38 para el primer vagón y un valor de 0.69 para el segundo. Los índices de confort también reflejan la sacudida sobre el vagón trasero (Ver figura 6.42).

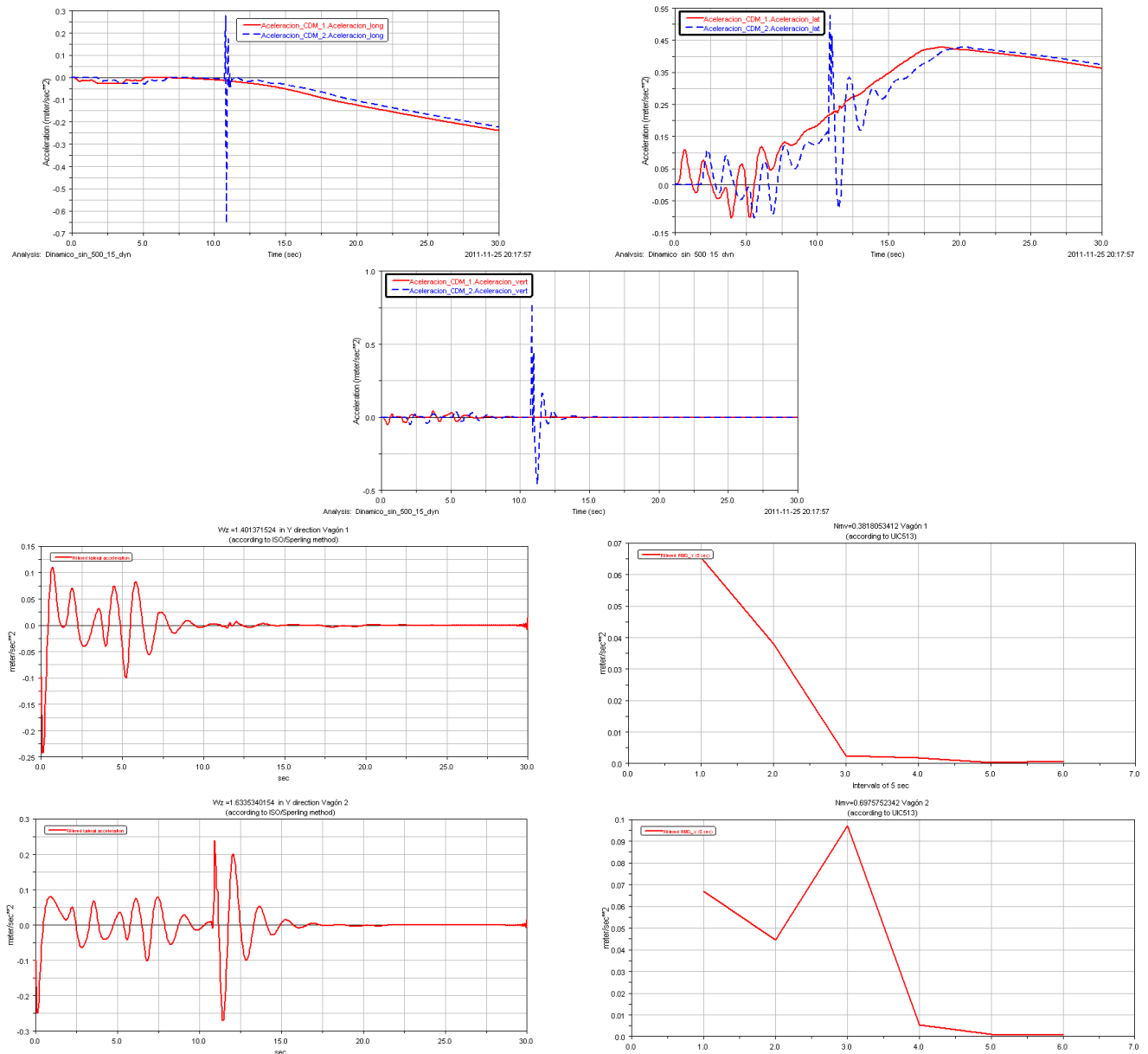


Figura 6.42. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 15 para 2 vagones.

6.2.4.2 Velocidad de 25 m/s

En este caso no se refleja ningún tipo de sacudida, de este modo las aceleraciones marcan máximos de -0.65 m/s^2 en la longitudinal, de 1.25 m/s^2 en la lateral y de 0.13 m/s^2 en la vertical. En referencia a los índices de confort se puede decir que son bajos, por tanto el transitar por esta curva a una velocidad de 25 m/s no debe suponer ningún tipo de sufrimiento para el usuario. Sperling marca un valor de 1.91 y 1.98 para el primer y segundo vagón respectivamente, y la UIC establece un valor de 1.01 en el primer vagón y un valor 1.09 para el segundo (Ver figura 6.43).

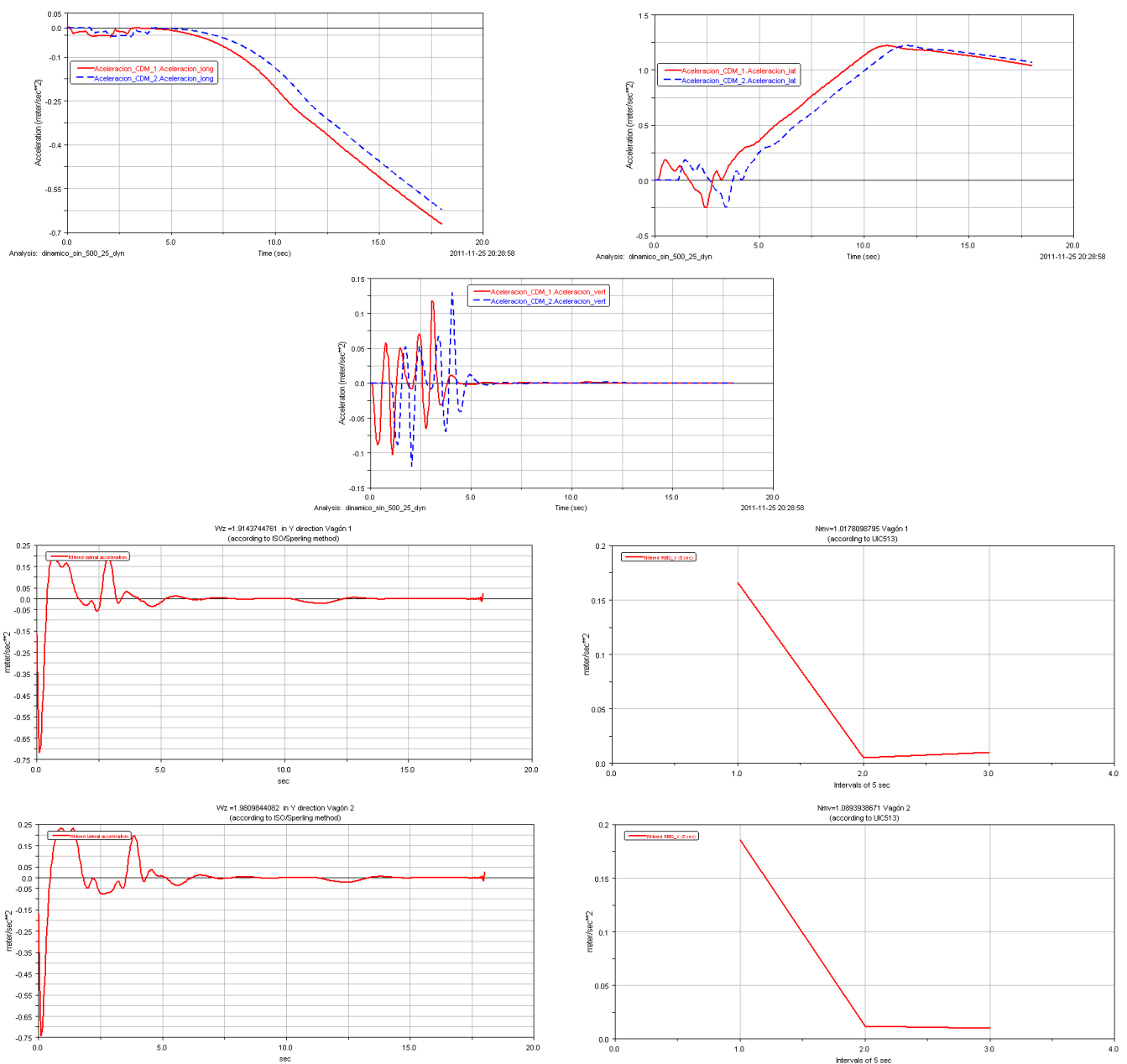


Figura 6.43. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 25 para 2 vagones.

6.2.4.3 Velocidad de 35 m/s

Las aceleraciones máximas alcanzadas para esta velocidad son de -1.3 m/s^2 para la longitudinal, de 2.4 m/s^2 para la lateral y de -0.17 m/s^2 para la vertical. Los índices de confort se pueden considerar bajos teniendo en cuenta la velocidad de circulación. El índice Sperling marca 2.49 para el primer vagón y 2.59 para el segundo, mientras que, el nivel de confort registrado por la UIC alcanza un valor de 2.15 en el primer vagón y de 2.34 en el segundo (Ver figura 6.44).

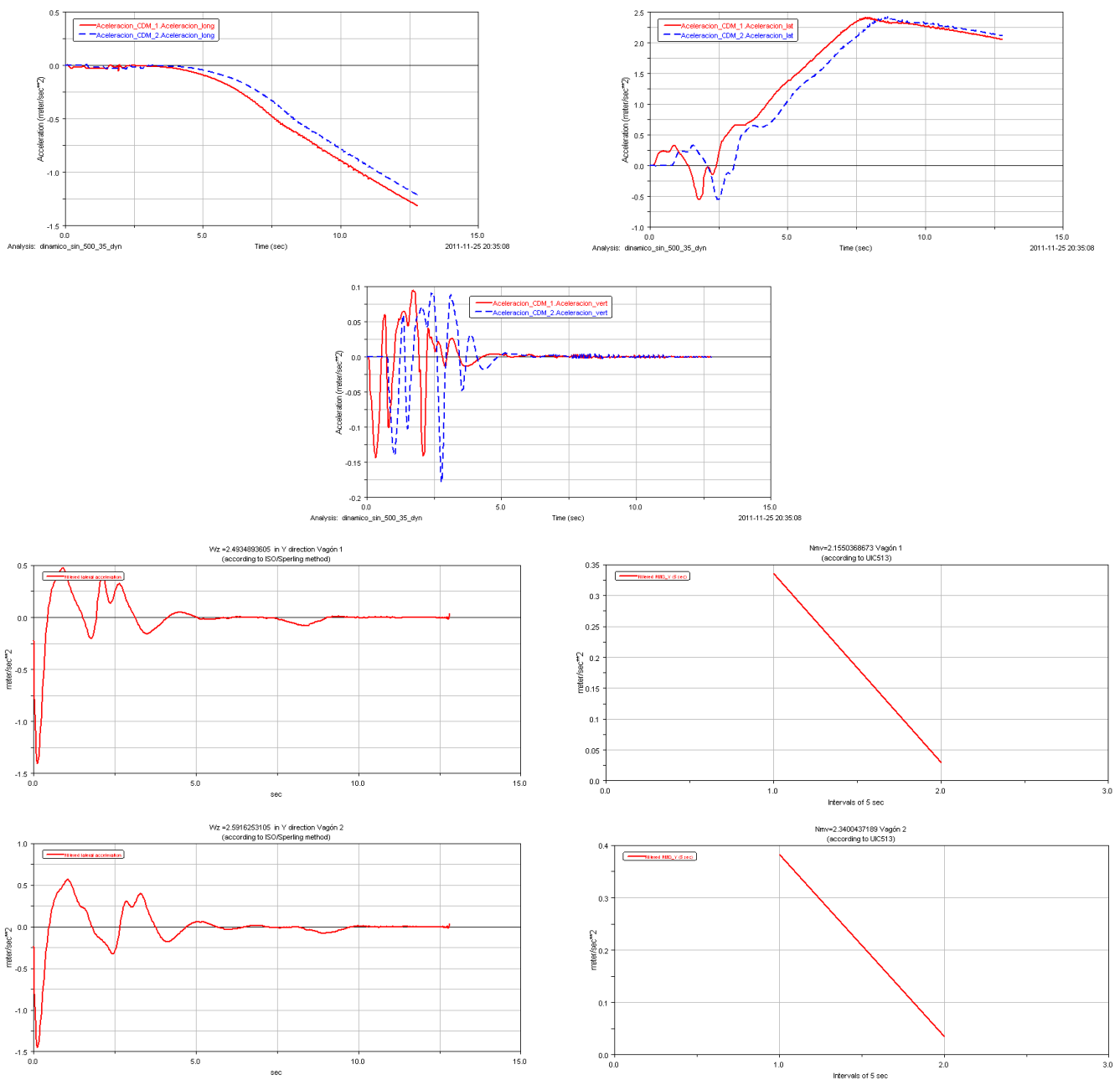


Figura 6.44. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 35 para 2 vagones.

6.2.4.4 Velocidad de 45 m/s

Para esta velocidad se observa como, a pesar de que es una velocidad alta, las aceleraciones no presentan inestabilidades y los índices de confort no son muy elevados con respecto a los que se obtiene a esta misma velocidad pero con radios más pequeños. Se obtienen unos valores máximos en la aceleraciones de -2.2 m/s^2 (longitudinal), de 4 m/s^2 (lateral) y de 0.25 m/s^2 (vertical). Spurling marca 3.06 y 3.15 para el primer y segundo vagón respectivamente, y la UIC alcanza 3.74 para el primer vagón y 3.98 para el segundo (Ver figura 3.45).

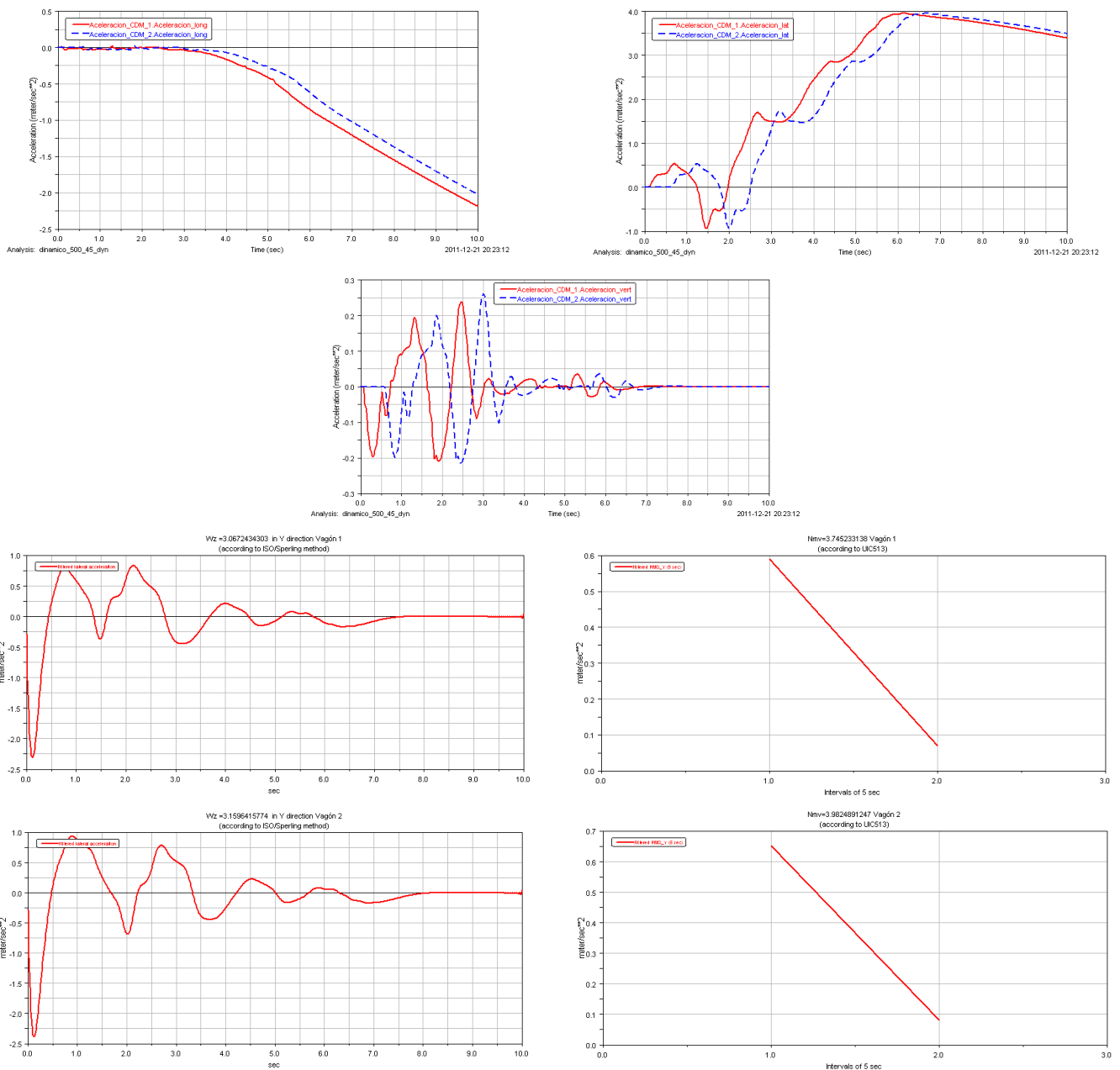


Figura 6.45. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 45 para 2 vagones.

6.2.4.5 Velocidad de 50 m/s

Se observan inestabilidades en las aceleraciones debidas a la alta velocidad, además se percibe también una sacudida en el final de la simulación. Las aceleraciones máximas alcanzadas son de -2.8 m/s^2 para la longitudinal, de 5 m/s^2 para la lateral y de -0.53 m/s^2 para la vertical. En cuanto a los índices de confort, Sperling marca en el primer vagón un valor de 3.37 y en el segundo 3.42, mientras que la UIC alcanza 5.23 en el vagón delantero y 5.30 en trasero. El valor del nivel de confort de la UIC supera el valor más alto en su escala, por tanto esta es la velocidad mayor a la que se realizará una simulación con estas condiciones de radio de curvatura.

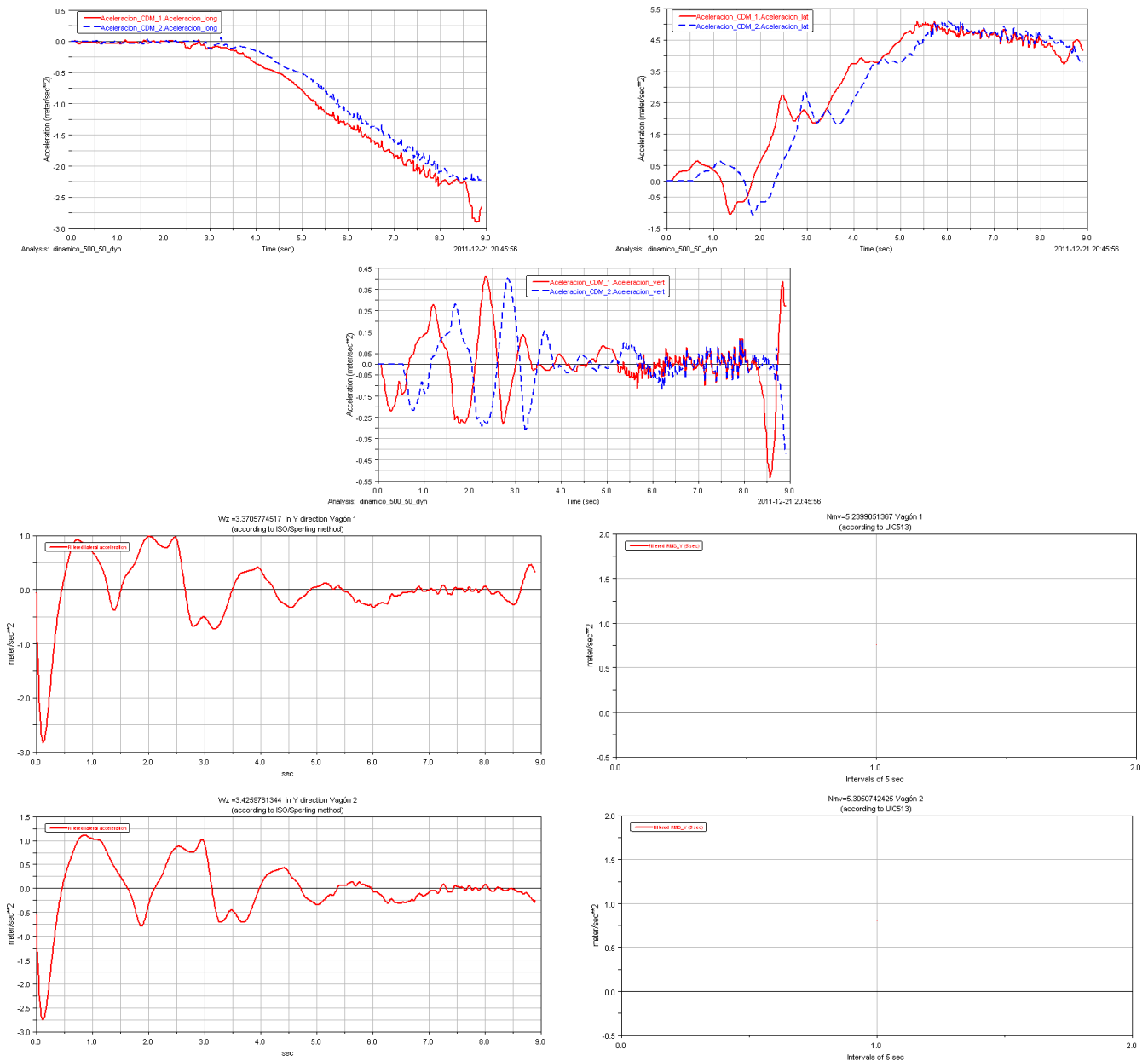


Figura 6.46. Aceleración y confort. Curva 500, velocidad 50 para 2 vagones.

6.3 Comparativa de resultados

En este apartado se muestra una comparativa con los resultados obtenidos. En la tabla 6.1 se indican los valores de los índices de confort de Sperling y de la UIC para un vagón, con el correspondiente valor de su escala.

1 VAGÓN					
CURVA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÍNDICE DE SPERLING		ÍNDICE DE LA UIC	
		VALOR	ESCALA	VALOR	ESCALA
200					
	15	1.44	Ligeramente perceptible	0.82	Muy cómodo
	20	1.54	Ligeramente perceptible	1.54	Cómodo
	25	1.87	Ligeramente perceptible	2.58	Medio
	30	2.53	No desagradable y soportable (Descarrilamiento)	3.83	Medio
300					
	15	1.44	Ligeramente perceptible	0.55	Muy cómodo
	20	1.73	Ligeramente perceptible	1.05	Cómodo
	25	2.02	Netamente perceptible	1.72	Cómodo
	30	2.42	Netamente perceptible	2.51	Medio
	35	2.65	No desagradable y soportable	3.65	Medio
	40	3.08	Poco agradable pero soportable (Descarrilamiento)	4.16	Incómodo
400					
	15	1.44	Ligeramente perceptible	0.46	Muy cómodo
	20	1.72	Ligeramente perceptible	0.82	Muy cómodo
	25	2.01	Netamente perceptible	1.32	Cómodo
	30	2.34	Netamente perceptible	1.95	Cómodo
	35	2.62	No desagradable y soportable	2.83	Medio
	40	2.93	No desagradable y soportable	3.76	Medio
	45	3.09	Poco agradable pero soportable	3.97	Medio
	50	3.72	Extremadamente incómodo y no soportable mucho tiempo	5.63	Muy incómodo

1 VAGÓN					
CURVA (m)	VELOCIDAD (m/s)	ÍNDICE DE SPERLING		ÍNDICE DE LA UIC	
		VALOR	ESCALA	VALOR	ESCALA
500					
	15	1.41	Ligeramente perceptible	0.39	Muy cómodo
	20	1.67	Ligeramente perceptible	0.69	Muy cómodo
	25	1.94	Ligeramente perceptible	1.08	Cómodo
	30	2.26	Netamente perceptible	1.59	Cómodo
	35	2.54	No desagradable y soportable	2.31	Medio
	40	2.84	No desagradable y soportable	3.11	Medio
	45	3.11	Poco agradable pero soportable	3.95	Medio
	50	3.41	Fuertemente incómodo	5.46	Muy incómodo

Tabla 6.1. Resultados de las simulaciones para un vagón.

En la tabla 6.2 se recogen los resultados obtenidos correspondientes a las simulaciones efectuadas con un tren de dos vagones. A continuación, como en la tabla anterior, se muestran los valores de los índices de confort de Sperling y de la Unión Internacional de Ferrocarriles, así como su escala, tanto para el primer vagón como para el segundo.

2 VAGONES						
CURVA (m)	VELOCIDAD (m/s)	VAGÓN	ÍNDICE DE SPERLING		ÍNDICE DE LA UIC	
			VALOR	ESCALA	VALOR	ESCALA
200	15	1	1.32	Ligeramente perceptible	0.75	Muy cómodo
		2	1.39	Ligeramente perceptible	0.76	Muy cómodo
	25	1	1.64	Ligeramente perceptible	2.55	Medio
		2	1.88	Ligeramente perceptible	2.58	Medio
	30	1	1.98	Ligeramente perceptible	3.68	Medio
		2	2.20	Netamente perceptible	3.70	Medio



2 VAGONES						
CURVA (m)	VELOCIDAD (m/s)	VAGÓN	ÍNDICE DE SPERLING		ÍNDICE DE LA UIC	
200			VALOR	ESCALA	VALOR	ESCALA
	35	1	3.18	Poco agradable pero aún soportable (Descarrilamiento)	4.23	Incómodo
		2	3.43	Fuertemente incómodo (Descarrilamiento)	5.29	Muy incómodo
300			VALOR	ESCALA	VALOR	ESCALA
	15	1	1.43	Ligeramente perceptible	0.54	Muy cómodo
		2	1.49	Ligeramente perceptible	0.56	Muy cómodo
	25	1	1.99	Ligeramente perceptible	1.67	Cómodo
		2	2.10	Netamente perceptible	1.72	Cómodo
	35	1	2.62	No desagradable y soportable	3.56	Medio
		2	2.74	No desagradable y soportable	3.69	Medio
	40	1	3.21	Fuertemente incómodo (Descarrilamiento)	4.2	Incómodo
		2	3.39	Fuertemente incómodo (Descarrilamiento)	4.86	Incómodo
400			VALOR	ESCALA	VALOR	ESCALA
	15	1	1.44	Ligeramente perceptible	0.45	Muy cómodo
		2	1.48	Ligeramente perceptible	0.47	Muy cómodo
	25	1	1.98	Ligeramente perceptible	1.26	Cómodo
		2	2.05	Netamente perceptible	1.33	Cómodo
	35	1	2.58	No desagradable y soportable	2.67	Medio
		2	2.68	No desagradable y soportable	2.83	Medio
	45	1	3.04	Poco agradable pero aún soportable	3.75	Medio
		2	3.23	Poco agradable pero aún soportable	4.63	Incómodo
	50	1	3.75	Extremadamente incómodo y no soportable mucho tiempo (Descarrilamiento)	5.60	Muy incómodo

2 VAGONES						
CURVA (m)	VELOCIDAD (m/s)	VAGÓN	ÍNDICE DE SPERLING		ÍNDICE DE LA UIC	
400			VALOR	ESCALA	VALOR	ESCALA
	50	2	3.84	Extremadamente incómodo y no soportable mucho tiempo (Descarrilamiento)	5.98	Muy incómodo
500			VALOR	ESCALA	VALOR	ESCALA
	15	1	1.40	Ligeramente perceptible	0.38	Muy cómodo
		2	1.63	Ligeramente perceptible	0.69	Muy cómodo
	25	1	1.91	Ligeramente perceptible	1.01	Cómodo
		2	1.98	Ligeramente perceptible	1.09	Cómodo
	35	1	2.49	Netamente perceptible	2.15	Medio
		2	2.59	No desagradable y soportable	2.34	Medio
	45	1	3.06	Poco agradable pero aún soportable	3.74	Medio
		2	3.15	Poco agradable pero aún soportable	3.98	Medio
	50	1	3.37	Fuertemente incómodo	5.23	Muy incómodo
		2	3.42	Fuertemente incómodo	5.30	Muy incómodo

Tabla 6.2. Resultados de las simulaciones para dos vagones.

En la tabla 6.1 como en la tabla 6.2 se observa como ambos índices de confort aumentan cuando la velocidad con la que circula el tren también lo hace, esto es debido a que cuando la velocidad es mayor las aceleraciones que soporta el tren también lo son, repercutiendo en el incremento de los índices de confort que se basan en las aceleraciones y vibraciones.

La velocidad máxima alcanzada por el tren sin que este descarrile y sin que supere la escala máxima en alguno de sus índices de confort se establece, para el tren con un vagón, en 45 m/s, es decir, 162 km/h. Esto ocurre para las curvas de 400 y 500 metros de radio de curvatura.

Con los radios de curvatura ocurre lo contrario que con las velocidades ya que para una misma velocidad, si el radio de curvatura es mayor los índices de confort descienden. Se entiende que al circular por curvas con radios pequeños las aceleraciones obtienen valores más altos y por tanto índices de confort también más altos.

Aún así, los valores de índices de confort mayores se consiguen cuando el radio de curvatura es de 400 metros, ya que con este radio el tren alcanza los 50 m/s mientras que con radios menores el convoy descarrila a velocidades inferiores que no permiten calcular el índice de confort para todo el trayecto.

Por el contrario, los índices de confort más bajos se logran a una velocidad de 15 m/s y con un radio de curvatura de 500 metros en consonancia con lo explicado anteriormente.

De los casos del vehículo ferroviario con uno ó dos vagones, se extrae que los índices de confort son muy similares en la mayoría de las simulaciones. Aún así existe alguna excepción como que el tren descarrila antes con un solo vagón en la curva de 200 metros de radio que con dos. Mientras que ocurre lo contrario en la curva de 400 metros, donde si se circula a 50 m/s, con un vagón el tren no descarrila pero si viaja con dos vagones sí lo hace.

De la comparativa entre los dos índices de confort estudiados se observa que el índice de Sperling es menos variable que el índice de la UIC cuando se cambian las condiciones de circulación. El índice de la UIC presenta valores más bajos que Sperling para velocidades bajas, mientras que para las altas, el índice de la UIC supera al de Sperling. Además se extrae de los resultados que el índice de Sperling nunca alcanza el valor mayor de su escala mientras que el de la UIC sí que lo hace en varias circunstancias.



CAPÍTULO 7:
CONCLUSIONES Y TRABAJOS
FUTUROS

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A continuación se van detallar las conclusiones obtenidas durante la realización del proyecto además de comprobar si se han alcanzado los objetivos previstos al comienzo del mismo.

Por otra parte se van a incluir al final de este capítulo una serie de trabajos futuros que serían de gran interés desarrollar para completar la información obtenida en este proyecto y así mejorar las condiciones de los viajeros a la hora de utilizar el transporte ferroviario.

7.1 Conclusiones

El objetivo principal de este proyecto era calcular el nivel de confort de un tren cuando circula por una vía en diferentes situaciones de circulación. Una vez realizado todas las simulaciones y obtenido sus resultados, se puede concluir que:

- Viajar en un tren con un solo vagón o con dos vagones no influye de manera notoria en los valores de los índices de confort utilizados, salvo en dos simulaciones puntuales. En una de ellas el tren descarrila antes con un solo vagón y en la otra sucede de manera contraria, descarrila a una velocidad menor con dos vagones.
- La velocidad con la que el tren circula por el trazado es muy influyente en los valores obtenidos de los índices de confort. Estos índices de confort son directamente proporcionales a la velocidad del convoy, es decir, a mayor velocidad de circulación mayor es el valor de los índices de confort. Esto conlleva a una sensación de malestar en el usuario cuando la velocidad aumenta.
- El radio de curvatura del trazado también es un factor determinante a la hora de calcular los índices de confort pero de manera contraria a la velocidad, ya que al aumentar el radio de curvatura disminuye los valores de los índices de confort. Por tanto aumentar el radio de curvatura de las vías ayudaría a favorecer la sensación de bienestar de los usuarios cuando utilizan el transporte ferroviario.

- De los resultados obtenidos, también se extrae una comparativa entre los dos índices de confort que se han utilizado en este proyecto. El índice de Sperling es menos variable que el índice de la UIC cuando se modifican los factores de velocidad y radios de curvatura. Para velocidades bajas Sperling obtiene valores mayores que la UIC, pero al ir aumentando la velocidad, Sperling crece de una forma moderada mientras que el índice de confort de la UIC alcanza valores más altos. Se comprueba además, que el índice de confort de la Unión Internacional de Ferrocarriles supera, en varias situaciones, el valor máximo de su escala mientras que el de Sperling no lo supera en ninguna simulación realizada.
- Se comprueba que cuando el radio de curvatura es bajo, se alcanza antes la condición de descarrilamiento que se supere el valor más alto en las escalas de los índices de confort. De manera contraria ocurre cuando el radio de curvatura es grande, ya que se alcanzan los valores más altos en los índices de confort sin que el tren llegue a descarrilar.

A parte de las conclusiones obtenidas de los resultados de las simulaciones, también se han logrado obtener otras conclusiones con la realización del proyecto:

- La industria ferroviaria es un campo muy complejo y que necesita grandes recursos además de tiempos de estudio amplios para desarrollar nuevos y sofisticados avances con el fin de mejorar la calidad del servicio. Tiene muchos conceptos que, por regla general, no se conocen en comparación, por ejemplo, con el transporte automovilístico.
- En cuanto a la utilización del programa de simulación Adams/Rail, se puede concluir que es un programa de difícil utilización, ya que su uso es muy complejo y su interfaz es poco intuitiva. De todos modos es una herramienta muy sofisticada y rentable para las empresas dedicadas al desarrollo del transporte ferroviario.

7.2 Trabajos futuros

Una vez finalizado el proyecto y obtenido las conclusiones oportunas, queda desarrollar los posibles trabajos futuros que serían de interés efectuar para avanzar sobre el concepto de nivel de confort en el transporte. Estos trabajos futuros se muestran a continuación:

- En la actualidad se están desarrollando múltiples proyectos con trenes de alta velocidad, debido a esto sería conveniente realizar estudios sobre los niveles de confort en este tipo de trenes.
- Un factor importante que tiene repercusión en el nivel de confort es la presencia o no de irregularidades en la vía. Por ello se debería ensayar las simulaciones con la presencia de irregularidades en el trazado ferroviario para así conocer su repercusión en los índices de confort.
- Realizar simulaciones modificando las propiedades de las suspensiones de los bogies, para así optimizar el comportamiento del tren y mejorar la calidad del viaje.



REFERENCIAS

REFERENCIAS

- [1] <http://www.todotrenes.com/Historia/Historia.asp> (Diciembre 2011)

- [2] [http://www.cps.unizar.es/~transp/Ferrocarriles/INTRODUCCION_HISTORICA\(Traccion_diesel\).html](http://www.cps.unizar.es/~transp/Ferrocarriles/INTRODUCCION_HISTORICA(Traccion_diesel).html) (Diciembre 2011)

- [3] Infraestructuras ferroviarias. Andrés López Pita. EDICIONES UPC. 2006.

- [4] http://www.adif.es/es_ES/conoceradif/oferta_de_empleo_publico/doc/08_fc_ConceptosFerroviarios.pdf (Junio 2011)

- [5] Parametrización del gálibo de material ferroviario. Julio Álvarez Rodríguez. Tesis Doctoral. Universidad Carlos III de Madrid. 2006.

- [6] <http://www.uclm.es/actividades/2010/CongresoIM/pdf/cdarticulos/099.pdf> (Enero 2012)

- [7] Estudio de la defectología en ruedas ferroviarias. Arturo Herreros Garrido. Proyecto fin de carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2010.

- [8] Ride comfort and motion sickness in tilting trains. Förstberg. J. Department of vehicle Engineering Royal Institute of technology. 2000.

- [9] Internal noise & vibrations in railway vehicles. Wöllstrom. M. Department of Vehicle Engineering Royal institute of technology. 2000.

-
- [10] Motion-related comfort in tilting trains. Förstberg. J. Swedish National Road and Transport Research. 2000.
- [11] UNE-ENV 12299. Railway applications - Ride comfort for passengers. Measurement and evaluation. 2010.
- [12] UIC 513. Guide pour l'évaluation du confort vibratoire du voyageur dans les véhicules ferroviaires. 1994.
- [13] Enciclopedia de la salud y seguridad en el trabajo. Ministerio de trabajo y asuntos sociales. 1998.
- [14] <http://pizarradixital.nireblog.com/> (Junio 2011)
- [15] <http://www.fib.upc.edu/retro-informatica/avui/simulacio.html>
(Julio 2011)
- [16] <http://www.mscsoftware.com/EMEA/about/index.cfm?site=15&&returnTo=/EMEA/about/index.cfm> (Agosto 2011)
- [17] Estudio del deslizamiento del robot Pasibot. David Martínez Alberto. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2011.
- [18] http://isa.umh.es/assignaturas/fac/bloque3_adams1.pdf (Agosto 2011)
- [19] Estudio del comportamiento en curva del bogie Y25. Rubén Manzanque Castellanos. Proyecto Fin de Carrera. Universidad Carlos III de Madrid. 2010.



-
- [20] http://www.mscsoftware.com/assets/1708_ADM6_02DAT_RAIL_CIN_r4.pdf (Agosto 2011)
- [21] Adams/Rail Help. Ayuda propia del programa.
- [22] Elementos Técnicos para la Gestión de Frecuencias en Espacios Complejos: Entornos Ferroviarios. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. 2003.