

UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR



Ingeniería Industrial

Departamento de ingeniería mecánica

PROYECTO FIN DE CARRERA

**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO
EN CURVA DEL BOGIE Y25**

AUTOR: D. Rubén Manzaneque Castellanos

TUTORA/S: Dra. Dña. Beatriz López Boada

Dra. Dña. María Jesús López Boada

Leganés, Octubre 2010

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se lo dedico desde lo más profundo de mi corazón, a mi hermano Jonathan Manzaneque Castellanos fallecido el día 15 de Octubre de 2010, que aunque no pudiera hablar con él debido a su discapacidad, siempre tenía una sonrisa para mí cuando yo más lo necesitaba. Te estoy echando mucho de menos en estos momentos, pero sé que siempre estarás a mi lado.

Me gustaría dar las gracias a mis padres Julián y Estrella por todo el esfuerzo que han hecho para que yo pudiera estudiar la carrera deseada, así como por pasar conmigo los momentos más difíciles surgidos durante el desarrollo de la misma.

También quiero dar las gracias al resto de mi familia, en especial a mis abuelos, debido a la ilusión que tenían por tener un ingeniero en la familia; aunque algunos de ellos ya no pueden estar conmigo, muchas gracias de corazón.

Nunca me podría olvidar de dar las gracias por el apoyo recibido, a mi novia María, que ha estado siempre a mi lado en los momentos más difíciles, aguantándome y soportándome cosas que otras personas no me habrían aguantado.

Tampoco puedo olvidar, a todos los compañeros con los que he podido trabajar durante mi estancia en la universidad. En especial a aquellos amigos conocidos antes de iniciar la carrera y que hemos seguido nuestra nueva andadura en la universidad, juntos, uno al lado del otro. Algunos de estos compañeros los he mantenido e intentare mantener durante toda la vida, ya que sin los buenos ratos que pasamos juntos, la vida no sería lo mismo.

También me gustaría dar las gracias a muchos de los profesores que he tenido a lo largo de todos estos años en la universidad; porque gracias a ellos he podido aprender todo lo necesario para poder ser un buen profesional en el futuro, debido principalmente a la entrega y el entusiasmo con las que los diferentes profesores impartían sus clases.

Por último, quiero agradecer su apoyo y dedicación a las profesoras María Jesús López Boada y Beatriz López Boada, por su ayuda durante todo el desarrollo del proyecto; esperando no haberlas ocasionado muchas molestias con mis continuas preguntas.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción

1.1 Objetivos a conseguir	2
1.2 Estructura del documento.....	2

Capítulo 2. Conceptos ferroviarios

2.1 Introducción	4
2.2 La vía.....	4
2.2.1 El carril.....	4
2.2.2 Traviesas	5
2.2.3 Placas de asiento.....	5
2.2.4 Capas de asiento.....	5
2.3 Componentes del bogie	6
2.3.1 Eje calado	9
2.3.2 El cuerpo del bogie.....	10
2.3.3 Ruedas	10
2.3.4 Caja de grasa	12
2.3.5 Transmisión.....	13
2.3.6 Suspensiones	13
2.4 Material remolcado	14

Capítulo 3. Adams/Rail

3.1 Introducción	15
3.2 Construcción de modelos	16
3.3 Modelización del vehículo	18
3.4 Modelización del contacto rueda-raíl	19
3.4.1 Definición de pseudo-deslizamiento	20
3.4.2 Teoría de Hertz. Problema normal	20
3.4.3 Teoría de Kalker. Problema tangencial.	22
3.5 Modelización de la vía	24
3.6 Análisis del modelo.....	26
3.7 Adams/Postprocessor	26

Capítulo 4. Modelo de vehículo ferroviario

4.1 Introducción	28
4.2 El bogie Y25	28
4.3 Amortiguador de fricción Lenoir	29
4.4 Características técnicas	33
4.4.1 Propiedades físicas	33
4.4.2 Propiedades geométricas y de sobrecarga.....	34
4.4.3 Propiedades de la suspensión	35

4.4.3.1 Suspensión primaria.....	35
4.4.3.2 Suspensión secundaria.....	36
4.4.4 Perfil de la rueda	38

Capítulo 5. Estudio del Confort

5.1 Introducción	39
5.2 Confort de marcha.....	39
5.2.1 Calidad de marcha.....	39
5.2.2 Confort de marcha.....	39
5.2.3 Modelos matemáticos para la evaluación del confort	40

Capítulo 6. Resultados de la simulación

6.1 Introducción	43
6.2 Análisis de precarga	43
6.3 Análisis lineal.....	44
6.4 Estudio de las aceleraciones de un vagón de mercancías.....	51
6.4.1 Radio de curvatura de 200 m.....	51
6.4.2 Radio de curvatura de 300 m.....	55
6.4.3 Radio de curvatura de 400 m.....	59
6.4.4 Radio de curvatura de 500 m.....	62
6.4.5 Radio de curvatura de 600 m.....	66
6.5 Estudio de las aceleraciones de un vagón de mercancías.....	69
6.5.1 Radio de curvatura de 200 m.....	70
6.5.2. Radio de curvatura de 300 m.....	73
6.5.3 Radio de curvatura de 400 m.....	77
6.5.4 Radio de curvatura de 500 m.....	80
6.5.5 Radio de curvatura de 600 m.....	83
6.6 Aceleraciones en presencia de irregularidades en el vía	87
6.6.1 Radio de curvatura de 200 m.....	88
6.6.2 Radio de curvatura de 300 m.....	92
6.6.3 Radio de curvatura de 400 m.....	95
6.6.4 Radio de curvatura de 500 m.....	98
6.6.5 Radio de curvatura de 600 m.....	102
6.7 Estudio del confort según UIC 513	105
6.7.1 En ausencia de irregularidades	105
6.7.1.1 Radio de curvatura de 200 m.....	105
6.7.1.2 Radio de curvatura de 300 m.....	109
6.7.1.3 Radio de curvatura de 400 m.....	113
6.7.1.4 Radio de curvatura de 500 m.....	117
6.7.1.5 Radio de curvatura de 600 m.....	122

6.7.2 En Presencia de irregularidades	126
6.7.2.1 Radio de curvatura de 200 m.....	126
6.7.2.2 Radio de curvatura de 300 m.....	128
6.7.2.3 Radio de curvatura de 400 m.....	130
6.7.2.4 Radio de curvatura de 500 m.....	133
6.7.2.5 Radio de curvatura de 600 m.....	135
6.8 Estudio del confort según Sperling	138
6.8.1 Radio de curvatura de 200 m.....	138
6.8.2 Radio de curvatura de 300 m.....	141
6.8.3 Radio de curvatura de 400 m.....	145
6.8.4 Radio de curvatura de 500 m.....	149
6.8.5 Radio de curvatura de 600 m.....	153
6.9 Comparativa	157
 Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros	
7.1 Conclusiones	162
7.2 Trabajos futuros	163

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Perfil tipo Vignole	5
Figura 2.2. Capas de asiento.....	5
Figura 2.3. Diferenciación entre la suspensión primaria y secundaria.....	6
Figura 2.4. Diferencia de comportamiento según el número de ejes	7
Figura 2.5. Bogies no-articulados y articulados	8
Figura 2.6. Principales componentes de un bogie con apoyo para la caja	9
Figura 2.7. Vista tridimensional del eje calado.....	9
Figura 2.8. Diferentes diseños del eje calado.....	10
Figura 2.9. Perfil característico de una llanta.....	11
Figura 2.10. Vista interior de una caja de grasa	12
Figura 2.11. Diferentes diseños de la suspensión de la caja de grasa	13
Figura 3.1. Representación de la simulación computacional	15
Figura 3.2. Subsistema estándar.....	17
Figura 3.3. Ensamblaje estándar	17
Figura 3.4. Plantilla estándar.....	18
Figura 3.5. Contacto Hertziano en el ámbito ferroviario	21
Figura 3.6. Descomposición en franjas de la zona de contacto.....	23
Figura 3.7. Modelado simple de la vía	25
Figura 3.8. Modelado de la vía según Oscarsson.....	25
Figura 3.9. Ventana de trabajo. Adams/Postprocessor.....	27
Figura 4.1. Porcentajes de uso de las suspensiones primarias, secundarias y/o ambas.....	28
Figura 4.2. Fotografía bogie Y25	29
Figura 4.3. Vista explicativa del funcionamiento de la suspensión en bogie Y25	29
Figura 4.4. Vista de las superficies de fricción	30
Figura 4.5. Representación de la función continua de la fuerza de rozamiento.....	30
Figura 4.6. Descomposición de las fuerzas de fricción en el plano YZ.....	31
Figura 4.7. Modelización de la amortiguación por fricción seca	31
Figura 4.8. Pivote central	32
Figura 4.9. Bogie Y25 modelado en Adams/raíl.....	33
Figura 4.10. Componentes utilizados para el modelado del Bogie Y25	33
Figura 4.11. Fuerza Vs. Deformación. Simulación comportamiento resorte en condición de carga	35
Figura 4.12. Fuerza Vs. Deformación. Simulación comportamiento de los topes de la suspensión primaria lateral	36
Figura 4.13. Fuerza Vs. Desplazamiento. Simulación comportamiento pivote central	36
Figura 4.14. Fuerza Vs. Desplazamiento. Simulación comportamiento soporte lateral	37
Figura 4.15. Perfil P8 y su derivada	38
Figura 6.1. Modos de vibración. Parte real Vs Parte imaginaria.....	48
Figura 6.2. Modo de vibración 56.....	49
Figura 6.3. Modo de vibración 57	49
Figura 6.4. Modo de vibración 58 y 59.....	50
Figura 6.5. Modo de vibración 60.....	50
Figura 6.6. Modo de vibración 61	50
Figura 6.7. Modo de vibración 62 y 63.....	51
Figura 6.8. Aceleración longitudinal. R = 200 m; V = 10 m/s.....	52

Figura 6.9. Aceleración lateral. R = 200 m; V = 10 m/s	52
Figura 6.10. Aceleración vertical. R = 200 m; V = 10 m/s	52
Figura 6.11. Aceleración longitudinal. R = 200 m; V = 15 m/s	52
Figura 6.12. Aceleración lateral. R = 200 m; V = 15 m/s	52
Figura 6.13. Aceleración vertical. R = 200 m; V = 15 m/s	52
Figura 6.14. Aceleración longitudinal. R = 200 m; V = 20 m/s	53
Figura 6.15. Aceleración lateral. R = 200 m; V = 20 m/s	53
Figura 6.16. Aceleración vertical. R = 200 m; V = 20 m/s	53
Figura 6.17. Aceleración longitudinal. R = 200 m; V = 25 m/s	53
Figura 6.18. Aceleración lateral. R = 200 m; V = 25 m/s	53
Figura 6.19. Aceleración vertical. R = 200 m; V = 25 m/s	54
Figura 6.20. Aceleración longitudinal. R = 200 m; V = 30 m/s	54
Figura 6.21. Aceleración lateral. R = 200 m; V = 30 m/s	54
Figura 6.22. Aceleración vertical. R = 200 m; V = 30 m/s	54
Figura 6.23. Aceleración longitudinal. R = 200 m; V = 35 m/s	55
Figura 6.24. Aceleración lateral. R = 200 m; V = 35 m/s	55
Figura 6.25. Aceleración vertical. R = 200 m; V = 35 m/s	55
Figura 6.26. Aceleración longitudinal. R = 300 m; V = 10 m/s	55
Figura 6.27. Aceleración lateral. R = 300 m; V = 10 m/s	55
Figura 6.28. Aceleración vertical. R = 300 m; V = 10 m/s	56
Figura 6.29. Aceleración longitudinal. R = 300 m; V = 15 m/s	56
Figura 6.30. Aceleración lateral. R = 300 m; V = 15 m/s	56
Figura 6.31. Aceleración vertical. R = 300 m; V = 15 m/s	56
Figura 6.32. Aceleración longitudinal. R = 300 m; V = 20 m/s	57
Figura 6.33. Aceleración lateral. R = 300 m; V = 20 m/s	57
Figura 6.34. Aceleración vertical. R = 300 m; V = 20 m/s	57
Figura 6.35. Aceleración longitudinal. R = 300 m; V = 25 m/s	57
Figura 6.36. Aceleración lateral. R = 300 m; V = 25 m/s	57
Figura 6.37. Aceleración vertical. R = 300 m; V = 25 m/s	57
Figura 6.38. Aceleración longitudinal. R = 300 m; V = 30 m/s	58
Figura 6.39. Aceleración lateral. R = 300 m; V = 30 m/s	58
Figura 6.40. Aceleración vertical. R = 300 m; V = 30 m/s	58
Figura 6.41. Aceleración longitudinal. R = 300 m; V = 35 m/s	58
Figura 6.42. Aceleración lateral. R = 300 m; V = 35 m/s	58
Figura 6.43. Aceleración vertical. R = 300 m; V = 35 m/s	59
Figura 6.44. Aceleración longitudinal. R = 400 m; V = 10 m/s	59
Figura 6.45. Aceleración lateral. R = 400 m; V = 10 m/s	59
Figura 6.46. Aceleración vertical. R = 400 m; V = 10 m/s	59
Figura 6.47. Aceleración longitudinal. R = 400 m; V = 15 m/s	60
Figura 6.48. Aceleración lateral. R = 400 m; V = 15 m/s	60
Figura 6.49. Aceleración vertical. R = 400 m; V = 15 m/s	60
Figura 6.50. Aceleración longitudinal. R = 400 m; V = 20 m/s	60
Figura 6.51. Aceleración lateral. R = 400 m; V = 20 m/s	60
Figura 6.52. Aceleración vertical. R = 400 m; V = 20 m/s	60
Figura 6.53. Aceleración longitudinal. R = 400 m; V = 25 m/s	61
Figura 6.54. Aceleración lateral. R = 400 m; V = 25 m/s	61
Figura 6.55. Aceleración vertical. R = 400 m; V = 25 m/s	61
Figura 6.56. Aceleración longitudinal. R = 400 m; V = 30 m/s	61

Figura 6.57. Aceleración lateral. R = 400 m; V = 30 m/s	61
Figura 6.58. Aceleración vertical. R = 400 m; V = 30 m/s	61
Figura 6.59. Aceleración longitudinal. R = 400 m; V = 35 m/s	62
Figura 6.60. Aceleración lateral. R = 400 m; V = 35 m/s	62
Figura 6.61. Aceleración vertical. R = 400 m; V = 35 m/s	62
Figura 6.62. Aceleración longitudinal. R = 500 m; V = 10 m/s	62
Figura 6.63. Aceleración lateral. R = 500 m; V = 10 m/s	62
Figura 6.64. Aceleración vertical. R = 500 m; V = 10 m/s	63
Figura 6.65. Aceleración longitudinal. R = 500 m; V = 15 m/s	63
Figura 6.66. Aceleración lateral. R = 500 m; V = 15 m/s	63
Figura 6.67. Aceleración vertical. R = 500 m; V = 15 m/s	63
Figura 6.68. Aceleración longitudinal. R = 500 m; V = 20 m/s	64
Figura 6.69. Aceleración lateral. R = 500 m; V = 20 m/s	64
Figura 6.70. Aceleración vertical. R = 500 m; V = 20 m/s	64
Figura 6.71. Aceleración longitudinal. R = 500 m; V = 25 m/s	64
Figura 6.72. Aceleración lateral. R = 500 m; V = 25 m/s	64
Figura 6.73. Aceleración vertical. R = 500 m; V = 25 m/s	64
Figura 6.74. Aceleración longitudinal. R = 500 m; V = 30 m/s	65
Figura 6.75. Aceleración lateral. R = 500 m; V = 30 m/s	65
Figura 6.76. Aceleración vertical. R = 500 m; V = 30 m/s	65
Figura 6.77. Aceleración longitudinal. R = 500 m; V = 35 m/s	65
Figura 6.78. Aceleración lateral. R = 500 m; V = 35 m/s	65
Figura 6.79. Aceleración vertical. R = 500 m; V = 35 m/s	66
Figura 6.80. Aceleración longitudinal. R = 600 m; V = 10 m/s	66
Figura 6.81. Aceleración lateral. R = 600 m; V = 10 m/s	66
Figura 6.82. Aceleración vertical. R = 600 m; V = 10 m/s	66
Figura 6.83. Aceleración longitudinal. R = 600 m; V = 15 m/s	67
Figura 6.84. Aceleración lateral. R = 600 m; V = 15 m/s	67
Figura 6.85. Aceleración vertical. R = 600 m; V = 15 m/s	67
Figura 6.86. Aceleración longitudinal. R = 600 m; V = 20 m/s	67
Figura 6.87. Aceleración lateral. R = 600 m; V = 20 m/s	67
Figura 6.88. Aceleración vertical. R = 600 m; V = 20 m/s	67
Figura 6.89. Aceleración longitudinal. R = 600 m; V = 25 m/s	68
Figura 6.90. Aceleración lateral. R = 600 m; V = 25 m/s	68
Figura 6.91. Aceleración vertical. R = 600 m; V = 25 m/s	68
Figura 6.92. Aceleración longitudinal. R = 600 m; V = 30 m/s	68
Figura 6.93. Aceleración lateral. R = 600 m; V = 30 m/s	68
Figura 6.94. Aceleración vertical. R = 600 m; V = 30 m/s	69
Figura 6.95. Aceleración longitudinal. R = 600 m; V = 35 m/s	69
Figura 6.96. Aceleración lateral. R = 600 m; V = 35 m/s	69
Figura 6.97. Aceleración vertical. R = 600 m; V = 35 m/s	69
Figura 6.98. Aceleración longitudinal 2V. R = 200 m; V = 10 m/s	70
Figura 6.99. Aceleración lateral 2V. R = 200 m; V = 10 m/s	70
Figura 6.100. Aceleración vertical 2V. R = 200 m; V = 10 m/s	70
Figura 6.101. Aceleración longitudinal 2V. R = 200 m; V = 15 m/s	70
Figura 6.102. Aceleración lateral 2V. R = 200 m; V = 15 m/s	70
Figura 6.103. Aceleración vertical 2V. R = 200 m; V = 15 m/s	71
Figura 6.104. Aceleración longitudinal 2V. R = 200 m; V = 20 m/s	71

Figura 6.105. Aceleración lateral 2V. R = 200 m; V = 20 m/s	71
Figura 6.106. Aceleración vertical 2V. R = 200 m; V = 20 m/s	71
Figura 6.107. Aceleración longitudinal 2V. R = 200 m; V = 25 m/s	71
Figura 6.108. Aceleración lateral 2V. R = 200 m; V = 25 m/s	71
Figura 6.109. Aceleración vertical 2V. R = 200 m; V = 25 m/s	72
Figura 6.110. Aceleración longitudinal 2V. R = 200 m; V = 30 m/s	72
Figura 6.111. Aceleración lateral 2V. R = 200 m; V = 30 m/s	72
Figura 6.112. Aceleración vertical 2V. R = 200 m; V = 30 m/s	72
Figura 6.113. Aceleración longitudinal 2V. R = 200 m; V = 35 m/s	73
Figura 6.114. Aceleración lateral 2V. R = 200 m; V = 35 m/s	73
Figura 6.115. Aceleración vertical 2V. R = 200 m; V = 35 m/s	73
Figura 6.116. Aceleración longitudinal 2V. R = 300 m; V = 10 m/s	73
Figura 6.117. Aceleración lateral 2V. R = 300 m; V = 10 m/s	73
Figura 6.118. Aceleración vertical 2V. R = 300 m; V = 10 m/s	74
Figura 6.119. Aceleración longitudinal 2V. R = 300 m; V = 15 m/s	74
Figura 6.120. Aceleración lateral 2V. R = 300 m; V = 15 m/s	74
Figura 6.121. Aceleración vertical 2V. R = 300 m; V = 15 m/s	74
Figura 6.122. Aceleración longitudinal 2V. R = 300 m; V = 20 m/s	75
Figura 6.123. Aceleración lateral 2V. R = 300 m; V = 20 m/s	75
Figura 6.124. Aceleración vertical 2V. R = 300 m; V = 20 m/s	75
Figura 6.125. Aceleración longitudinal 2V. R = 300 m; V = 25 m/s	75
Figura 6.126. Aceleración lateral 2V. R = 300 m; V = 25 m/s	75
Figura 6.127. Aceleración vertical 2V. R = 300 m; V = 25 m/s	75
Figura 6.128. Aceleración longitudinal 2V. R = 300 m; V = 30 m/s	76
Figura 6.129. Aceleración lateral 2V. R = 300 m; V = 30 m/s	76
Figura 6.130. Aceleración vertical 2V. R = 300 m; V = 30 m/s	76
Figura 6.131. Aceleración longitudinal 2V. R = 300 m; V = 35 m/s	76
Figura 6.132. Aceleración lateral 2V. R = 300 m; V = 35 m/s	76
Figura 6.133. Aceleración vertical 2V. R = 300 m; V = 35 m/s	76
Figura 6.134. Aceleración longitudinal 2V. R = 400 m; V = 10 m/s	77
Figura 6.135. Aceleración lateral 2V. R = 400 m; V = 10 m/s	77
Figura 6.136. Aceleración vertical 2V. R = 400 m; V = 10 m/s	77
Figura 6.137. Aceleración longitudinal 2V. R = 400 m; V = 15 m/s	77
Figura 6.138. Aceleración lateral 2V. R = 400 m; V = 15 m/s	77
Figura 6.139. Aceleración vertical 2V. R = 400 m; V = 15 m/s	78
Figura 6.140. Aceleración longitudinal 2V. R = 400 m; V = 20 m/s	78
Figura 6.141. Aceleración lateral 2V. R = 400 m; V = 20 m/s	78
Figura 6.142. Aceleración vertical 2V. R = 400 m; V = 20 m/s	78
Figura 6.143. Aceleración longitudinal 2V. R = 400 m; V = 25 m/s	78
Figura 6.144. Aceleración lateral 2V. R = 400 m; V = 25 m/s	78
Figura 6.145. Aceleración vertical 2V. R = 400 m; V = 25 m/s	79
Figura 6.146. Aceleración longitudinal 2V. R = 400 m; V = 30 m/s	79
Figura 6.147. Aceleración lateral 2V. R = 400 m; V = 30 m/s	79
Figura 6.148. Aceleración vertical 2V. R = 400 m; V = 10 m/s	79
Figura 6.149. Aceleración longitudinal 2V. R = 400 m; V = 35 m/s	80
Figura 6.150. Aceleración lateral 2V. R = 400 m; V = 35 m/s	80
Figura 6.151. Aceleración vertical 2V. R = 400 m; V = 10 m/s	80
Figura 6.152. Aceleración longitudinal 2V. R = 500 m; V = 10 m/s	80

Figura 6.153. Aceleración lateral 2V. R = 500 m; V = 10 m/s	80
Figura 6.154. Aceleración vertical 2V. R = 500 m; V = 10 m/s	81
Figura 6.155. Aceleración longitudinal 2V. R = 500 m; V = 15 m/s	81
Figura 6.156. Aceleración lateral 2V. R = 500 m; V = 10 m/s	81
Figura 6.157. Aceleración vertical 2V. R = 500 m; V = 10 m/s	81
Figura 6.158. Aceleración longitudinal 2V. R = 500 m; V = 20 m/s	81
Figura 6.159. Aceleración lateral 2V. R = 500 m; V = 20 m/s	81
Figura 6.160. Aceleración vertical 2V. R = 500 m; V = 10 m/s	82
Figura 6.161. Aceleración longitudinal 2V. R = 500 m; V = 25 m/s	82
Figura 6.162. Aceleración lateral 2V. R = 500 m; V = 25 m/s	82
Figura 6.163. Aceleración vertical 2V. R = 500 m; V = 10 m/s	82
Figura 6.164. Aceleración longitudinal 2V. R = 500 m; V = 30 m/s	82
Figura 6.165. Aceleración lateral 2V. R = 500 m; V = 30 m/s	82
Figura 6.166. Aceleración vertical 2V. R = 500 m; V = 10 m/s	83
Figura 6.167. Aceleración longitudinal 2V. R = 500 m; V = 30 m/s	83
Figura 6.168. Aceleración lateral 2V. R = 500 m; V = 35 m/s	83
Figura 6.169. Aceleración vertical 2V. R = 500 m; V = 10 m/s	83
Figura 6.170. Aceleración longitudinal 2V. R = 600 m; V = 10 m/s	84
Figura 6.171. Aceleración lateral 2V. R = 600 m; V = 10 m/s	84
Figura 6.172. Aceleración vertical 2V. R = 600 m; V = 10 m/s	84
Figura 6.173. Aceleración longitudinal 2V. R = 600 m; V = 15 m/s	84
Figura 6.174. Aceleración lateral 2V. R = 600 m; V = 15 m/s	84
Figura 6.175. Aceleración vertical 2V. R = 600 m; V = 15 m/s	84
Figura 6.176. Aceleración longitudinal 2V. R = 600 m; V = 20 m/s	85
Figura 6.177. Aceleración lateral 2V. R = 600 m; V = 20 m/s	85
Figura 6.178. Aceleración vertical 2V. R = 600 m; V = 20 m/s	85
Figura 6.179. Aceleración longitudinal 2V. R = 600 m; V = 25 m/s	85
Figura 6.180. Aceleración lateral 2V. R = 600 m; V = 25 m/s	85
Figura 6.181. Aceleración vertical 2V. R = 600 m; V = 25 m/s	86
Figura 6.182. Aceleración longitudinal 2V. R = 600 m; V = 30 m/s	86
Figura 6.183. Aceleración lateral 2V. R = 600 m; V = 30 m/s	86
Figura 6.184. Aceleración vertical 2V. R = 600 m; V = 30 m/s	86
Figura 6.185. Aceleración longitudinal 2V. R = 600 m; V = 35 m/s	87
Figura 6.186. Aceleración lateral 2V. R = 600 m; V = 35 m/s	87
Figura 6.187. Aceleración vertical 2V. R = 600 m; V = 35 m/s	87
Figura 6.188. Irregularidades a ambos lados del eje Z.....	88
Figura 6.189. Irregularidades a ambos lados del eje Y	88
Figura 6.190. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 200 m; V = 10 m/s	88
Figura 6.191. Aceleración lateral. Irreg . R = 200 m; V = 10 m/s	88
Figura 6.192. Aceleración vertical. Irreg . R = 200 m; V = 10 m/s	89
Figura 6.193. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 200 m; V = 15 m/s	89
Figura 6.194. Aceleración lateral. Irreg . R = 200 m; V = 15 m/s	89
Figura 6.195. Aceleración vertical. Irreg . R = 200 m; V = 15 m/s	89
Figura 6.196. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 200 m; V = 20 m/s	90
Figura 6.197. Aceleración lateral. Irreg . R = 200 m; V = 20 m/s	90
Figura 6.198. Aceleración vertical. Irreg . R = 200 m; V = 20 m/s	90
Figura 6.199. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 200 m; V = 25 m/s	90
Figura 6.200. Aceleración lateral. Irreg . R = 200 m; V = 25 m/s	90

Figura 6.249. Aceleración vertical. Irreg. R = 500 m; V = 15 m/s	99
Figura 6.250. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 500 m; V = 20 m/s	100
Figura 6.251. Aceleración lateral. Irreg . R = 500 m; V = 20 m/s	100
Figura 6.252. Aceleración vertical. Irreg. R = 500 m; V = 20 m/s	100
Figura 6.253. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 500 m; V = 25 m/s	100
Figura 6.254. Aceleración lateral. Irreg . R = 500 m; V = 25 m/s	100
Figura 6.255. Aceleración vertical. Irreg. R = 500 m; V = 25 m/s	100
Figura 6.256. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 500 m; V = 30 m/s	101
Figura 6.257. Aceleración lateral. Irreg . R = 500 m; V = 30 m/s	101
Figura 6.258. Aceleración vertical. Irreg. R = 500 m; V = 30 m/s	101
Figura 6.259. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 500 m; V = 35 m/s	101
Figura 6.260. Aceleración lateral. Irreg . R = 500 m; V = 35 m/s	101
Figura 6.261. Aceleración vertical. Irreg. R = 500 m; V = 35 m/s	101
Figura 6.262. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 600 m; V = 10 m/s	102
Figura 6.263. Aceleración lateral. Irreg . R = 600 m; V = 10 m/s	102
Figura 6.264. Aceleración vertical. Irreg. R = 600 m; V = 10 m/s	102
Figura 6.265. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 600 m; V = 15 m/s	102
Figura 6.266. Aceleración lateral. Irreg . R = 600 m; V = 15 m/s	102
Figura 6.267. Aceleración vertical. Irreg. R = 600 m; V = 15 m/s	103
Figura 6.268. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 600 m; V = 20 m/s	103
Figura 6.269. Aceleración lateral. Irreg . R = 600 m; V = 20 m/s	103
Figura 6.270. Aceleración vertical. Irreg. R = 600 m; V = 20 m/s	103
Figura 6.271. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 600 m; V = 25 m/s	104
Figura 6.272. Aceleración lateral. Irreg . R = 600 m; V = 25 m/s	104
Figura 6.273. Aceleración vertical. Irreg. R = 600 m; V = 25 m/s	104
Figura 6.274. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 600 m; V = 30 m/s	104
Figura 6.275. Aceleración lateral. Irreg . R = 600 m; V = 30 m/s	104
Figura 6.276. Aceleración vertical. Irreg. R = 600 m; V = 30 m/s	104
Figura 6.277. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 600 m; V = 35 m/s	105
Figura 6.278. Aceleración lateral. Irreg . R = 600 m; V = 35 m/s	105
Figura 6.279. Aceleración vertical. Irreg. R = 600 m; V = 35 m/s	105
Figura 6.280. $N_{MVfront}$. R = 200 m; V = 10 m/s.....	106
Figura 6.281. N_{MVrear} . R = 200 m; V = 10 m/s	106
Figura 6.282. $N_{MVfront}$. R = 200 m; V = 15 m/s.....	106
Figura 6.283. N_{MVrear} . R = 200 m; V = 15 m/s	107
Figura 6.284. $N_{MVfront}$. R = 200 m; V = 20 m/s	107
Figura 6.285. N_{MVrear} . R = 200 m; V = 20 m/s	107
Figura 6.286. $N_{MVfront}$. R = 200 m; V = 25 m/s.....	108
Figura 6.287. N_{MVrear} . R = 200 m; V = 25 m/s	108
Figura 6.288. $N_{MVfront}$. R = 200 m; V = 30 m/s.....	108
Figura 6.289. N_{MVrear} . R = 200 m; V = 30 m/s	109
Figura 6.290. $N_{MVfront}$. R = 300 m; V = 10 m/s.....	109
Figura 6.291. N_{MVrear} . R = 300 m; V = 10 m/s	110
Figura 6.292. $N_{MVfront}$. R = 300 m; V = 15 m/s.....	110
Figura 6.293. N_{MVrear} . R = 300 m; V = 15 m/s	110
Figura 6.294. $N_{MVfront}$. R = 300 m; V = 20 m/s.....	111
Figura 6.295. N_{MVrear} . R = 300 m; V = 20 m/s	111
Figura 6.296. $N_{MVfront}$. R = 300 m; V = 25 m/s.....	111

Figura 6.297. N_{MVrear} . R = 300 m; V = 25 m/s	112
Figura 6.298. $N_{MVfront}$. R = 300 m; V = 30 m/s.....	112
Figura 6.299. N_{MVrear} . R = 300 m; V = 30 m/s	112
Figura 6.300. $N_{MVfront}$. R = 300 m; V = 35 m/s.....	113
Figura 6.301. N_{MVrear} . R = 300 m; V = 35 m/s	113
Figura 6.302. $N_{MVfront}$. R = 400 m; V = 10 m/s.....	114
Figura 6.303. N_{MVrear} . R = 400 m; V = 10 m/s	114
Figura 6.304. $N_{MVfront}$. R = 400 m; V = 15 m/s.....	114
Figura 6.305. N_{MVrear} . R = 400 m; V = 15 m/s	115
Figura 6.306. $N_{MVfront}$. R = 400 m; V = 20 m/s.....	115
Figura 6.307. N_{MVrear} . R = 400 m; V = 20 m/s	115
Figura 6.308. $N_{MVfront}$. R = 400 m; V = 25 m/s.....	116
Figura 6.309. N_{MVrear} . R = 400 m; V = 25 m/s	116
Figura 6.310. $N_{MVfront}$. R = 400 m; V = 30 m/s.....	116
Figura 6.311. N_{MVrear} . R = 400 m; V = 30 m/s	117
Figura 6.312. $N_{MVfront}$. R = 400 m; V = 35 m/s.....	117
Figura 6.313. N_{MVrear} . R = 400 m; V = 35 m/s	117
Figura 6.314. $N_{MVfront}$. R = 500 m; V = 10 m/s.....	118
Figura 6.315. N_{MVrear} . R = 500 m; V = 10 m/s	118
Figura 6.316. $N_{MVfront}$. R = 500 m; V = 15 m/s.....	118
Figura 6.317. N_{MVrear} . R = 500 m; V = 15 m/s	119
Figura 6.318. $N_{MVfront}$. R = 500 m; V = 20 m/s.....	119
Figura 6.319. N_{MVrear} . R = 500 m; V = 20 m/s	119
Figura 6.320. $N_{MVfront}$. R = 500 m; V = 25 m/s.....	120
Figura 6.321. N_{MVrear} . R = 500 m; V = 25 m/s	120
Figura 6.322. $N_{MVfront}$. R = 500 m; V = 30 m/s.....	120
Figura 6.323. N_{MVrear} . R = 500 m; V = 30 m/s	121
Figura 6.324. $N_{MVfront}$. R = 500 m; V = 35 m/s.....	121
Figura 6.325. N_{MVrear} . R = 500 m; V = 35 m/s	121
Figura 6.326. $N_{MVfront}$. R = 600 m; V = 10 m/s.....	122
Figura 6.327. N_{MVrear} . R = 600 m; V = 10 m/s	122
Figura 6.328. $N_{MVfront}$. R = 600 m; V = 15 m/s.....	123
Figura 6.329. N_{MVrear} . R = 600 m; V = 15 m/s	123
Figura 6.330. $N_{MVfront}$. R = 600 m; V = 20 m/s.....	123
Figura 6.331. N_{MVrear} . R = 600 m; V = 20 m/s	124
Figura 6.332. $N_{MVfront}$. R = 600 m; V = 25 m/s.....	124
Figura 6.333. N_{MVrear} . R = 600 m; V = 25 m/s	124
Figura 6.334. $N_{MVfront}$. R = 600 m; V = 30 m/s.....	125
Figura 6.335. N_{MVrear} . R = 600 m; V = 30 m/s	125
Figura 6.336. $N_{MVfront}$. R = 600 m; V = 35 m/s.....	125
Figura 6.337. N_{MVrear} . R = 600 m; V = 35 m/s	126
Figura 6.338. N_{MVIreg} . R = 200 m; V = 10 m/s.....	126
Figura 6.339. N_{MVIreg} . R = 200 m; V = 15 m/s.....	127
Figura 6.340. N_{MVIreg} . R = 200 m; V = 20 m/s.....	127
Figura 6.341. N_{MVIreg} . R = 200 m; V = 25 m/s.....	127
Figura 6.342. N_{MVIreg} . R = 200 m; V = 30 m/s.....	128
Figura 6.343. N_{MVIreg} . R = 300 m; V = 10 m/s.....	128
Figura 6.344. N_{MVIreg} . R = 300 m; V = 15 m/s.....	129

Figura 6.345. $N_{MVIrreg}$. R = 300 m; V = 20 m/s.....	129
Figura 6.346. $N_{MVIrreg}$. R = 300 m; V = 25 m/s.....	129
Figura 6.347. $N_{MVIrreg}$. R = 300 m; V = 30 m/s.....	130
Figura 6.348. $N_{MVIrreg}$. R = 300 m; V = 35 m/s.....	130
Figura 6.349. $N_{MVIrreg}$. R = 400 m; V = 10 m/s.....	131
Figura 6.350. $N_{MVIrreg}$. R = 400 m; V = 15 m/s.....	131
Figura 6.351. $N_{MVIrreg}$. R = 400 m; V = 20 m/s.....	131
Figura 6.352. $N_{MVIrreg}$. R = 400 m; V = 25 m/s.....	132
Figura 6.353. $N_{MVIrreg}$. R = 400 m; V = 30 m/s.....	132
Figura 6.354. $N_{MVIrreg}$. R = 400 m; V = 35 m/s.....	133
Figura 6.355. $N_{MVIrreg}$. R = 500 m; V = 10 m/s.....	133
Figura 6.356. $N_{MVIrreg}$. R = 500 m; V = 15 m/s.....	134
Figura 6.357. $N_{MVIrreg}$. R = 500 m; V = 20 m/s.....	134
Figura 6.358. $N_{MVIrreg}$. R = 500 m; V = 25 m/s.....	134
Figura 6.359. $N_{MVIrreg}$. R = 500 m; V = 30 m/s.....	135
Figura 6.360. $N_{MVIrreg}$. R = 500 m; V = 35 m/s.....	135
Figura 6.361. $N_{MVIrreg}$. R = 600 m; V = 10 m/s.....	136
Figura 6.362. $N_{MVIrreg}$. R = 600 m; V = 15 m/s.....	136
Figura 6.363. $N_{MVIrreg}$. R = 600 m; V = 20 m/s.....	136
Figura 6.364. $N_{MVIrreg}$. R = 600 m; V = 25 m/s.....	137
Figura 6.365. $N_{MVIrreg}$. R = 600 m; V = 30 m/s.....	137
Figura 6.366. $N_{MVIrreg}$. R = 600 m; V = 35 m/s.....	137
Figura 6.367. Wzz y Wzy. R = 200 m; V = 10 m/s.....	138
Figura 6.368. $W_{ZZIrreg}$ y $W_{ZYIrreg}$. R = 200 m; V = 10 m/s.....	138
Figura 6.369. Wzz y Wzy. R = 200 m; V = 15 m/s.....	139
Figura 6.370. $W_{ZZIrreg}$ y $W_{ZYIrreg}$. R = 200 m; V = 15 m/s.....	139
Figura 6.371. Wzz y Wzy. R = 200 m; V = 20 m/s.....	139
Figura 6.372. $W_{ZZIrreg}$ y $W_{ZYIrreg}$. R = 200 m; V = 20 m/s.....	140
Figura 6.373. Wzz y Wzy. R = 200 m; V = 25 m/s.....	140
Figura 6.374. $W_{ZZIrreg}$ y $W_{ZYIrreg}$. R = 200 m; V = 25 m/s.....	140
Figura 6.375. Wzz y Wzy. R = 200 m; V = 30 m/s.....	141
Figura 6.376. $W_{ZZIrreg}$ y $W_{ZYIrreg}$. R = 200 m; V = 30 m/s.....	141
Figura 6.377. Wzz y Wzy. R = 300 m; V = 10 m/s.....	142
Figura 6.378. $W_{ZZIrreg}$ y $W_{ZYIrreg}$. R = 300 m; V = 10 m/s.....	142
Figura 6.379. Wzz y Wzy. R = 300 m; V = 15 m/s.....	142
Figura 6.380. $W_{ZZIrreg}$ y $W_{ZYIrreg}$. R = 300 m; V = 15 m/s.....	143
Figura 6.381. Wzz y Wzy. R = 300 m; V = 20 m/s.....	143
Figura 6.382. $W_{ZZIrreg}$ y $W_{ZYIrreg}$. R = 300 m; V = 20 m/s.....	143
Figura 6.383. Wzz y Wzy. R = 300 m; V = 25 m/s.....	144
Figura 6.384. $W_{ZZIrreg}$ y $W_{ZYIrreg}$. R = 300 m; V = 25 m/s.....	144
Figura 6.385. Wzz y Wzy. R = 300 m; V = 30 m/s.....	144
Figura 6.386. $W_{ZZIrreg}$ y $W_{ZYIrreg}$. R = 300 m; V = 30 m/s.....	145
Figura 6.387. Wzz y Wzy. R = 300 m; V = 35 m/s.....	145
Figura 6.388. $W_{ZZIrreg}$ y $W_{ZYIrreg}$. R = 300 m; V = 35 m/s.....	145
Figura 6.389. Wzz y Wzy. R = 400 m; V = 10 m/s.....	146
Figura 6.390. $W_{ZZIrreg}$ y $W_{ZYIrreg}$. R = 400 m; V = 10 m/s.....	146
Figura 6.391. Wzz y Wzy. R = 400 m; V = 15 m/s.....	146
Figura 6.392. $W_{ZZIrreg}$ y $W_{ZYIrreg}$. R = 400 m; V = 15 m/s.....	147

Figura 6.393. W_{zz} y W_{zy} . $R = 400$ m; $V = 20$ m/s.....	147
Figura 6.394. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 400$ m; $V = 20$ m/s.....	147
Figura 6.395. W_{zz} y W_{zy} . $R = 400$ m; $V = 25$ m/s.....	148
Figura 6.396. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 400$ m; $V = 25$ m/s.....	148
Figura 6.397. W_{zz} y W_{zy} . $R = 400$ m; $V = 30$ m/s.....	148
Figura 6.398. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 400$ m; $V = 30$ m/s.....	149
Figura 6.399. W_{zz} y W_{zy} . $R = 400$ m; $V = 35$ m/s.....	149
Figura 6.400. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 400$ m; $V = 35$ m/s.....	149
Figura 6.401. W_{zz} y W_{zy} . $R = 500$ m; $V = 10$ m/s.....	150
Figura 6.402. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 500$ m; $V = 10$ m/s.....	150
Figura 6.403. W_{zz} y W_{zy} . $R = 500$ m; $V = 15$ m/s.....	150
Figura 6.404. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 500$ m; $V = 15$ m/s.....	151
Figura 6.405. W_{zz} y W_{zy} . $R = 500$ m; $V = 20$ m/s.....	151
Figura 6.406. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 500$ m; $V = 20$ m/s.....	151
Figura 6.407. W_{zz} y W_{zy} . $R = 500$ m; $V = 25$ m/s.....	152
Figura 6.408. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 500$ m; $V = 25$ m/s.....	152
Figura 6.409. W_{zz} y W_{zy} . $R = 500$ m; $V = 30$ m/s.....	152
Figura 6.410. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 500$ m; $V = 30$ m/s.....	153
Figura 6.411. W_{zz} y W_{zy} . $R = 500$ m; $V = 35$ m/s.....	153
Figura 6.412. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 500$ m; $V = 35$ m/s.....	153
Figura 6.413. W_{zz} y W_{zy} . $R = 600$ m; $V = 10$ m/s.....	154
Figura 6.414. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 600$ m; $V = 10$ m/s.....	154
Figura 6.415. W_{zz} y W_{zy} . $R = 600$ m; $V = 15$ m/s.....	154
Figura 6.416. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 600$ m; $V = 15$ m/s.....	155
Figura 6.417. W_{zz} y W_{zy} . $R = 600$ m; $V = 20$ m/s.....	155
Figura 6.418. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 600$ m; $V = 20$ m/s.....	155
Figura 6.419. W_{zz} y W_{zy} . $R = 600$ m; $V = 25$ m/s.....	156
Figura 6.420. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 600$ m; $V = 25$ m/s.....	156
Figura 6.421. W_{zz} y W_{zy} . $R = 600$ m; $V = 30$ m/s.....	156
Figura 6.422. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 600$ m; $V = 30$ m/s.....	157
Figura 6.423. W_{zz} y W_{zy} . $R = 600$ m; $V = 35$ m/s.....	157
Figura 6.424. $W_{zz_{Irreg}}$ y $W_{zy_{Irreg}}$. $R = 600$ m; $V = 35$ m/s.....	157

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores m y n en función de θ	22
Tabla 2. Coeficientes de Kalker	24
Tabla 3. Características físicas del bogie Y25	34
Tabla 4. Propiedades geométricas y de sobrecarga.....	34
Tabla 5. Propiedades del muelle con trabajo en vacío	35
Tabla 6. Escala de confort según UIC 513.....	41
Tabla 7. Escala de confort según Sperling	41
Tabla 8. Constantes de PCT	42
Tabla 9. Constantes de PDE.....	42
Tabla 10. Comprobación de simetría en los elementos de la suspensión.....	44
Tabla 11. Modos de vibración.....	47
Tabla 12. Comparación resultados. Índices de confort	158

1.Introducción

Los vehículos ferroviarios de dos ejes, y otros vehículos constituidos por varios ejes calados, los cuales, forman parte de un único bastidor, presentan desde el inicio de su utilización, el inconveniente del trazado de curvas, por este motivo surgió el diseño del bogie.

El primer bogie conocido fue diseñado en Inglaterra por William Chapman [1] en 1797, pero empezó a funcionar inicialmente en Estados Unidos debido al tipo de curvas presentes en el trazado Americano.

Jhon B. Jervis y Horatio Allen desarrollaron la primera locomotora con bogie en 1832, estaba compuesto por dos ejes calados en el bastidor del bogie, proporcionándole la capacidad de girar libre sin ninguna restricción relacionada con el cuerpo de la locomotora; por lo que este bogie llegó a modificar radicalmente el comportamiento en curva del transporte ferroviario [2].

Posteriormente, se empezó a utilizar bogies en los coches de pasajeros de Norte América desde la década de los 40. Este diseño del bogie se caracterizó por su corta distancia entre los ejes, siendo el principal motivo de alguno de los descarrilamientos producidos durante la época; ya que, este bogie oscilaba violentamente.

Debido a las grandes vibraciones presentes, en 1850, se empezó a aumentar la distancia entre los ejes mejorando considerablemente la estabilidad [3], pero aun mejorando su estabilidad, en Inglaterra, caracterizada por un trazado bastante recto, no necesitaron el uso del bogie; incluso, cuando los trenes aumentaron su tamaño en la década de los 60, debido a la baja reputación obtenida del bogie por parte de los ingenieros ingleses. Aunque ya, en 1845, la Comisión de Evaluación [4] propuso que las oscilaciones presentes en el bogie podrían ser controladas mediante un rodamiento de gran diámetro, soportando el cuerpo del coche sobre el bogie. Fue una idea muy adoptada en los años posteriores, teniendo en cuenta que la fricción en la zona central del bogie, o alternativamente en los soportes laterales, le proporcionaba resistencia a la guiñada ante pequeños giros procedentes del movimiento del lazo.

Con respecto a los bogies para el transporte de pasajeros, surgió la necesidad de incorporar una suspensión secundaria, además, gracias a la inclusión del soporte oscilante, inventado por Davenport en 1841, le proporcionaron al transporte ferroviario flexibilidad lateral entre el coche y el bogie.

Posteriormente, tras estos diseños, empezaron a surgir diferentes modelos matemáticos; los cuales, han permitido, principalmente a partir del desarrollo de los ordenadores, conocer de una manera aproximada el comportamiento de los diferentes vehículos ferroviarios, permitiendo tomar las decisiones más oportunas en cuanto al diseño de los bogies.

Sobre 1960, se desarrolló el bogie Y25 [5], diseñado en Francia a partir del ya existente bogie Y21A. Éste, se ha convertido en uno de los bogies más utilizados para el transporte de mercancías en toda Europa, por lo que desde 1967 forma parte de la norma UIC, como bogie estándar para el transporte de mercancías. Este bogie fue diseñado para ser capaz de mantener una relación de carga-descarga de 5:1, por lo que fue necesario

capacitarle de una rigidez dependiente de la carga; gracias en parte a la unión Lenoir [6], con la cual se consigue un amortiguamiento por fricción seca dependiente de la carga.

Durante muchos años, se ha aceptado que los vagones de mercancías tengan un comportamiento inestable durante su funcionamiento, incluso a bajas velocidades. Mientras que los vagones de pasajeros, fueron diseñados para funcionar de manera estable. Esta inestabilidad presente en los vagones de mercancías, puede provocar el daño de la carga a transportar. Por lo tanto, se hace necesario determinar el comportamiento de los diferentes bogies de mercancías, con el objetivo de conocer los límites que se pueden alcanzar durante su marcha, evitando posibles daños tanto a la carga transportada como a la propia estructura del vehículo ferroviario.

1.1 Objetivos a conseguir

Mediante el desarrollo de este proyecto, se simulará el comportamiento de unos de los bogies de mercancías más utilizados en Europa, el bogie Y25.

El programa de simulación computacional utilizado para determinar los parámetros necesarios para evaluar el comportamiento del bogie Y25, es el Adams/Rail, el cual, se trata de un software desarrollado por MSC Software Corporation.

Por consiguiente, los principales objetivos de este proyecto son:

- Conocer el funcionamiento de uno de los programas de simulación más utilizado en el ámbito ferroviario, debido a las grandes posibilidades presentes en este software de simulación.
- Estudiar el comportamiento del bogie de mercancías Y25, para ello se determinan los índices de confort del modelo ante diferentes situaciones, como son los diferentes radios de curvatura del trayecto a seguir por el ferrocarril, así como la velocidad de paso del mismo.
- Determinar la influencia de las irregularidades en el vía.
- Comparar los diferentes resultados obtenidos con el objetivo de poder definir las limitaciones que presenta el bogie Y25 durante el tránsito por curva.

1.2 Estructura del documento

Este proyecto se ha estructurado en los siguientes capítulos:

- En el capítulo 2, titulado “Conceptos ferroviarios”, se llevan a cabo diversas definiciones del mundo ferroviario, pasando por tres grandes puntos: la vía, el bogie y el material remolcado.
- En el tercer capítulo, definido “Adams/Rail”, se profundiza en el uso de los programas de simulación, pasando por un estudio general de los modelos de simulación utilizados en la actualidad, para posteriormente comprender el funcionamiento del software utilizado, el Adams/Rail.
- En el cuarto capítulo, titulado “Modelo de vehículo ferroviario”, se lleva a cabo un análisis del bogie Y25, destacando la obtención de las ecuaciones que definen el comportamiento del amortiguador de fricción Lenoir. Además, se exponen las características técnicas del modelo, como son las propiedades

físicas, geométricas, de la suspensión, la geometría del perfil de la rueda y las sobrecargas aplicadas.

- Mediante el quinto capítulo, titulado “Estudio del confort”, se realiza una aproximación a los principales métodos de obtención de los índices de confort, como pueden ser Sperling o la norma UIC 513.
- En el sexto capítulo “Resultados de la simulación”, se llevan a cabo diferentes análisis; inicialmente, se realiza un estudio de precarga y un análisis lineal, adecuados para un estudio previo del modelo, para posteriormente, mediante diferentes análisis dinámicos, modificando el radio de curvatura y la velocidad, generar las aceleraciones necesarias para la obtención de los índices de confort.
- En el séptimo capítulo, se exponen las conclusiones obtenidas tras el estudio de los índices de confort, así como los posibles trabajos que se pueden llevar a cabo en el ámbito de la simulación computacional.

2. Conceptos ferroviarios

2.1 Introducción

Antes de comenzar el estudio del bogie Y25, del cual ha surgido este proyecto, es recomendable conocer de una manera resumida los principales elementos que hacen posible que el ferrocarril sea a día de hoy uno de los medios de transporte más utilizados en el mundo. Se trata de uno de los sistemas dinámicos más complejos en la ingeniería, por lo que mediante este capítulo, se pretende dar una visión general del mundo ferroviario [7].

2.2 La vía

Se entiende por **vía** al camino por el que circulan los trenes. Por este motivo, su función consiste en el guiado de los vehículos ferroviarios de la forma más segura y económica posible. Cualquier fallo en la nivelación y alineación de la vía, producen vibraciones en el tren, repercutiendo en el confort de los pasajeros; e incluso se pueden generar daños en la estructura.

La estructura de la vía está constituida principalmente por: los carriles, las traviesas, las placas de asiento, las sujeciones del carril, el balasto, el sub-balasto y la plataforma.

2.2.1 El carril

El **carril** [8] es el elemento bajo el cual circula el vehículo. Por ello, se trata de un componente esencial de la superestructura ferroviaria, y cualquier defecto en el mismo puede provocar problemas en la circulación, e incluso, graves accidentes.

Las principales funciones del carril son:

- Guiar el material rodante.
- Absorber, resistir y transmitir a las traviesas los esfuerzos recibidos.
- Utilizado como elemento conductor en el retorno de la corriente en líneas de tracción eléctrica.
- Conductor de las corrientes de señalización.

Los carriles actuales tienen una base plana y su sección es la de un perfil en I. El ingeniero inglés Charles Vignoles [9], fue el que inventó este diseño en 1830. En Europa, uno de los perfiles de carril más usados es el UIC60 (con un perfil Vignoles), donde el 60 hace referencia a la masa del carril en kilogramos por metro.

La forma de este perfil, que se muestra en la figura 2.1, está constituida por la cabeza, el alma y el patín. El perfil Vignoles, permite una fácil sujeción a las traviesas, pero ciertos detalles, no son siempre los óptimos que deberían ser desde el punto de vista de la resistencia que deben soportar.



Figura 2.1. Perfil tipo Vignole

2.2.2 Traviesas

Las **traviesas** [10 y 11], constituyen el nexo de unión entre el carril y el balasto. Pueden estar constituidas de diferentes materiales, según las características deseadas, pero sus principales funciones son:

- Servir de soporte a la vía, mantienen su ancho, su nivel y la alineación de los carriles.
- Transmitir y repartir las cargas del carril al balasto.
- Evitar la conducción eléctrica, dificultando la aparición de las corrientes parasitas, evitando de éste modo la presencia de corrosión en sitios de salida de corriente de otras estructuras, como puede suceder en tuberías.

2.2.3 Placas de asiento

Las **placas de asiento** [10 y 11] 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, por lo tanto, evitan desplazamientos del carril y también dan aislamiento eléctrico a los mismos. Cabe destacar que, en el caso de uso de traviesas de madera, esta vía no dispondrá de placas de asiento.

2.2.4 Capas de asiento

Las **capas de asiento** [10 y 11] son las capas de espesor uniforme situadas entre la traviesa y la plataforma. En la figura 2.2, se observan las diferentes capas que constituyen el terreno sobre el que está asentado el carril.

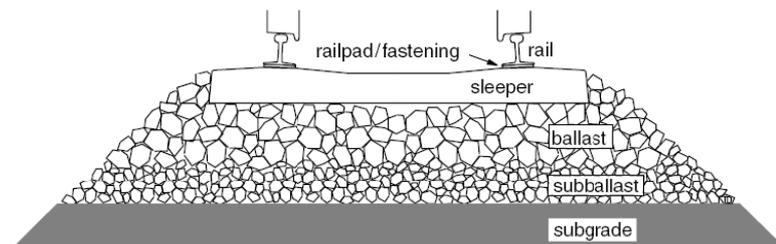


Figura 2.2. Capas de asiento

Dentro de las capas de asiento se pueden distinguir:

- **Capa de Balasto:** permite amortiguar las vibraciones transmitidas por las traviesas, debido a la disipación de energía por el rozamiento de los áridos. Además, permite el drenaje y la evacuación del agua; y mediante el bateo se consigue una rápida nivelación o rectificación del trazado.

Atendiendo a la naturaleza de las capas de asiento, se diferencian dos tipos de vía:

- **Vía convencional o vía con balasto (VCB):** Constituida principalmente por un lecho elástico de materiales incompresibles, los cuales, constituyen el balasto.
 - **Vía sin balasto o vía en placa (VSB):** Constituida por una placa rígida, asfalto u hormigón sobre las que se sitúan las traviesas, así como los carriles y sus respectivos sistemas de sujeción.
- **Capa de sub-balasto:** el sub-balasto es una capa de transición entre la capa superior de partículas grandes, balasto de buena calidad, y la capa inferior de partículas pequeñas de la plataforma, constituida generalmente por una capa arenosa compacta. Mediante esta capa, se evita la penetración de elementos del balasto, así como la filtración de agua, consiguiendo reducir la formación de las capas de escarcha y mejorando el reparto de las cargas.
 - **Geotextiles:** se conoce por este nombre a las geomembranas de origen sintético. Se emplean para separar dos capas consecutivas de materiales granulosos y/o reforzar la capa del suelo que no tiene la fuerza mecánica suficiente. También se pueden usar como filtros o drenajes.
 - **Plataforma:** es una superficie de roca o piedra sin nivelar, donde se asientan el resto de las capas anteriormente nombradas.

2.3 Componentes del bogie

Se define al **bogie** como a un bastidor que puede girar respecto al chasis, al cual, va montado el tren de rodadura.

El bogie se compone principalmente de dos ejes montados sobre el bastidor, los cuales incorporan una suspensión propia denominada suspensión primaria. Además, puede existir una suspensión entre el chasis y el bogie denominada suspensión secundaria, como se observa en la figura 2.3.

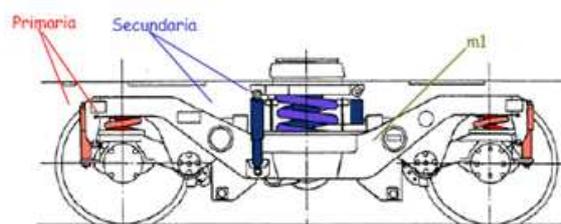


Figura 2.3. Diferenciación entre la suspensión primaria y secundaria

Cabe destacar que, los vehículos con bogie son normalmente más pesados que los vehículos de dos ejes. Sin embargo, el diseño de vehículos ferroviarios con bogies es a menudo más simple que el de vehículos de dos ejes y esto puede proporcionar ventajas de fiabilidad, así como favorecer el mantenimiento de los mismos.

De manera general, las principales funciones del bogie son:

- Transmisión de la carga vertical de las ruedas del vehículo a los raíles.
- Guiar el vehículo a lo largo de la vía.
- Trabajar de forma estable tanto en recta como en curva.
- Control de las fuerzas dinámicas, debido a las irregularidades sobre la vía, en curvas y también debida a los impactos entre coches.
- Amortiguador eficiente frente a oscilaciones.
- Aplicación de las fuerzas de tracción y frenado.
- Minimiza la generación de irregularidades en la vía, disminuyendo la abrasión.
- Garantiza el confort, debido a la capacidad de absorber las vibraciones causadas por las irregularidades de la vía, así como, minimizar la acción de la fuerza centrífuga en el paso por curva.

Los bogies se clasifican según diversas descripciones, pero normalmente se suelen diferenciar en función del número de ejes y/o el diseño y estructura de la suspensión [12]:

- **Número de ejes:** Desde que los bogies funcionan en dos raíles de acero, la composición más sencilla consiste en un único eje con dos ruedas caladas. Los bogies se clasifican en: un eje, dos ejes, tres ejes, etc. Aunque los más utilizados son los de dos ejes. Además, estos tienen la ventaja de conseguir que los impactos ocasionados por la circulación sean transmitidos a través de la suspensión a un punto del bogie, a diferencia de los de un eje, en los que, el impacto es transmitido directamente al vagón, como se puede observar en la figura 2.4.

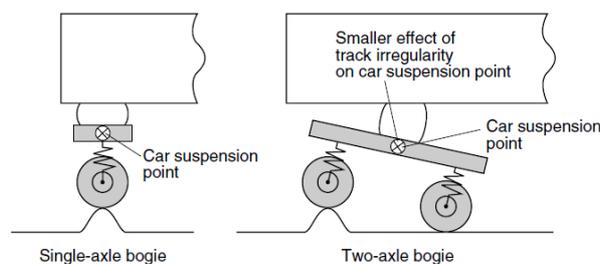


Figura 2.4. Diferencia de comportamiento según el número de ejes

- **Articulados, no-articulados:** Los bogies pueden ser clasificados como articulados y no-articulados, como se representa en la figura 2.5. Dos bogies no-articulados, normalmente, se encuentran en un vagón del ferrocarril; pero un bogie articulado, se localiza entre el final de un vagón, y el comienzo del siguiente, como puede verse en el Talgo español [13] y en el TGV francés [14].

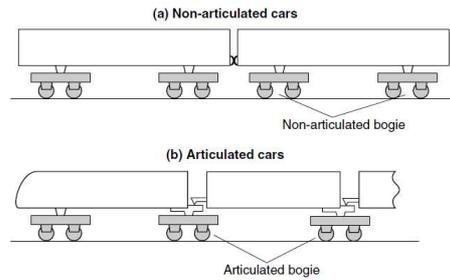


Figura 2.5. Bogies no-articulados y articulados

La principal diferencia existente entre los bogies articulados y los no-articulados, son las desventajas presentes en el bogie articulado, tales como: una estructura más compleja, aumento de la carga por eje y dificultad de mantenimiento, pero también presenta ventajas importantes para su utilización como pueden ser, un menor centro de gravedad, mayor confort, debido a que el final del vagón no sobresale del bogie y, por último, consiguen disminuir el ruido presente en el vagón, ya que los asientos no están situados sobre los bogies.

- **Barra de suspensión oscilante y travesaño lateral de pequeña rigidez:** Para asegurar un buen confort en el habitáculo, el bogie debe absorber los movimientos de rodadura para los cuales, el pasajero es más sensible. Normalmente, la suspensión oscilante consiste en unas vigas de refuerzo situadas en la parte inferior y unida al cuerpo del bogie por medio de dos elementos verticales que se extienden hasta el fondo, junto con los resortes y las vigas de refuerzo superiores (para soportar el movimiento vertical). Aunque la suspensión giratoria permite obtener un buen confort por la disminución al mínimo de la rigidez horizontal, su mantenimiento es muy complejo debido a su estructura y al gran número de elementos que lo componen. En 1960, con el comienzo de la utilización de los resortes neumáticos, el uso de la suspensión giratoria fue disminuyendo debido a su mayor peso y tamaño.
- **Con y sin apoyo de la caja sobre el bogie:** Se diferencian principalmente en la suspensión. El apoyo de la caja sobre el bogie, representado en la figura 2.6, fue desarrollado primero y se caracteriza por tener un giro relativo al vagón en el paso por curva. Se consigue mediante un pivote central que actúa como centro de rotación y unos apoyos laterales para ofrecer resistencia a la rotación en el tránsito por tramos rectos. El diseño sin apoyo de la caja sobre el bogie empezó a ser comercializado en 1980, con el objetivo de disminuir el número de componentes y el peso del bogie anterior, consiguiendo los desplazamientos rotacionales en curva a través de la deformación horizontal de los apoyos elásticos, también conocido como suspensión secundaria.

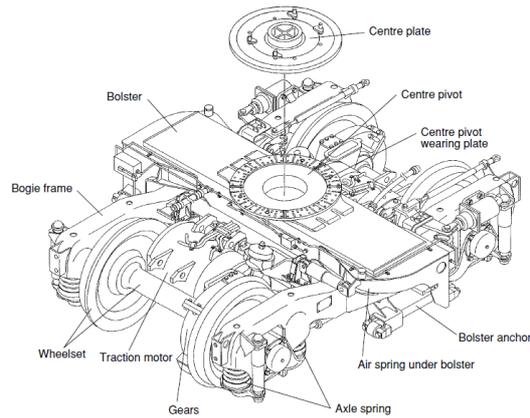


Figura 2.6. Principales componentes de un bogie con apoyo para la caja

2.3.1 Eje calado

El **eje calado** [15], mostrado en la figura 2.7, consiste en dos ruedas unidas por un eje común; por lo que le proporciona la misma velocidad angular, así como una distancia constante entre las ruedas.

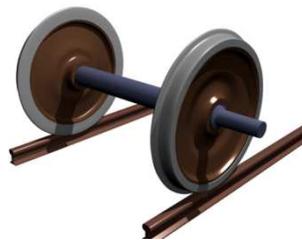


Figura 2.7. Vista tridimensional del eje calado

El eje calado proporciona:

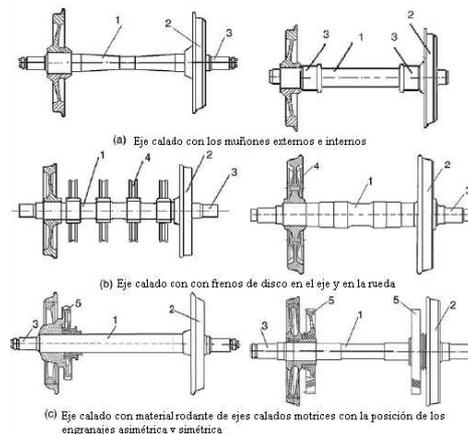
- La distancia entre el vehículo y la vía.
- Los medios de transmisión de las fuerzas de tracción y de frenado a los raíles para acelerar y decelerar el vehículo.
- El movimiento de lazo.

El principal problema de los ejes calados es el desgaste entre la rueda y el raíl, debido a que la rueda tiene que recorrer más distancia por el carril exterior que por el carril interior; ya que, como el número de revoluciones es el mismo, se produce un deslizamiento en una de las ruedas, o incluso en las dos. La solución a dicho problema, consiste en fabricar la superficie de rodadura de las ruedas con un perfil cónico cuyo ángulo γ de inclinación sea variable con respecto al eje calado.

Un eje montado libre con perfiles cónicos se mueve lateralmente en una curva, de tal forma que la rueda externa este rodando en un radio más grande (debido al ángulo del cono) que el interno. Para cada radio de la curva solamente existe un valor de la conicidad que elimina el deslizamiento, por lo tanto, el deslizamiento mínimo depende de las características de la vía.

Con el objetivo de ir mejorando el transporte ferroviario, se realizan una gran variedad de diseños con el objetivo de mejorar el comportamiento de los vehículos

existentes, por ese motivo, hay una gran variedad de tipos de ejes calados, como los mostrados en la figura 2.8.



Siendo: 1 eje; 2 rueda; 3 muñón; 4 disco del freno; 5 engranaje dentado.

Figura 2.8. Diferentes diseños del eje calado

2.3.2 El cuerpo del bogie

Generalmente, es fabricado mediante soldadura, obteniendo una estructura en forma de H. El espesor de los apoyos laterales ha ido aumentando con el paso del tiempo, pasando de los 9 mm en 1960 a los 12 mm en 1970. Pero debido a la mejora en la soldadura alrededor de 1980, se consiguió volver a disminuir el espesor de esta estructura, con el objetivo de reducir pesos.

Los materiales más utilizados para su construcción son: el SS400 (acero laminado para estructuras generales) y el SM400B (acero laminado para estructuras soldadas). Pero algunos bogies desde el DT50 utilizan tubos de acero sin soldadura para disminuir peso.

2.3.3 Ruedas

Las **ruedas** [16] y los **ejes de transmisión** son las partes más críticas del material rodante ferroviario. Un fallo mecánico o un exceso en las dimensiones del diseño pueden causar el descarrilamiento.

Actualmente, existen diferentes modelos de ruedas ferroviarias, entre las que destacan:

- **Ruedas macizas:** Constituidas por la llanta, el disco y el cubo. Diferenciándose entre ellas, principalmente, por la forma del cubo.
- **Ruedas con llanta:** Rueda similar a la anterior, pero con la particularidad de disponer de una llanta unida al disco, la cual, es tratada en caliente. La principal ventaja de las ruedas con llanta, consiste en la capacidad de sustituir la llanta una vez alcanzado su límite de torneado.
- **Ruedas ensambladas:** Con el objetivo de reducir la masa no suspendida, se dio lugar a este tipo de ruedas. Están caracterizadas por una capa de material de bajo módulo elástico, proporcionando una mayor atenuación en las fuerzas de frecuencias más altas. Dentro de este grupo, también están presentes aquellas ruedas que hacen uso de

los rodamientos, permitiendo una rotación independiente, de manera que el eje es capaz de rotar de manera independiente, reduciendo así las fuerzas de guiado.

De forma general, las ruedas permiten:

- Soportar el peso del vehículo. Por término medio, un vehículo de viajeros pesa 17 Tm/eje y un vehículo de mercancías puede llegar a las 22.5 Tm/eje, aunque está en estudio la ampliación a 25 Tm/eje en Europa.
- Guiar al vehículo por la vía. Los vehículos ferroviarios no circulan por la vía en línea recta, sino que realizan una trayectoria sinusoidal conocida como movimiento de lazo. La rueda guía al vehículo mediante la pestaña y una ligera inclinación de la banda de rodadura y en las curvas soportan la reacción debida a la fuerza centrífuga.
- Frenar y traccionar al vehículo. En los trenes de mercancías, sigue actuando sobre la banda de rodadura un freno de zapata, existiendo un peligro de calentamiento en distancias de frenado largas.

El **perfil de la rueda**, figura 2.8, posee una zona de rodadura, fundamental para el buen comportamiento dinámico del vehículo. La zona de rodadura posee unos parámetros característicos comentados a continuación:

- El espesor de pestaña, medido a 10 mm por encima de la circunferencia de rodadura (valor mínimo 25 mm).
- Ángulo de la cara activa de la pestaña. Es la diferencia de espesores de pestaña medidos a 10 mm por encima de la circunferencia de rodadura y a 2 mm por debajo de la circunferencia máxima en la pestaña (valor mínimo 6.5 mm).
- Altura de pestaña. Es la diferencia medida entre radios de circunferencia de rodadura y circunferencia máxima en pestaña (valor máximo 33 mm).

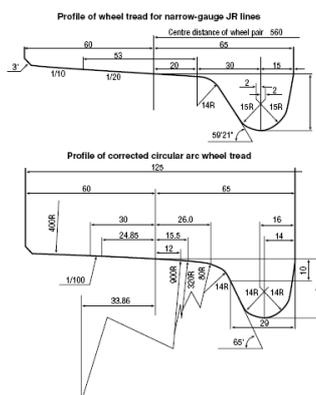


Figura 2.9. Perfil característico de una llanta

Las ruedas convencionales tienen un diámetro de 860 mm cuando están nuevas. Debido al elevado desgaste a la que están sometidas desde el punto de vista de la rodadura y del servicio corriente, los materiales para su construcción deben tener un elevado contenido de carbono y alta resistencia a la tracción. Las ruedas sometidas a

temperaturas elevadas como consecuencia del frenado por zapatas, tienen un escaso contenido en carbono para evitar averías por causas térmicas.

Las ruedas son susceptibles de padecer desequilibrio de masa, lo que provoca las vibraciones en la propia rueda y en el eje, las cuales, se transmiten al vagón. Desde 1984, se ha estado trabajando en este aspecto con el objetivo de mantener este desequilibrio por debajo de 25 kgf·cm.

Por último, cabe destacar la existencia de las ruedas onduladas, caracterizadas por una cara exterior ondulada. Han sido comercializadas para aumentar su rigidez, siempre y cuando este tipo de ruedas consigan reducir el espesor del disco, así como su peso. Este tipo de ruedas han sido utilizadas, desde 1980, en trenes de cercanías y corta distancia.

En referencia a los ejes, son generalmente sólidos, pero pueden utilizarse otros diseños con el objetivo de disminuir el peso, pero sin afectar a su resistencia. Por ese motivo, los ejes huecos han sido utilizados en trenes eléctricos de alta velocidad y en coches de pasajeros después de 1950; pero su uso fue abandonado por problemas de fabricación. Alrededor de 1975, para mejorar la fiabilidad de los ejes huecos, estos se empezaron a fabricar mediante la perforación de un eje macizo.

2.3.4 Caja de grasa

La **caja de grasa** [17], mostrada en la figura 2.10, proporciona la unión entre los ejes y el bogie, y facilita la rodadura de los ejes. Se coloca entre el eje de las ruedas y el bastidor. 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 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 del eje de la rueda.

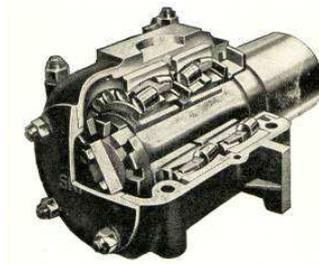


Figura 2.10. Vista interior de una caja de grasa

Por lo que de forma general, la caja de grasa es el dispositivo que permite que el eje montado rote proporcionando el alojamiento del cojinete, y también, los montajes para que la suspensión primaria una el eje montado al bogie o al bastidor del vehículo. Por consiguiente, se trata de un elemento crítico para el rendimiento, ya que de su diseño dependen importantes factores como el confort y el diseño de la estructura del bogie. Se pueden encontrar una gran variedad de diseños como los que se muestran en la figura 2.11.

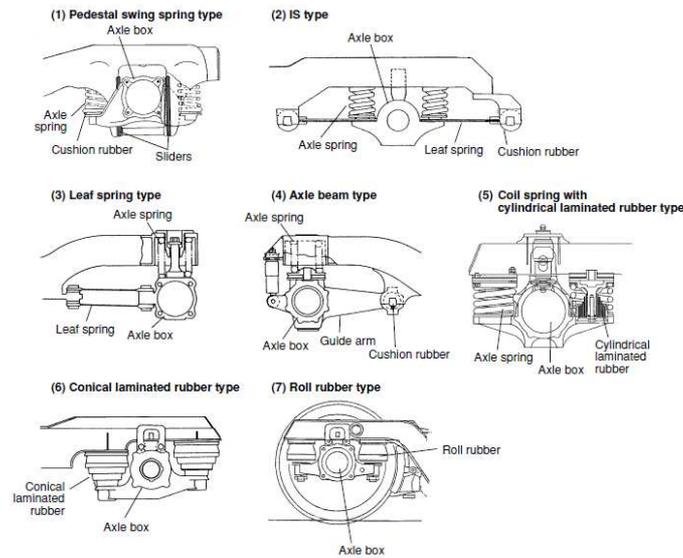


Figura 2.11. Diferentes diseños de la suspensión de la caja de grasa

La caja de grasa transmite fuerzas longitudinales, laterales, y verticales del eje calado sobre los otros elementos del bogie. Las fuerzas verticales y longitudinales son transmitidas a través de la superficie interna del cojinete y las fuerzas laterales por sus caras.

2.3.5 Trasmisión

La **trasmisión** se compone de engranajes y acoplamientos flexibles para transmitir la fuerza motor a los ejes. Sobre 1957, fue diseñada una junta Cardan que fue puesta en servicio con un motor pequeño y de alta velocidad situado en la estructura del bogie, mantenido el motor en su posición mediante los resortes del eje; por lo tanto, el motor transmite el movimiento al engranaje a través de un acoplamiento flexible.

2.3.6 Suspensiones

Se conoce por **suspensión** al conjunto constituido por los elementos elásticos, amortiguadores y todo aquel elemento que une los ejes calados a la carrocería del coche.

Los bogies generalmente disponen de dos etapas de suspensión: la **suspensión primaria** que conecta los ejes calados con la estructura del bogie, y la **suspensión secundaria** situada entre el bastidor del bogie y el vagón. Cabe destacar que, en el caso de bogies para trenes de mercancías, es muy común que estos solo dispongan de una etapa de suspensión, la cual, se corresponde normalmente con la suspensión primaria o también llamada “suspensión de la caja de grasa”.

Los elementos elásticos, o también conocidos como **resortes**, son aquellos componentes que vuelven a su dimensión original una vez terminada la acción de la fuerza sobre ellos, en el mundo ferroviario, los resortes se utilizan para:

- Igualar las cargas verticales entre las ruedas (la descarga de cualquier rueda es peligrosa porque causa una reducción o pérdida de las fuerzas de guiado).

- Estabilizar el movimiento del vehículo en vía (las oscilaciones laterales por excitación propia, p. ej., la oscilación pendular de los ejes es peligrosa).
- Reducir las fuerzas y las aceleraciones dinámicas debido a las irregularidades de la vía.

Existen una gran variedad de elementos elásticos utilizados en el mundo ferroviario. Entre los que se destacan, por su mayor uso:

- **Resorte de láminas.**
- **Resorte de placa.**
- **Resorte de anillo.**
- **Muelles helicoidales.**
- **Resorte de torsión.**
- **Resorte neumático.**

Con respecto a la amortiguación, se utiliza de manera general en el ámbito ferroviario tanto la fricción seca como la viscosa.

La **fricción seca** se produce por el rozamiento relativo de dos cuerpos en contacto. La fuerza de fricción producida puede ser constante o dependiente de la masa de la carrocería del vehículo:

$$F_{fric. sec} = -\mu S Q \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} = -F_0 \frac{\dot{x}}{|\dot{x}|} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

- F_0 = Magnitud de la fuerza de fricción.
- μ = coeficiente de rozamiento.
- S = Área de la superficie de contacto.
- Q = Presión entre las superficies de contacto.
- \dot{x} = Velocidad relativa del movimiento.
- $|\dot{x}|$ = Magnitud de la velocidad.

La **fricción viscosa** consiste, de manera general, en un líquido viscoso que fluye por un orificio, disipando así la energía. En el caso de fricción viscosa, la fuerza de amortiguamiento es siempre proporcional a la velocidad.

2.4 Material remolcado

En la industria ferroviaria, se denomina **material remolcado** a los vehículos para el transporte de viajeros (coches) y mercancías (vagones). Es el elemento que más peso introduce en el vehículo ferroviario, por lo que debe ser lo más ligero posible.

3. Adams/Rail

3.1 Introducción

Se puede decir que la simulación computacional comenzó en la industria aeroespacial, mediante el uso de rutinas para calcular las vibraciones aeroelástica del ala de un avión. En 1962, se llevó a cabo el primer análisis de autovalores de un vehículo de dos ejes. Dicho análisis se llevo a cabo en una computadora de la English Electric Aviation, mediante el uso de rutinas típicas de la industria aeroespacial; ya que, las ecuaciones lineales del movimiento de un vehículo ferroviario son las mismas que las ecuaciones aeroelásticas del ala de un avión, siempre y cuando se realice una buena interpretación de la velocidad del vehículo.

Con el paso del tiempo y la creciente utilización de los ordenadores en la rama de la ingeniería, fue aumentando el interés por el uso de métodos numéricos, obteniendo librerías de rutinas estándar para la solución de los autovalores, así como la solución de las ecuaciones diferenciales necesarias. Por este motivo, a partir de la década de los 60 y 70, se empezaron a realizar simulaciones de modelos de vehículos no lineales complejos. Estas simulaciones se basaron en el uso de las ecuaciones del movimiento deducidas manualmente e incorporadas a programas computacionales.

Posteriormente las grandes empresas empezaron a diseñar paquetes completos que cubrían un gran rango de los cálculos dinámicos para un mismo modelo de vehículo. Por lo que, empezaron a aparecer una gran cantidad de programas de simulación que se pueden clasificar según su enfoque:

- **Primer enfoque:** Las ecuaciones eran elaboradas para la resolución de algunas configuraciones más o menos estándar, según su comportamiento esperado.
- **Segundo enfoque:** Permiten la simulación de diferentes modelos de vehículos en situaciones generales, obteniendo los denominados programas multicuerpo.

Actualmente, el proceso de simulación consta de manera general de cuatro pasos: Introducción de valores, modelizado, análisis y salida de resultados. Este proceso queda representado en la figura 3.1.

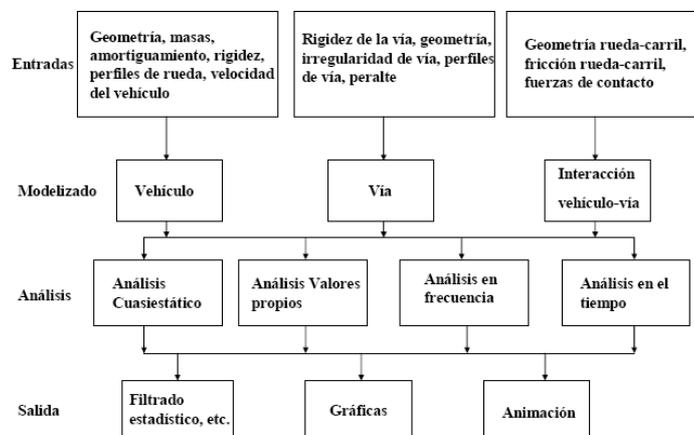


Figura 3.1. Representación de la simulación computacional

El éxito en la simulación procede principalmente de la correcta modelización tanto de la vía como del vehículo, así como la entrada adecuada de los datos necesarios, con el objetivo de obtener los resultados buscados. En definitiva, hay que tener en cuenta una serie de factores, antes de determinar el programa de simulación adecuado:

- Propósito de las simulaciones, incluyendo parámetros de salida requeridos y su precisión.
- Intervalo de frecuencia de interés.
- Acceso a paquetes de simulación adecuados.
- Acceso a importantes datos de los modelos.
- Tiempo y financiación disponibles.

3.2 Construcción de modelos

El programa de simulación Adams/Raíl, desarrollado por MSC. Software Corporation, está especializado en el análisis de vehículos ferroviarios, así como, de los diferentes subsistemas que constituyen el modelo.

Para crear un modelo en Adams/Rail, se debe definir los diferentes subsistemas que lo constituyen, es decir, los bogies (compuestos a su vez por los ejes calados, la suspensión primaria y secundaria, amortiguadores, etc) y los vagones del ferrocarril. Dichos subsistemas pueden ser creados por el propio usuario, usando el modo de creación de plantillas, o se pueden utilizar las plantillas predefinidas por el programa, facilitando de esta manera el uso de este software.

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:

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

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, como son:

- **Subsistemas:** Sólo se puede hacer uso de los subsistemas en la interfaz estándar del programa, pudiendo crearlos nuevos o utilizar los subsistemas ya existentes.

Cuando se crea un nuevo subsistema, se debe hacer referencia a las plantillas existentes, mientras que cuando se trabaja con un subsistema existente, éste hace referencia a las plantillas de manera automática.

Mediante los subsistemas, se pueden modificar los datos paramétricos de las plantillas, así como, definir algunos de los componentes que lo constituye.

Los subsistemas, como el mostrado en la figura 3.2, contienen la descripción de los diferentes componentes que lo definen, estas descripciones proporcionan la siguiente información:

- **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.

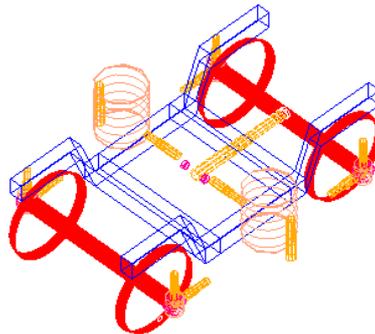


Figura 3.2. Subsistema estándar

- **Ensamblajes:** Se representan mediante un conjunto de subsistemas, que junto con el banco de pruebas, forman un sistema que puede ser analizado por el programa, como el mostrado en la figura 3.3.

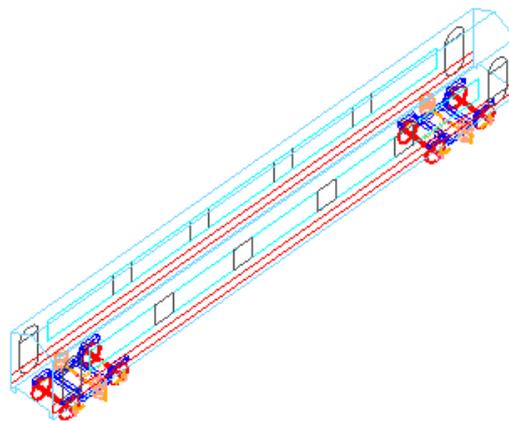


Figura 3.3. Ensamblaje estándar

- **Archivos de propiedades:** Se basan en ASCII, y contienen los datos para el modelado de los diferentes componentes.

Estos 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.

- **Plantillas:** Son modelos paramétricos, construidos por usuarios expertos en el generador de plantillas. Las plantillas, como por ejemplo la expuesta en la figura 3.4, definen por defecto los datos geométricos y topológicos del modelo.

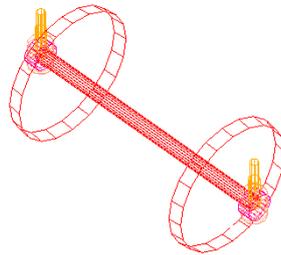


Figura 3.4. Plantilla estándar

- **Banco de pruebas:** 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. Además los bancos de pruebas pueden contener elementos de accionamiento que proporcionan movimiento o fuerzas, excitando así el ensamblaje.
- **Comunicadores:** Estos elementos permiten el intercambio de información entre los subsistemas, plantillas y banco de pruebas en el ensamblaje.

Un ensamblaje 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 pruebas.
- **Comunicadores de salida:** Proporcionan la información necesaria al resto de subsistemas o bancos de pruebas.

3.3 Modelización del vehículo

De maneja general, la masa del tren está localizada en el vagón, y sus propiedades no son difíciles de calcular, ya sea mediante el uso del CAD o mediante el uso de elementos finitos se pueden obtener los valores necesarios para la simulación, como son la masa, la posición del centro de gravedad y los momentos de inercia con respecto a cada uno de los ejes. Debido a que en la mayoría de situaciones la masa del chasis del vagón es menor que la de su carga y otros componentes, se debería tener en cuenta la posición de las mismas para la realización de los cálculos oportunos de la manera más veraz posible. En la mayoría de los casos, es muy difícil conocer la masa de cada uno de los elementos, así como su posición, por lo que se toma la masa de manera general como la fusión de las masas de cada uno de los elemento.

La flexibilidad en la caja es un factor importante en cuanto al estudio de vibraciones y al análisis del confort. Por este motivo, y debido a la imposibilidad de modelar un vagón flexible, el modelo ha estudio está dividido en dos sub-cuerpos conectados mediante un elemento de torsión, intentando modelar de esta manera la flexibilidad de la caja.

Los ejes calados, se modelan habitualmente como cuerpos rígidos, pero al igual que en la caja, la flexibilidad puede afectar a la interacción rueda-carril. Por ejemplo, la torsión del eje puede causar inestabilidad de marcha y la flexión del eje puede alterar

significativamente la dinámica de las fuerzas rueda-carril. En el caso a estudio, se ha tomado los ejes proporcionados por el programa, los cuales se comportan como elementos rígidos.

Por último cabe destacar la importancia que tiene la modelización adecuada de los elementos de la suspensión, tales como: resortes helicoidales, de láminas, cojinetes neumáticos, amortiguadores de fricción, hidráulicos, etc. Su función es fundamental debido a que permiten reducir las aceleraciones del bastidor del bogie y de la caja, así como disminuir las fuerzas dinámicas en el contacto rueda-raíl. De ahí su gran importancia a la hora de obtener unos resultados los más similares a la realidad.

3.4 Modelización del contacto rueda-raíl

La modelización del contacto rueda-raíl es uno de problemas más importantes en el comportamiento dinámico ferroviario. Pero debido a la complejidad presente en el desarrollo de las ecuaciones que describen su comportamiento, el contacto rueda-raíl se trata de uno de los fenómenos menos conocidos en el ámbito ferroviario.

Para conocer lo que ocurre en la zona de contacto, es necesario estudiar el comportamiento de dos sólidos elásticos con un movimiento de rodadura entre ellos, bajo la acción de cargas tanto normales como tangenciales a la zona de contacto. Esta zona de contacto se puede dividir a su vez en dos zonas:

- Zona de adhesión.
- Zona de deslizamiento.

En los últimos 100 años han aparecido diferentes teorías que tratan de definir tanto la forma como la extensión de cada una de las zonas del área de contacto. La primera teoría que intentaba explicar este fenómeno fue la desarrollada por Carter [18] en 1926; Carter consideró la superficie de contacto como una franja rectangular, por lo que su principal problema es que sólo tenía en cuenta los pseudo-deslizamientos longitudinales.

En 1958, Johnson [19] transformó la teoría de Carter, debido a que consideraba una superficie de contacto circunferencial, teniendo en cuenta, por consiguiente tanto los pseudo-deslizamientos longitudinales y transversales.

Pocos años después, en 1964, Johnson con la ayuda de Vermeulen [20] definieron la forma de la zona de contacto como elipsoidal, la cual estaba dividida en dos regiones asimétricas: una zona de adhesión y otra de deslizamiento.

Entre 1963 y 1964, se desarrolló una teoría para el pseudo-deslizamiento longitudinal puro, gracias a los estudios realizados por Haines y Ollerton [21] y de Halling [22]. En estos estudios se dividía el área de contacto en franjas paralelas a la dirección de rodadura, y a cada una de estas franjas era aplicable la teoría desarrollada por Carter. Esta teoría fue comprobada mediante resultados experimentales, comprobando su validez y pudiendo ser utilizada a día de hoy en el caso de que solo existan pseudo-deslizamientos longitudinales.

Por último, Kalker [23], en 1967, desarrolló una teoría que se caracterizaba por la suposición de que las fuerzas de contacto tangenciales y los pseudo-deslizamientos eran lineales; en la que se pudo comprobar que si los pseudo-deslizamientos longitudinales, transversales y de giro son muy pequeños, el área de adhesión representa toda la zona de contacto. La teoría de Kalker, aunque es muy utilizada, hay que tener en cuenta sus limitaciones, debido a las suposiciones realizadas, por este motivo, Kalker desarrolló una teoría más exacta, la cual tiene el inconveniente de que su uso supone un gran coste computacional. Por este motivo hay que tener en cuenta al usar esta última teoría de

Kalker, los beneficios obtenidos en relación al tiempo computacional necesario para llevarlo a cabo.

Todas estas teorías consideran un comportamiento Hertziano, así como que las características físicas de ambos cuerpos en contacto son casi-idénticas; estas suposiciones simplifican mucho el problema y tienen la ventaja de que se puede dividir el problema en dos, uno en el plano normal y otro en el tangencial, pudiendo obtener por separado la fuerza normal y la forma de la superficie de contacto, a partir del problema normal y las fuerzas en el contacto, mediante el problema tangencial.

3.4.1 Definición de pseudo-deslizamiento

De forma general, el movimiento entre dos cuerpos se puede clasificar en dos grupos:

- **Rodadura pura:** Tiene lugar cuando en un instante de tiempo, el punto de contacto de la rueda con el raíl tiene velocidad nula.
- **Deslizamiento puro:** Este movimiento se caracteriza en que solo se produce cuando la fuerza tangencial aplicada llega al límite de fricción.

Posteriormente, mediante diferentes estudios se descubrió un estado en el que la zona de contacto se puede dividir en una zona de adhesión y una zona de deslizamiento, actuando los dos estados al mismo tiempo. De forma que debajo del valor límite de fricción existe una zona de deslizamiento, bautizada con el nombre de pseudo-deslizamiento.

A continuación se pueden observar las expresiones de los pseudo-deslizamientos:

$$\varepsilon_x = \frac{\text{velocidad longitudinal real} - \text{velocidad longitudinal de rodadura pura}}{\text{velocidad longitudinal debido a la rodadura}} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$\varepsilon_y = \frac{\text{velocidad lateral real} - \text{velocidad lateral de rodadura pura}}{\text{velocidad lateral debido a la rodadura}} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\psi = \frac{\text{velocidad angular del cuerpo superior} - \text{velocidad angular del cuerpo inferior}}{\text{velocidad nominal de rodadura}} \quad \text{Ecuación 4}$$

3.4.2 Teoría de Hertz. Problema normal

Hertz [24] demostró que cuando dos cuerpos elásticos se someten a presión el uno contra el otro en las siguientes condiciones:

- Comportamiento elástico.
- Espacio semi-infinito.
- Radio de curvatura mucho más grande que la zona de contacto.
- Curvatura constante dentro de la zona de contacto.

Entonces:

- La superficie de contacto es una elipse.
- La superficie de contacto se considera plana.
- La presión de contacto es una semi-elipsoide.

En la figura 3.5 se puede observar la representación del contacto Hertziano en el ámbito ferroviario.

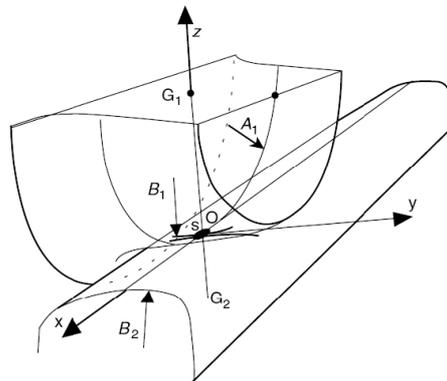


Figura 3.5. Contacto Hertziano en el ámbito ferroviario

Como la superficie de contacto es elíptica, es necesario definir sus semiejes, “a” y “b”:

$$a = m \cdot \left[\frac{3 \cdot \pi \cdot N}{4} \cdot \frac{K_1 + K_2}{K_3} \right]^{1/3} \tag{Ecuación 5}$$

$$b = n \cdot \left[\frac{3 \cdot \pi \cdot N}{4} \cdot \frac{K_1 + K_2}{K_3} \right]^{1/3} \tag{Ecuación 6}$$

Siendo:

$$K_1 = \frac{1 - \nu_w^2}{\pi \cdot E_w} ; \quad K_2 = \frac{1 - \nu_r^2}{\pi \cdot E_r} ; \quad K_3 = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{R_w} + \frac{1}{R'_w} + \frac{1}{R_R} + \frac{1}{R'_R} \right) \tag{Ecuación 7, 8 y 9}$$

En donde:

N = Fuerza normal total en la zona de contacto.

R_w = Radio de curvatura de la rueda.

R'_w = Radio de curvatura transversal de la rueda.

R_R = Radio de curvatura del raíl.

R'_R = Radio de curvatura transversal del raíl.

ν_i = Coeficientes de Poisson de la rueda o raíl.

E_i = Modulo de Young de la rueda o raíl.

m, n = Coeficientes dependientes del ángulo θ , cuyo valor se obtiene de la tabla 1, tal que:

$$\theta = \cos^{-1} \left(\frac{K_4}{K_3} \right) \tag{Ecuación 10}$$

y

$$K_4 = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{1}{R_w} + \frac{1}{R'_w} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_R} + \frac{1}{R'_R} \right)^2 + \left(\frac{1}{R_w} - \frac{1}{R'_w} \right) \cdot \left(\frac{1}{R_R} - \frac{1}{R'_R} \right) \cdot \cos 2\varphi \right] \tag{Ecuación 11}$$

Donde φ , representa el ángulo formado por los planos normales que contienen a las curvaturas $\frac{1}{R_W}$ y $\frac{1}{R_R}$.

θ (°)	m	n	θ (°)	m	n	θ (°)	m	n
0.5	61.4	0.1018	10	6.604	0.3112	60	1.486	0.717
1	36.89	0.1314	20	3.813	1.4123	65	1.378	0.759
1.5	27.48	0.1522	30	3.731	0.493	70	1.284	0.802
2	23.26	0.1691	35	3.397	0.530	75	1.202	0.846
3	16.5	0.1964	40	3.136	0.567	80	1.128	0.893
4	13.31	0.2188	45	1.926	0.604	85	1.061	0.944
6	9.79	0.2552	50	1.754	0.641	90	1.000	1.000
8	7.86	0.285	55	1.611	0.678			

Tabla 1. Valores m y n en función de θ

Una vez conocidos los valores de los semiejes de la zona de contacto, se puede calcular el valor de la carga normal (N). Para ello, es necesario conocer la distribución de tensiones en dicha zona, teniendo en cuenta que la distribución de tensiones es de la forma:

$$p(x, y) = p_0 \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2} \quad \text{Ecuación 12}$$

Y conociendo el valor de la presión máxima en la zona de contacto (p_0) y el valor del área del elipsoide obtenido, se puede calcular el valor de la fuerza normal de contacto, mediante la siguiente expresión:

$$N = \frac{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b \cdot p_0}{3} \quad \text{Ecuación 13}$$

Como se ha comentado en párrafos anteriores, la simplicidad de la solución obtenida se debe a la posibilidad de descomponer el problema en dos: uno en el plano normal, el cual ya ha sido resuelto en este punto, y un problema tangencial, el cual se resolverá a continuación.

3.4.3 Teoría de Kalker. Problema tangencial.

Kalker [25], en 1967, elaboró una teoría que permitía relacionar las fuerzas tangenciales en la zona de contacto con los pseudo-deslizamientos de una manera lineal. Esta teoría solo es válida cuando los pseudo-deslizamientos son pequeños, debido a que la zona de adhesión cubre prácticamente toda el área de contacto. Pero en el caso de estar ante grandes pseudo-deslizamientos, Kalker desarrolló una teoría más compleja, implementándola en una rutina denominada **CONTACT**. Debido al coste computacional que supone su utilización, se desarrolló la teoría simplificada denominada **FASTSIM** [26], la cual será explicada a continuación debido a que es una de las rutinas utilizadas por el Adams/Rail para la resolución de la zona de contacto.

Fastsim se basa en la teoría simplificada del contacto rueda-raíl, originalmente una subrutina de Fortran, se ha convertido en una de las herramientas computacionales más fructíferas para el estudio dinámico en el mundo del ferrocarril; por este motivo, está siendo utilizado en programas tales como: Adams/rail, Medyna y Voco entre otros.

Fastsim se basa en la hipótesis de Hertz, por lo tanto:

- La superficie de contacto es elíptica y plana, la presión es un elipsoide.
- Los deslizamientos se estiman en el centro de la elipse.
- Los coeficientes de Kalker c_{ij} son constantes en cualquier lugar de la elipse.
- La superficie elíptica de contacto está dividida en franjas independientes, longitudinales y paralelas.
- Todas las bandas o franjas son divididas en el mismo número de elementos, el cálculo de la tensión comienza desde el borde principal, pasando de elemento a elemento.
- El método está simplificado: una deformación local corresponde a una fuerza local.

Para la resolución del problema, la superficie elíptica, mostrada en la figura 3.6, se descompone en franjas paralelas en la dirección de rodadura. Debido a la forma elíptica, los elementos no tienen la misma longitud Δx .

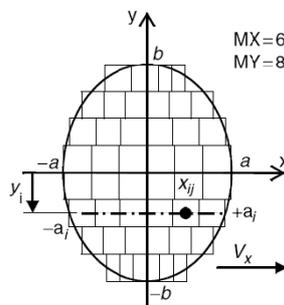


Figura 3.6. Descomposición en franjas de la zona de contacto

Una vez dividida la zona elíptica en diferentes franjas, se pueden obtener las expresiones de las fuerzas en el plano de contacto, mediante el conocimiento de la distribución de presiones en cada uno de los dos ejes:

$$p_x(x, y_i) = \left(\frac{\varepsilon_x}{L_1} - y_i \frac{\varphi}{L_2} \right) (x - a_i) \tag{Ecuación 14}$$

Donde el primer término representa el desplazamiento longitudinal rígido medio, y el segundo el efecto de giro como un deslizamiento rígido local en el punto (x,y) de la franja.

$$p_y(x, y) = \frac{\varepsilon_y}{L_2} (x - a_i) + \frac{\varphi}{2L_2} (x^2 - a_i^2) \tag{Ecuación 15}$$

Por lo tanto el valor de las fuerzas lineales de contacto son los siguientes:

$$F_x = - \iint p_x(x) \cdot d_x \cdot d_y = - \frac{8a^2 b \varepsilon_x}{3L_1} \tag{Ecuación 16}$$

$$F_y = \iint p_y(y) \cdot d_x \cdot d_y = - \frac{8a^2 b \varepsilon_y}{3L_2} - \frac{\pi a^3 b \varphi}{4L_2} \tag{Ecuación 17}$$

Siendo:

- a = semieje de la elipse en la dirección longitudinal.
- b = semieje de la elipse en la dirección transversal.

ϵ_x = pseudo-deslizamiento longitudinal.
 ϵ_y = pseudo-deslizamiento lateral.
 ϕ = pseudo-deslizamiento de giro.

y

$$L_1 = \frac{8a}{3c_{11}G}; \quad L_2 = \frac{8a}{3c_{22}G}; \quad L_3 = \frac{\pi a \sqrt{a/b}}{4c_{23}G} \quad \text{Ecuación 18,19 y 20}$$

Por último, cabe definir el valor que toman los coeficientes de Kalker c_{ij} en función de los valores de los semiejes de la elipse, así como del coeficiente de Poisson, que como se puede observar en la tabla 2, sólo están tabulados los valores de los coeficientes de Kalker para valores del coeficiente de Poisson de 0, 0.25 y 0.5. Por lo que, en la mayoría de los casos debido a que el coeficiente de Poisson del acero ésta cercano al 0.27, es necesario interpolar en la tabla 2 para obtener el valor de los coeficientes de Kalker deseados.

g	C ₁₁			C ₂₂			C ₂₃ = -C ₃₂			C ₃₃			
	$\sigma = 0$	1/4	1/2	$\sigma = 0$	1/4	1/2	$\sigma = 0$	1/4	1/2	$\sigma = 0$	1/4	1/2	
0.0	$\pi^2/4(1-\sigma)$			$\pi^2/4 = 2,47$			$\pi\sqrt{g}/3$	—	—	$\pi^2/16(1-\sigma)g$			
a/b	0.1	2.51	3.31	4.85	2.51	2.52	2.53	0.334	0.473	0.731	6.42	8.28	11.7
	0.2	2.59	3.37	4.81	2.59	2.63	2.66	0.483	0.603	0.809	3.46	4.27	5.66
	0.3	2.68	3.44	4.80	2.68	2.75	2.81	0.607	0.715	0.889	2.49	2.96	3.72
	0.4	2.78	3.53	4.82	2.78	2.88	2.98	0.720	0.823	0.977	2.02	2.32	2.77
	0.5	2.88	3.62	4.83	2.88	3.01	3.14	0.827	0.929	1.07	1.74	1.93	2.22
	0.6	2.98	3.72	4.91	2.98	3.14	3.31	0.930	1.03	1.18	1.56	1.68	1.86
	0.7	3.09	3.81	4.97	3.09	3.28	3.48	1.03	1.14	1.29	1.43	1.50	1.60
	0.8	3.19	3.91	5.05	3.19	3.41	3.65	1.13	1.25	1.40	1.34	1.37	1.42
	0.9	3.29	4.01	5.12	3.29	3.54	3.82	1.23	1.36	1.51	1.27	1.27	1.27
b/a	1.0	3.40	4.12	5.20	3.40	3.67	3.98	1.33	1.47	1.63	1.21	1.19	1.16
	0.9	3.51	4.22	5.30	3.51	3.81	4.16	1.44	1.59	1.77	1.16	1.11	1.06
	0.8	3.65	4.36	5.42	3.65	3.99	4.39	1.58	1.75	1.94	1.10	1.04	0.954
	0.7	3.82	4.54	5.58	3.82	4.21	4.67	1.76	1.95	2.18	1.05	0.965	0.852
	0.6	4.06	4.78	5.80	4.06	4.50	5.04	2.01	2.23	2.50	1.01	0.892	0.751
	0.5	4.37	5.10	6.11	4.37	4.90	5.56	2.35	2.62	2.96	0.958	0.819	0.650
	0.4	4.84	5.57	6.57	4.84	5.48	6.31	2.88	3.24	3.70	0.912	0.747	0.549
	0.3	5.57	6.34	7.34	5.57	6.40	7.51	3.79	4.32	5.01	0.868	0.674	0.446
	0.2	6.96	7.78	8.82	6.96	8.14	9.79	5.72	6.63	7.89	0.828	0.601	0.341
0.1	10.7	11.7	12.9	10.7	12.8	16.0	12.2	14.6	18.0	0.795	0.526	0.228	

Tabla 2. Coeficientes de Kalker

3.5 Modelización de la vía

El detalle a conseguir en el modelado de la vía depende del tipo de resultado que se busque. Mediante un diseño sencillo, como el mostrado en la figura 3.7, se puede estudiar el comportamiento de la interacción del vehículo con la vía, pero no se obtienen buenos resultados a la hora de analizar el comportamiento de la vía en mayor profundidad.

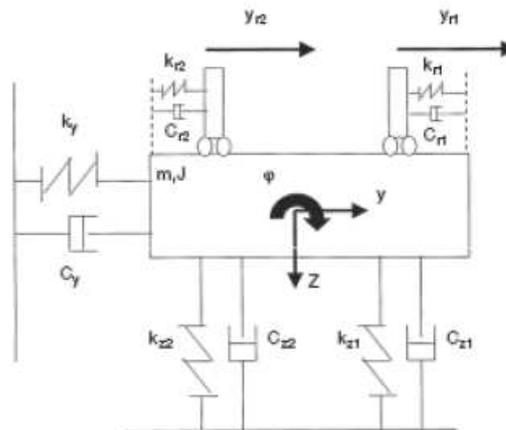


Figura 3.7. Modelado simple de la vía

Como se ha comentado anteriormente, existen diversos modelos de vía, según las necesidades buscadas [27]. El modelo más sencillo de vía es aquel constituido por una viga descansando en una cimentación continua y elástica; dicha cimentación es representada por una distribución uniforme de muelles rígidos. Mediante este modelo es posible calcular de una manera rápida y sencilla las deflexiones en el carril. Este modelo fue desarrollado por Winkler en 1867, pero tiene el problema de que los resultados obtenidos solo son aceptables para cargas estáticas, debido a que este modelo no incluye la masa, y por consiguiente no se pueden analizar los modelos dinámicos.

Finalmente, y con el objetivo de modelar los diferentes componentes que constituyen la vía, como pueden ser: las placas de asiento, las traviesas y el balasto; fue necesario descomponer el soporte del carril en varias capas interconectadas entre sí. La figura 3.8, muestra uno de los modelos más completos, el cual, fue desarrollado por Oscarsson [28].

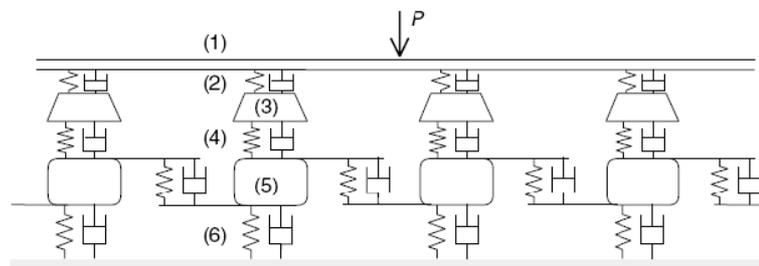


Figura 3.8. Modelado de la vía según Oscarsson

Por último, y tras los avances desarrollados en el mundo de la informática, se puede llevar a cabo un estudio más realista que el que se puede realizar mediante el uso de los modelos anteriores. Éste, se basa en la modelización de la vía mediante elementos finitos, en donde los carriles y traviesas se modelan como vigas y las placas de asiento mediante elementos elásticos.

Adams/Rail genera automáticamente el carril cuando se lleva a cabo un análisis dinámico o de estabilidad, para ello es necesario definir el correspondiente archivo de propiedades, a partir del cual, se definen las características de la vía.

3.6 Análisis del modelo

Una vez creado el ensamblaje del modelo, Adams/Raíl permite analizar los prototipos virtuales al igual que lo harías utilizando un prototipo físico.

Este software de simulación puede ejecutar una gran variedad de análisis, en donde es necesario especificar:

- El nombre del modelo.
- Los datos específicos dependiendo del tipo de análisis deseado.
- Los archivos de propiedades adicionales que describen la información que Adams/Rail necesita para llevar a cabo la simulación, como por ejemplo, el archivo que define el contacto rueda-raíl.

Los principales análisis que se pueden llevar a cabo con el programa son:

- **Análisis lineal:** Este análisis se utiliza para calcular los modos propios de vibración del vehículo ferroviario, para ello, el programa restringe el movimiento de los ejes calados y las ruedas con respecto a tierra mediante uniones fijas.
- **Análisis de precarga:** Se utiliza para conocer las fuerzas de precarga en la suspensión del vehículo, por lo tanto, suele servir para comprobar que las fuerzas aplicadas son iguales a las obtenidas después de la ejecución del análisis estático.
- **Análisis dinámico:** Se puede utilizar el análisis dinámico para determinar el comportamiento en curva, el descarrilamiento, el estudio del confort y la estabilidad.
- **Análisis de estabilidad:** Permite estudiar la estabilidad del ensamblaje, mediante análisis para diferentes velocidades y configuraciones del contacto rueda-raíl. Esta información puede ser utilizada para determinar la velocidad crítica de vehículo.

3.7 Adams/Postprocessor

Una vez realizadas las simulaciones adecuadas, es necesario el uso de este software, mostrado en la figura 3.9, para poder ver representadas las graficas, así como trabajar con las mismas.



Figura 3.9. Ventana de trabajo. 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. Modelo de vehículo ferroviario

4.1 Introducción

De manera general, los vagones de mercancías suelen estar constituidos por dos bogies de dos ejes.

Los bogies de carga se caracterizan, normalmente, por disponer de suspensión de una etapa, pudiéndose localizar entre los ejes montados y el bastidor del bogie, similar a la suspensión primaria de los trenes de viajeros, o entre el bastidor del bogie y la caja, denominada en este caso, suspensión secundaria. Según [7], el porcentaje de bogies que utilizan únicamente la suspensión primaria es superior a las otras dos configuraciones posibles.

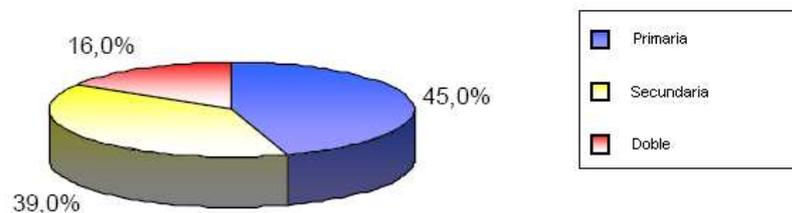


Figura 4.1. Porcentajes de uso de las suspensiones primarias, secundarias y/o ambas

Como se puede observar en la figura 4.1, existe un pequeño porcentaje de bogies que utilizan tanto la suspensión primaria como la secundaria, al igual que en la mayoría de coches de viajeros, esto es debido a la intención de mejorar el aislamiento de la carga, así como, reducir las reacciones con la vía.

El principal problema que aparece en los bogies de carga es la configuración de su sistema de suspensión; ya que, estos tienen que trabajar bajo condiciones de carga muy diferentes, desde vacío, a plena carga. Esta problemática puede producir grandes diferencias de carga, pudiendo existir diferencias entre carga y vacío del orden de cuatro veces en el eje y de más de cinco veces en el conjunto de resortes. Por este motivo, existen diferentes configuraciones, desde los que están constituidos por un sistema de muelles de rigidez independiente de la carga, hasta los que mediante diversos mecanismos son capaces de conseguir un sistema de suspensión dependiente de la carga, pasando por aquellos bogies que disponen de varios conjuntos de resortes para diferentes cargas en el eje.

4.2 El bogie Y25

Los bogies Y25 (y los bogies similares, tales como el Y33) se utilizan comúnmente en vehículos europeos de carga. En la figura 4.2, puede observarse el bogie Y25, objetivo de estudio.

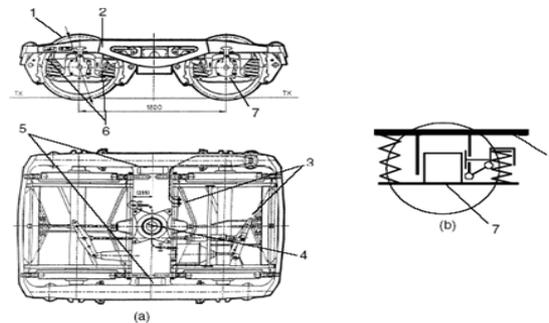


Figura 4.2. Fotografía bogie Y25

Se compone de una suspensión primaria de una etapa, consistente en un juego de pares de resortes helicoidales (con característica bilineal para trabajar en vacío y en carga) y un amortiguador de fricción Lenoir que proporciona amortiguación vertical y lateral. La fuerza de fricción depende de la carga vertical en el conjunto de resortes, de la que una componente es transferida a la cara de fricción por el pivote inclinado de Lenoir. La seguridad frente al descarrilamiento mejora por la separación vertical entre los resortes internos y externos en cada par, que da una rigidez más baja en vacío que en carga. El principal problema de este diseño de suspensiones aparece en casos de media carga, cuando el bogie descansa en el resorte “de carga” interno, haciendo la suspensión relativamente rígida para la carga transportada. En la figura 4.3, puede verse una representación esquemática del bogie Y25, así como del amortiguador de fricción Lenoir.

El bogie Y25 tiene un bastidor en forma de H que consiste en dos vigas longitudinales, una lateral y dos finales, y que puede ser tanto fundido como soldado.

La conexión del bogie al chasis del vehículo, se caracteriza en que el soporte central tiene ahora una superficie esférica con el fin de reducir las fuerzas asimétricas en el bastidor y en los soportes elásticos laterales.



1, eje montado; 2, chasis en forma de H; 3, brazo de palanca de freno; 4, zona plana; 5, cojinetes laterales; 6, conjunto de resortes; 7, caja de grasa.

Figura 4.3. Vista explicativa del funcionamiento de la suspensión en bogie Y25

4.3 Amortiguador de fricción Lenoir

El bogie para transporte de mercancías Y25 es uno de los más difundidos en Europa, caracterizado por el uso del amortiguamiento por fricción, permitiendo la reducción de las vibraciones ocasionadas durante la circulación del mismo [6].

Las superficies de fricción localizadas en la caja de grasa, como se representa en la figura 4.4, permiten la aparición de la fuerza de rozamiento en el plano YZ, es decir, tanto en la dirección vertical como en la transversal; por lo que se hace necesario desarrollar las ecuaciones matemáticas de la fuerza de rozamiento con respecto a dos grados de libertad. La representación de la fuerza de rozamiento sigue la clásica ley de Coulumb, como se puede observar en la figura 4.5.

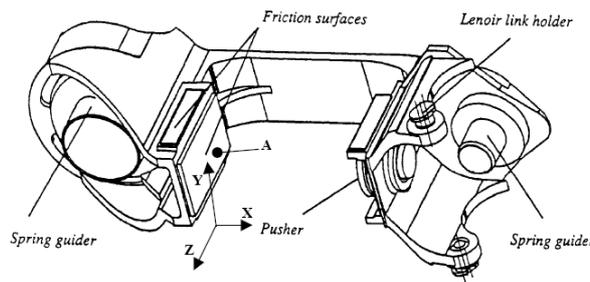


Figura 4.4. Vista de las superficies de fricción

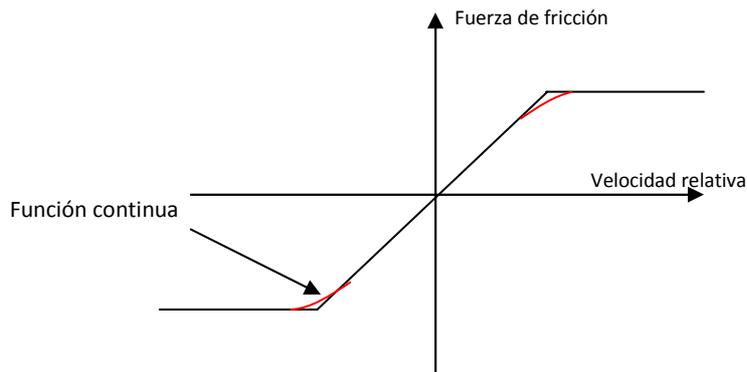


Figura 4.5. Representación de la función continua de la fuerza de rozamiento

Para poder simular el comportamiento observado de la fuerza de rozamiento, ha sido necesario establecer una función continua entre la fuerza de fricción y la velocidad relativa, obteniendo de forma general la siguiente expresión:

$$F_f = \frac{V \cdot \chi}{\sqrt{1 + \left(\frac{V \cdot \chi}{N \cdot \mu}\right)^2}} \tag{Ecuación 21}$$

De manera que:

- F_f = Fuerza de fricción.
- V = Velocidad media.
- χ = Pendiente medida desde el origen de la función fuerza/velocidad.
- μ = coeficiente de rozamiento.
- N = Fuerza normal.

Teniendo en cuenta las dos componentes de la velocidad, vertical (\dot{z}) y lateral (\dot{y}), el valor absoluto de la velocidad relativa es:

$$V = \sqrt{\dot{z}^2 + \dot{y}^2} \tag{Ecuación 22}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \dot{z} &= V \cdot \cos \theta \\ \dot{y} &= V \cdot \sin \theta \end{aligned}$$

Tal que:

θ = Angulo formado entre la velocidad media resultante (V) y el eje Z.

Por lo tanto, una vez implementadas las velocidades en función de la velocidad relativa absoluta y en relación al ángulo θ , como se puede comprobar en la figura 4.6, se pueden obtener las ecuaciones que definen la componente lateral y vertical de la fuerza de fricción:

$$F_{f,y} = F_f \cdot \sin \theta = \frac{V \cdot \chi \cdot \sin \theta}{\sqrt{1 + \left(\frac{V \cdot \chi}{N \cdot \mu}\right)^2}} = \frac{\dot{y} \cdot \chi}{\sqrt{1 + \left(\frac{V \cdot \chi}{N \cdot \mu}\right)^2}} \quad \text{Ecuación 23}$$

$$F_{f,z} = F_f \cdot \cos \theta = \frac{V \cdot \chi \cdot \cos \theta}{\sqrt{1 + \left(\frac{V \cdot \chi}{N \cdot \mu}\right)^2}} = \frac{z \cdot \chi}{\sqrt{1 + \left(\frac{V \cdot \chi}{N \cdot \mu}\right)^2}} \quad \text{Ecuación 24}$$

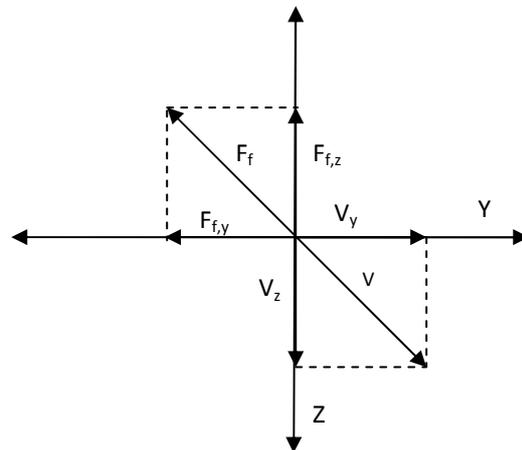


Figura 4.6. Descomposición de las fuerzas de fricción en el plano YZ

Además, en este bogie, la amortiguación del movimiento vertical es conseguida mediante un mecanismo conocido como **amortiguador de fricción Lenoir**, figura 4.7; el cuál, utiliza una parte del peso propio del vagón para transmitir una carga normal a las superficies de fricción. Por consiguiente, la amortiguación es sensible a la carga introducida.

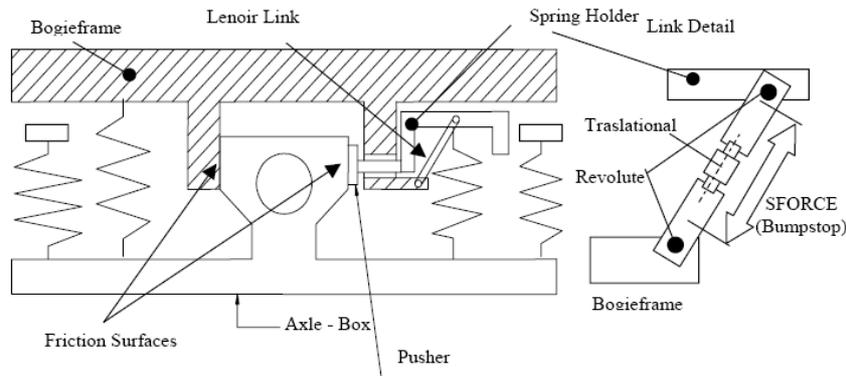


Figura 4.7. Modelización de la amortiguación por fricción seca

Mediante la figura 4.7, se puede descomponer el modelo en seis cuerpos rígidos:

- **Armazón:** Bastidor en forma de H que consiste en dos vigas longitudinales, una lateral y dos finales. El bastidor puede ser obtenido directamente por fundición o mediante la soldadura de las diferentes vigas.
- **Conexión Lenoir:** Está constituido de forma que por un lado este unido al bastidor del bogie, y por el otro lado se conecta con la sujeción del resorte; existiendo entre ambas partes, un movimiento relativo de translación, así como, una fuerza. Por consiguiente, cuando aparece una fuerza en la sujeción del resorte, proveniente del mismo, los dos elementos que une el amortiguador de fricción Lenoir se alejan, de modo que la fuerza es transferida al bogie.
- **Sujeción del resorte:** Su misión, como su nombre indica, consiste en mantener al resorte en su posición, es decir, en la caja de grasa. Éste está conectado al amortiguador de fricción Lenoir, encontrándose por lo tanto en una posición inclinada, consiguiendo de este modo la división de la fuerza en dos componentes en el plano X-Z. Esta sujeción transmite la fuerza a través del tope de la suspensión al empujador, el cual sólo tiene permitido el movimiento en la dirección X.
- **Empujador:** Utiliza la componente X del vector de fuerza creado en el tope de la suspensión, de manera que esta componente es usada como una fuerza normal en el plano Y-Z, en el cuál, actúan las fuerzas de fricción.
- **Caja de grasa:** La superficie de fricción primaria está localizada en el lado izquierdo de la caja de grasa en el plano Y-Z; la superficie puede ser descrita mediante las ecuaciones 23 y 24, comentadas anteriormente.
- **Eje montado:** Constituido por dos ruedas fijas unidas a un eje común, consiguiendo que ambas ruedas tengan la misma velocidad angular.

La “suspensión secundaria” se consigue mediante un pivote central con una gran rigidez, y el amortiguamiento es conseguido mediante una pareja de soportes laterales, dos superficies de fricción fijadas al exterior del pivote del bogie y precargado, como se puede comprobar en la figura 4.8.

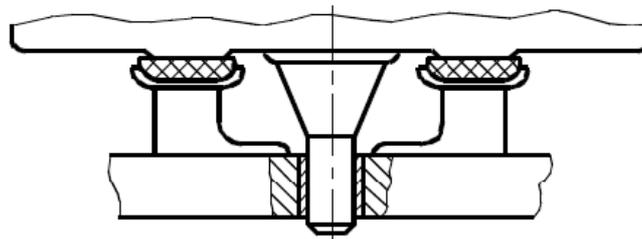


Figura 4.8. Pivote central

Debido a la complejidad existente en el amortiguador de fricción Lenoir, y según [6], los tiempos computacionales que se obtienen simulando su comportamiento, mediante el programa Adams/Rail, son muy altos; por lo que es aconsejable simplificar al máximo el bogie, como se puede ver en la figura 4.9.

Mediante este sencillo modelo, se puede simular igualmente las características del amortiguador de fricción Lenoir, para ello, sólo es necesario introducir las ecuaciones que definen su comportamiento entre el eje y la caja de grasa.

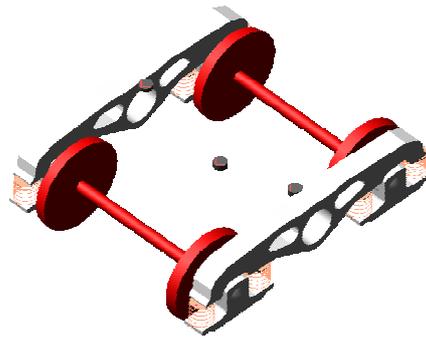


Figura 4.9. Bogie Y25 modelado en Adams/rail

Mediante la figura 4.10, se pueden ver los diferentes elementos utilizados para simular de la manera más veraz posible el comportamiento del bogie Y25. Hay que tener en cuenta que para simular el comportamiento real de algunos de los elementos del bogie Y25, ha sido necesario representar sus características mediante diferentes componentes en el programa, tal como se puede observar a continuación.

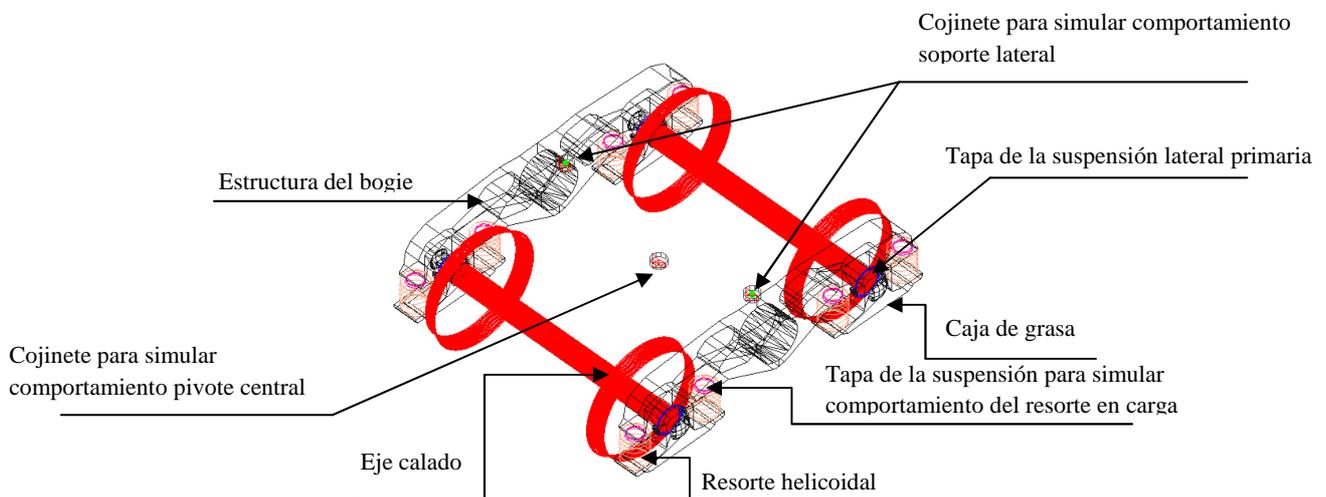


Figura 4.10. Componentes utilizados para el modelado del Bogie Y25

4.4 Características técnicas

Para llevar a cabo las simulaciones requeridas para el estudio mediante Adams/Rail, es necesario definir las propiedades físicas [29] de cada uno de los componentes que constituyen el sistema general, así como otra serie de parámetros importantes como pueden ser: las propiedades geométricas y longitudinales, el perfil de la rueda, el perfil del carril, el peralte, radio de curvatura, etc.

4.4.1 Propiedades físicas

Para llevar a cabo el diseño de cada uno de los componentes que constituyen el modelo en Adams/Rail, es necesario definir las propiedades físicas representadas en la tabla 3.

Cuerpo	M (kg)	I _{xx} (kg·m ²)	I _{yy} (kg·m ²)	I _{zz} (kg·m ²)
½ Vagón	40.000	47.500	510.000	500.500
Bogie	2.220	1.975	1.560	2.850
Caja de grasa	20	5	5	5
Soportes laterales	25	10	10	10
Eje montado	1.300	688	100	688

Tabla 3. Características físicas del bogie Y25

Además de las características anteriores hay que tener en cuenta que:

- Radio de rodadura = 0,42 m
- El vagón está separado en dos cuerpos rígidos con el centro de gravedad a +/- 4,815 m a lo largo del eje X y unidos entre sí mediante una unión de revolución, caracterizada por una rigidez a torsión de 10,5 MN/m.
- La masa e inercia de los soportes laterales puede ser modificada según el peso del vagón. Aconsejando valores más bajos para vehículos más ligeros.

4.4.2 Propiedades geométricas y de sobrecarga

En la tabla 4, se representan las precargas aplicadas a los diferentes elementos de la suspensión, así como las distancias características que definen al bogie.

Propiedades geométricas y de sobrecarga	
Distancia entre los ejes	1.8 m
Espacio entre los pivotes de los bogies	15,7 m
Precarga total secundaria	392.240 N
Precarga secundaria en los soportes laterales(x2)	19.282 N
Precarga secundaria en la posición central	353.676 N
Precarga de la suspensión primaria (total)	103.625 N por lado
Precarga de la suspensión primaria en carga	37.450 N por tope de la suspensión
Precarga de la suspensión primaria en vacío	14.362,5 N por resorte
Carga estática por eje (≈22 T)	220.390 N por eje
Carga estática en la rueda	110.195 N por rueda

Tabla 4. Propiedades geométricas y de sobrecarga

Cabe destacar que, las propiedades anteriormente descritas pueden variar dependiendo de la carga a transportar por el vagón. Por lo que es necesario seguir las siguientes reglas para realizar las modificaciones oportunas:

- A los dos soportes laterales normalmente les corresponde el 31% de la carga tarada; sin embargo, las precargas no deben ser cambiadas.
- En el pivote central, solo le corresponde la carga del vagón incrementada desde su condición de tara.
- Para la suspensión primaria, el equilibrio tiene que ser encontrado desde la condición de vacío, aplicando, a continuación el estado de cargas deseado. Para llevar a cabo el cálculo necesario, hay que tener en cuenta:
 - Originalmente el muelle “en vacío” tiene que comprimirse los 10 mm de holgura presente entre ambos resortes, para que a partir de este momento, el resorte para la situación de carga empiece a funcionar.

- Entonces, hay que encontrar la posición de equilibrio considerando los dos resortes en paralelo.
- Por último, añadir la precarga al resorte “en vacío” y modificar la posición del resorte en “carga” según la posición anteriormente obtenida.

4.4.3 Propiedades de la suspensión

Una vez descritas las propiedades generales que definen el vagón de mercancías, se hace hincapié en las propiedades representativas de la suspensión presente en el bogie Y25, debido a la importancia que ésta representa para la obtención de las aceleraciones durante la simulación del modelo.

4.4.3.1 Suspensión primaria

En el bogie Y25, la **suspensión primaria** se caracteriza por trabajar de manera diferente según se encuentre el vagón cargado o vacío. Para ello, existe un resorte trabajando cuando el vehículo circula en vacío, y otro resorte concéntrico al anterior que empieza a trabajar cuando el vagón está cargado. Este resorte tiene una holgura con respecto al anterior de 10 mm, de manera que cuando el primer resorte llega a comprimirse esos 10 mm, empiezan a trabajar los dos resortes conjuntamente. Para lo cual, ha sido necesario definir las propiedades del muelle que trabaja en vacío; mientras que, el otro muelle ha tenido que ser simulado mediante un tope de la suspensión, para poder asemejar su comportamiento lo más posible al modelo real.

A continuación, en la tabla 5, se exponen las propiedades que definen el muelle que trabaja en vacío, así como la figura 4.11; la cual, representa el comportamiento del resorte que trabaja en condición de carga.

Kx (N/m)	$7.0 \cdot 10^5$
Ky (N/m)	$7.0 \cdot 10^5$
Kz (N/m)	$5.0 \cdot 10^5$
Tx (Nm/rad)	0.0
Ty (Nm/rad)	0.0
Tz (Nm/rad)	0.0

Tabla 5. Propiedades del muelle con trabajo en vacío

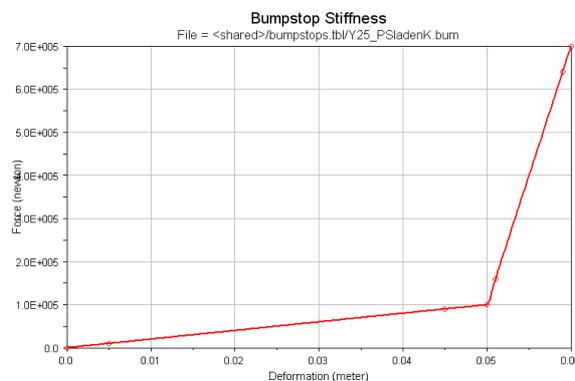


Figura 4.11. Fuerza Vs. Deformación. Simulación comportamiento resorte en condición de carga

Dentro de la suspensión primaria, también hay que tener en cuenta los topes de la suspensión primaria lateral, situados a cada lado del eje calado, caracterizados mediante la figura 4.12.

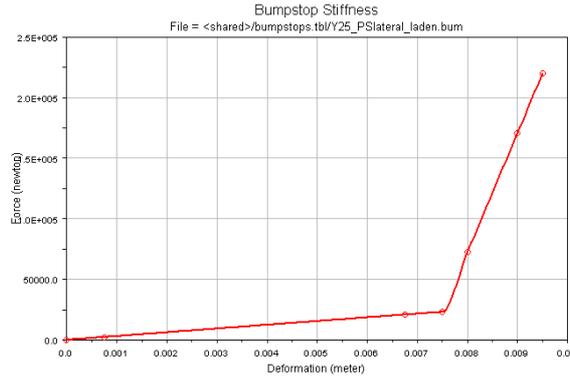


Figura 4.12. Fuerza Vs. Deformación. Simulación comportamiento de los topes de la suspensión primaria lateral

Por último, dentro de este apartado se pueden incluir las superficies de fricción. Caracterizadas mediante las ecuaciones 23 y 24 definidas anteriormente, teniendo en cuenta los siguientes valores:

- μ = Coeficiente de fricción = 0,4.
- χ = Pendiente desde el origen de la función de transferencia fuerza/velocidad = $3 \cdot 10^6$ Ns/m.

4.4.3.2 Suspensión secundaria

La **suspensión secundaria** está constituida por el pivote central y los soportes laterales. Cada uno de ellos, modelados de la siguiente forma:

- **Pivote central:** Ha sido modelado mediante un cojinete, caracterizado por la figura 4.13. Hay que tener en cuenta que, las gráficas de los tres componentes X, Y e Z se encuentran superpuestas.

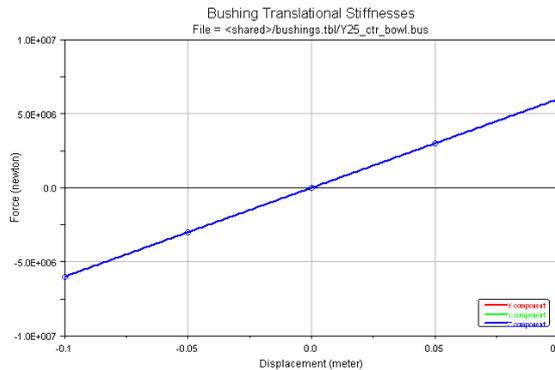


Figura 4.13. Fuerza Vs. Desplazamiento. Simulación comportamiento pivote central

Además, para caracterizar su correspondiente superficie de fricción, es necesario introducir las siguientes ecuaciones, que representan las fuerzas de fricción con respecto a los ejes Y, X y Z:

$$F_x = \frac{W_x \cdot X}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_x \cdot X}{F \cdot N \cdot \mu}\right)^2}} \tag{Ecuación 25}$$

$$F_y = \frac{W_y \cdot X}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_y \cdot X}{F \cdot N \cdot \mu}\right)^2}} \tag{Ecuación 26}$$

$$F_z = \frac{W_z \cdot X}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_m \cdot X}{r \cdot N \cdot \mu}\right)^2}} \tag{Ecuación 27}$$

Con:

- W_x = Velocidad angular relativa alrededor del eje X.
- W_y = Velocidad angular relativa alrededor del eje Y.
- W_z = Velocidad angular relativa alrededor del eje Z.
- W_m = Velocidad angular relativa entre el vagón y el pivote central.
- χ = Tangente al origen de la función de transferencia fuerza/velocidad = $3 \cdot 10^6$ Ns/m.
- N = Fuerza normal.
- μ = Coeficiente de fricción = 0,19.
- r = Radio del pivote central.

- **Soporte lateral:** Para definirlo ha sido necesario introducir la masa del mismo, así como sus inercias:

$$M = 25 \text{ kg} ; I_{xx} = I_{yy} = I_{zz} = 10 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Posteriormente, se le ha restringido su movimiento respecto al cuerpo del vagón en el plano XY, así como eliminado su rotación con respecto al mismo plano.

También ha sido necesario modelar un cojinete para definir su comportamiento, mediante el cual se ha podido representar los desplazamientos de dichos elementos según la fuerza proporcionada con respecto a cada uno de los ejes. Dicha representación, puede observarse en la figura 4.14.

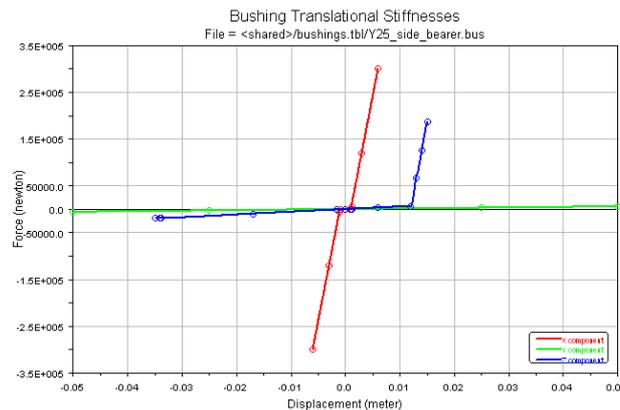


Figura 4.14. Fuerza Vs. Desplazamiento. Simulación comportamiento soporte lateral

Por último, para definir las fuerzas de fricción presentes en los soportes laterales, se ha vuelto a utilizar las ecuaciones 23 y 24 definidas anteriormente, teniendo en cuenta que para este caso:

$$\mu = \text{Coeficiente de fricción} = 0,35.$$

4.4.4 Perfil de la rueda

El perfil utilizado en este modelo es uno de los perfiles proporcionados para la simulación de este tipo de bogie de carga, denominado como “P8”. En la figura 4.15 se puede observar el perfil utilizado para el modelado del bogie Y25.

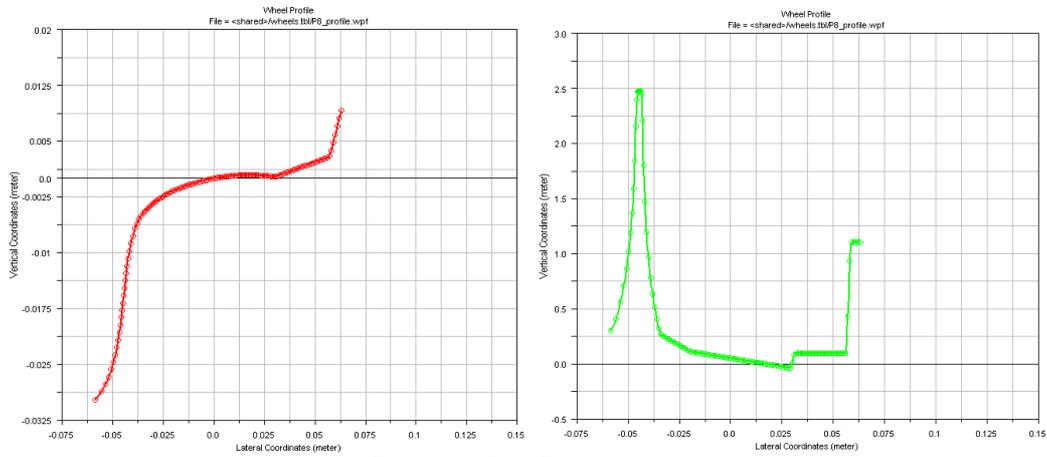


Figura 4.15. Perfil P8 y su derivada

5. Estudio del Confort

5.1 Introducción

Se entiende por **confort** al estado que implica una sensación de bienestar, o a la ausencia de incomfortabilidad, estrés o dolor. Sin embargo, el confort no solo se consigue mediante la eliminación o reducción de los factores negativos, si no que hay que tener también muy en cuenta aquellos factores positivos para el bienestar.

En el ámbito ferroviario, aunque el confort es una de las variables más importantes para conseguir el bienestar buscado, existen otros factores a tener en cuenta.

5.2 Confort de marcha

Es importante conocer la definición de diferentes términos utilizados normalmente al hablar del confort como son: confort del viajero, calidad de marcha y confort de marcha, debido a la confusión que existe, así como, al solapamiento de las definiciones entre sí.

5.2.1 Calidad de marcha

La **calidad de la marcha** se define como la reacción de una persona a un conjunto de condiciones físicas, tales como, variables dinámicas, ambientales o espaciales:

- **Variables dinámicas:** aceleraciones y sobre-aceleraciones en los tres ejes (longitudinal, lateral y vertical), movimientos angulares en los tres ejes (cabeceo, balanceo y guiñada) y movimientos repentinos como choques y sacudidas.
- **Variables ambientales:** dentro de este punto hay que tener en cuenta variables como la temperatura, presión, calidad del aire, ventilación del habitáculo, el ruido, las altas frecuencias de vibración, etc.
- **Variables espaciales:** hay que tener en cuenta el habitáculo del tren, espacio entre asientos, así como otras variables relacionadas con el espacio disponible en el habitáculo.

Con respecto a las escalas que se utilizan para evaluar la calidad de confort, se puede decir, que un elevado valor en la escala de la calidad de marcha lleva asociado un buen nivel de confort; mientras que un valor alto en la escala de confort de marcha, o incomodidad de marcha, representa un bajo nivel de confort, como se puede comprobar en las referencias [30, 31 y 32] así como en la normativas ISO y CEN [33, 34 y 35].

5.2.2 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 (lateral, longitudinal 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.

5.2.3 Modelos matemáticos para la evaluación del confort

A continuación se expondrán los modelos matemáticos utilizados para la evaluación del confort:

- **N_{MV} : Método simplificado de evaluación del confort**

$$N_{MV} = 6 \cdot \sqrt{(a_{XP95})^2 + (a_{YP95})^2 + (a_{ZP95})^2} \quad \text{Ecuación 28}$$

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 un ensayo de 5 minutos de duración.

- **N_{VA} : Método general de evaluación del confort**

$$N_{VA} = 4 \cdot (a_{ZP95}) + 2 \cdot \sqrt{(a_{YA95})^2 + (a_{ZA95})^2} + 4 \cdot (a_{XD95}) \quad \text{Ecuación 29}$$

Al igual que en el método anterior, los valores entre paréntesis, representan los percentiles 95 de las diferentes aceleraciones, en valores rms de 5 segundos, para una duración del ensayo de 5 minutos.

En donde:

N = Nivel de confort ($N < 1$ muy confortable y $N > 5$ muy inconfortable).

a_{ZP95} = es la aceleración vertical medida a nivel de suelo.

a_{YA95} = es la aceleración lateral medida en el interface soporte/asiento.

a_{ZA95} = es la aceleración vertical medida en el interface soporte/asiento.

a_{XD95} = es la aceleración longitudinal medida en el respaldo.

Este método correspondiente con la norma UIC 513, ha sido uno de los métodos utilizados para la evaluación del confort en el modelo, teniendo en cuenta que estamos ante un vagón de mercancías, se ha llegado a la decisión de tomar las aceleraciones del centro de gravedad para tener una idea global del confort de nuestro vehículo ferroviario. Además al estudiar mediante estas formulas el confort en curva, el tiempo de estudio es del orden de 30 segundos, dependiendo de la velocidad a simular en el tren.

Una vez calculados los valores con las expresiones anteriores, hay que darles significado mediante la utilización de la escala mostrada en la tabla 6.

$N < 1$	Muy confortable
$1 \leq N < 2$	Confortable
$2 \leq N < 4$	Medio
$4 \leq N < 5$	Inconfortable
$N \geq 5$	Muy inconfortable

Tabla 6. Escala de confort según UIC 513

• **W_z : Índice de confort de Sperling**

El índice de confort de Sperling, se basa en la resolución de la ecuación 30, destacando la ausencia de la aceleración longitudinal, debido a la poca influencia de su valor en el confort del vehículo.

$$W_z = \sqrt[10]{\int_{0.5}^{30} a^3 \cdot B^3 \cdot df}$$

Ecuación 30

Tal que:

f = Frecuencia en Hz.

a = Amplitud de la señal a una frecuencia f [Hz] dada.

B = Factor de ponderación de frecuencia, siendo diferente según sea la aceleración vertical o lateral.

$$B_{S(dir,vertical)} = 0.588 \cdot \sqrt{\frac{1.911 \cdot f^2 + (0.25 f^2)^2}{(1 - 0.277 \cdot f^2)^2 + (1.563 \cdot f - 0.0368 \cdot f^3)^2}}$$

Ecuación 31

$$B_{W(dir,lateral)} = 0.737 \cdot \sqrt{\frac{1.911 \cdot f^2 + (0.25 f^2)^2}{(1 - 0.277 \cdot f^2)^2 + (1.563 \cdot f - 0.0368 \cdot f^3)^2}}$$

Ecuación 32

En este caso el confort de marcha se estima teniendo en cuenta las expresiones presentes en la tabla 7.

1	Notoria
2	Claramente visible
2,5	Más pronunciada pero no desagradable
3	Fuerte, irregular, pero aun tolerable
3,25	Muy irregular
3,5	Extremadamente irregular, desagradable, molesto; exposición prolongada intolerable
4	Extremadamente desagradable; exposición prolongada perjudicial

Tabla 7. Escala de confort según Sperling

Los problemas causantes de la falta de confort en vehículos ferroviarios deben ser los mismos tanto en tramos rectos como curvos. Pero teniendo en cuenta que en

tramos curvos existe un nivel cuasi-estático adicional de aceleración lateral en el coche, correspondiente a la curvatura, peralte, velocidad o ante la posibilidad de estar trabajando con trenes basculantes.

A causa de las diferencias existentes en el tránsito en curva o en recta, diferentes compañías ferroviarias como “British Rail Research” han llevado a cabo diferentes test para la evaluación del confort bajo el tránsito en curva. Estos test son basados en la propia experiencia de los pasajeros, obteniendo a partir de esta experiencia, la siguiente expresión matemática:

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

$$P_{CT} = a \cdot \ddot{y} + b \cdot \dddot{y} - c + d \cdot \theta^e$$

Ecuación 33

A partir de esta ecuación se ha intentado reflejar la reacción de los viajeros en el tránsito por curva, para ello, se ha tenido en cuenta la sensibilidad de los viajeros al cambio en el nivel de aceleración (*y en % de g*), al ratio del cambio de la aceleración (*y en % de g por segundo*) y a la velocidad de balanceo (*θ en grados por segundo*).

La ecuación 33 está constituida por diferentes constantes obtenidas de las pruebas realizadas por las compañías ferroviarias, obteniendo la tabla 8.

	a	b	c	d	e
Viajeros sentados	0,88	0,95	5,9	0,12	1,626
Viajeros a pie	2,8	2,03	11,1	0,185	2,283

Tabla 8. Constantes de PCT

- **P_{DE}: Percepción de confort, por los viajeros, en la circulación por curva.**

$$P_{DE} = a \cdot \ddot{y}_p + b \cdot \ddot{y}_m - c$$

Ecuación 34

Este método, desarrollado inicialmente por las compañías británicas, y presente como método de cálculo de confort en la normativa europea [34], consiste en la filtración de la señal de la aceleración lateral, mediante un filtro paso bajo de 2 Hz, para posteriormente poder obtener el nivel medio de la señal (*y_m^{''}*), así como, el nivel pico-pico (*y_p^{''}*), en ventanas móviles de 2 segundos.

Como en el método anterior, las aceleraciones se toman como % de g, y las constantes, en este caso, toman los valores de la tabla 9.

	a	b	c
Viajeros sentados	0,83	1,28	21,7
Viajeros de pie	1,63	2,65	37

Tabla 9. Constantes de PDE

6. Resultados de la simulación

6.1 Introducción

Una vez llevado a cabo el ensamblaje del modelo a estudio, y tras la definición de las propiedades características de cada uno de los elementos que constituyen el vagón de mercancías con 22 Tm por eje, se realizan diferentes simulaciones para conocer el comportamiento del bogie Y25.

Antes de obtener las aceleraciones necesarias para el estudio de confort, es recomendable la realización de un análisis de precarga, así como de un análisis lineal, los cuales nos pueden dar información de la correcta construcción del modelo, de los modos de vibración y de la estabilidad del mismo.

Posteriormente, se ha llevado a cabo diferentes análisis dinámicos para diferentes radios de curvatura, comprendidos entre $R = 200 - 600$ m. Para cada uno de estos radios de curvatura, se ha simulado tanto para uno como para dos vagones su comportamiento a diferentes velocidades; teniendo en cuenta, que este tipo de bogie llega a su velocidad crítica a unos 120 km/h [36].

Para cada uno de los diferentes casos, se han obtenido las aceleraciones longitudinales, verticales y laterales con respecto al centro de gravedad, a partir de las cuales se obtienen los índices de confort para cada estudio.

6.2 Análisis de precarga

Gracias al análisis de precarga se comprueba que tanto la operación de ensamblado como la definición de las propiedades de los componentes se han llevado a cabo con éxito.

Adams/Rail calcula las fuerzas de precarga mediante la distribución de masas aplicada al modelo y, una vez obtenidas, las aplica directamente a cada elemento de la suspensión. Cuando el programa aplica las respectivas precargas, puede suceder que la simetría del modelo desaparezca. Este suceso puede deberse a un mal reparto de masas, provocando que unos elementos de la suspensión se encuentren mas cargados que otros; dando lugar, a lo denominado como disimetría.

A partir de un análisis de precarga, se comprueba que nuestro modelo se encuentra perfectamente construido, ya que, según la expuesto en la tabla 10, todos los elementos mantienen la simetría, algo que se debe de tener en cuenta a la hora de realizar el resto de los análisis.

```

[SUSPENSION_ELEMENT]
N_SUSPENSION_ELEMENTS = 16
SUSPENSION_ELEMENT_1 = '.nuevo.Y25_lad_front.uel_P$1_Klin'
T_PRELOAD_Z_1 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_2 = '.nuevo.Y25_lad_front.uel_P$1_KZout'
T_PRELOAD_Z_2 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_3 = '.nuevo.Y25_lad_front.uel_P$1_KZout'
T_PRELOAD_Z_3 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_4 = '.nuevo.Y25_lad_front.uel_P$2_KZout'
T_PRELOAD_Z_4 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_5 = '.nuevo.Y25_lad_front.uel_P$2_KZout'
T_PRELOAD_Z_5 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_6 = '.nuevo.Y25_lad_front.uel_P$2_KZout'
T_PRELOAD_Z_6 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_7 = '.nuevo.Y25_lad_front.uel_P$2_KLin'
T_PRELOAD_Z_7 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_8 = '.nuevo.Y25_lad_front.uel_P$2_KLin'
T_PRELOAD_Z_8 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_9 = '.nuevo.Y25_lad_rear.uel_P$1_KLin'
T_PRELOAD_Z_9 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_10 = '.nuevo.Y25_lad_rear.uel_P$1_KLin'
T_PRELOAD_Z_10 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_11 = '.nuevo.Y25_lad_rear.uel_P$1_KZout'
T_PRELOAD_Z_11 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_12 = '.nuevo.Y25_lad_rear.uel_P$1_KZout'
T_PRELOAD_Z_12 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_13 = '.nuevo.Y25_lad_rear.uel_P$2_KZout'
T_PRELOAD_Z_13 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_14 = '.nuevo.Y25_lad_rear.uel_P$2_KZout'
T_PRELOAD_Z_14 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_15 = '.nuevo.Y25_lad_rear.uel_P$2_KLin'
T_PRELOAD_Z_15 = 14362.4
SUSPENSION_ELEMENT_16 = '.nuevo.Y25_lad_rear.uel_P$2_KLin'
T_PRELOAD_Z_16 = 14362.4

```

Tabla 10. Comprobación de simetría en los elementos de la suspensión

6.3 Análisis lineal

Todo sistema con masa y rigidez puede vibrar, por lo que a partir de un análisis lineal se pueden obtener los autovalores, los modos propios de vibración y las frecuencias naturales a las que se producen. Aunque de forma general las ecuaciones que determinan la respuesta dinámica no son excesivamente lineales, se puede llevar a cabo un análisis lineal para determinar las frecuencias modales y los modos de vibración.

De forma general, las expresiones dinámicas del movimiento se pueden representar como:

$$f(X, \dot{X}, \ddot{X}) = U(t) \quad \text{Ecuación 37}$$

A partir de esta expresión se representa como el vector de excitaciones exteriores $U(t)$ depende del vector fuerza. El cual, a su vez, está definido en función del desplazamiento, velocidad y aceleración.

Por ejemplo, debido a las fuerzas de rozamiento presentes en la interfaz rueda-carril, el vehículo ferroviario puede verse sometido a oscilaciones autoexcitadas. Esto se produce mientras el vehículo se desplaza a lo largo de la vía, y sus características dependen de su velocidad de avance. Por debajo de una cierta velocidad, las vibraciones que aparecen debido a una pequeña perturbación tienden a desaparecer o permanecen con una pequeña amplitud, siendo su energía, disipada por el amortiguamiento existente. Por encima de esta velocidad, sin embargo, una perturbación similar provoca oscilaciones que aumentarían hasta que queden limitadas por el choque de las pestañas de las ruedas contra los carriles.

Si se consideran la existencia de pequeños desplazamientos con respecto a la posición de equilibrio, y se realiza una función de Taylor de primer orden, la ecuación anterior queda de la forma siguiente:

$$f(X_0, \dot{X}_0, \ddot{X}_0) + \frac{\delta f}{\delta X} \Delta X + \frac{\delta f}{\delta \dot{X}} \Delta \dot{X} + \frac{\delta f}{\delta \ddot{X}} \Delta \ddot{X} = U_0 + \Delta U(t) \quad \text{Ecuación 38}$$

Teniendo en cuenta que el subíndice 0 representa la posición de equilibrio, y que ésta corresponde con la posición de referencia, la ecuación anterior queda simplificada como se muestra a continuación:

$$\frac{\delta f}{\delta X} \Delta X + \frac{\delta f}{\delta \dot{X}} \Delta \dot{X} + \frac{\delta f}{\delta \ddot{X}} \Delta \ddot{X} = \Delta U(t) \quad \text{Ecuación 39}$$

Simplificando la ecuación anterior de la siguiente manera:

$$\Delta X = x$$

$$\Delta U = u$$

$$\frac{\delta f}{\delta X} = K$$

Ecuación 40

$$\frac{\delta f}{\delta \dot{X}} = C$$

$$\frac{\delta f}{\delta \ddot{X}} = M$$

Se llega a la ecuación linealizada del movimiento:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{u(t)\} \quad \text{Ecuación 41}$$

En donde:

$[M]$ = Matriz de masa.

$[C]$ = Matriz de amortiguamiento.

$[K]$ = Matriz de rigidez.

Por lo tanto, Adams/Raíl al llevar a cabo un análisis modal, define unas nuevas coordenadas de forma que las ecuaciones del movimiento estén desacopladas. Una vez realizado este tratamiento previo a las ecuaciones del movimiento, se puede resolver cada una de las “n” ecuaciones de manera independiente, mediante la definición de las condiciones iniciales. Consiguiendo convertir un problema de “n” grados de libertad, en “n” ecuaciones de un grado de libertad.

Para obtener la nueva base de las matrices, formada por autovectores del sistema amortiguado. Lo que se hace es calcular los autovectores y autovalores de la ecuación del movimiento linealizada para una vibración libre amortiguada. Esta ecuación es la siguiente:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \mathbf{0} \quad \text{Ecuación 42}$$

Empleando el siguiente vector definido como:

$$\{y\} = \begin{Bmatrix} \{x\} \\ \{\dot{x}\} \end{Bmatrix} \quad \text{Ecuación 43}$$

Y reescribiendo la ecuación linealizada del movimiento de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} [0] & [M] \\ [C] & [C] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{x\} \\ \{\dot{x}\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} -[M] & [0] \\ [0] & [K] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{x\} \\ \{\dot{x}\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{0\} \end{Bmatrix} \quad \text{Ecuación 44}$$

Se obtiene la siguiente expresión:

$$[A] \cdot \{\dot{y}\} + [B] \cdot \{y\} = \{0\} \quad \text{Ecuación 45}$$

Si se multiplica ambos términos por la inversa de “A” ($[A]^{-1}$):

$$\{\dot{y}\} - [H] \cdot \{y\} = \{0\} \quad \text{Ecuación 46}$$

Donde:

$$[H] = -[A]^{-1} \cdot [B] \quad \text{Ecuación 47}$$

Buscando soluciones para la ecuación 46 de la forma:

$$\{y\} = \{\psi\} \cdot e^{-\gamma \cdot t} \quad \text{Ecuación 48}$$

Donde “ γ ” es un numero complejo y $\{\psi\}$ es el vector modal constituido por elementos complejos. Sustituyendo la forma de la solución buscada en la ecuación 46, se obtiene:

$$|\gamma[I] - [H]| \cdot \{\psi\} = 0 \quad [I] = \text{matriz identidad} \quad \text{Ecuación 49}$$

Por lo tanto la ecuación característica del sistema es:

$$|\gamma[I] - [H]| = 0 \quad \text{Ecuación 50}$$

Solucionando la ecuación característica, se obtienen las raíces “ γ_i ”. Las cuales, representan “ $2n$ ” autovalores complejos conjugados. Sustituyendo las raíces obtenidas en la ecuación 48, se obtiene sus correspondientes autovectores complejos conjugados.

Por consiguiente, cuando uno ó más autovalores tomen el valor cero, el autovector se corresponde a un modo de vibración de un cuerpo rígido. Es decir, el sólido se comporta como un sólido rígido sin que exista deformación de los componentes elásticos.

Adams/Rail utiliza el comando LINEAR/EINGESOL para linealizar las ecuaciones del sistema con el objetivo del cálculo de los autovalores. Para la obtención de los valores buscados el programa restringe el movimiento de todos los ejes y las ruedas del vehículo asociándolas a tierra mediante uniones fijas.

En la tabla 11 se observan los resultados conseguidos con el programa Adams/Rail, así como la representación de cada uno de los números imaginarios obtenidos, lo cual puede verse en la figura 6.1. La parte imaginaria representa el comportamiento oscilatorio del modo de vibración, mientras su parte real representa su amortiguamiento característico.

Como los primeros 55 modos de vibración se caracterizan por disponer de una parte imaginaria igual a cero, el modelo a estudio se comportara como un sólido rígido, mientras que los restantes ocho autovalores se corresponden con los modos propios de vibración.

Tabla 11. Modos de vibración

Modo de vibración	Frecuencia natural (Hz)	Coefficiente de amortiguamiento	Parte real (ciclos/unidad de t)	Parte imaginaria (ciclos/unidad de t)
1	8.938610E-012	0.000000E+000	-8.938610E-012	0.000000E+000
2	4.783940E-003	1.000000E+000	-4.783940E-003	0.000000E+000
3	6.101640E-003	1.000000E+000	-6.101640E-003	0.000000E+000
4	6.153990E-003	1.000000E+000	-6.153990E-003	0.000000E+000
5	6.153990E-003	1.000000E+000	-6.153990E-003	0.000000E+000
6	6.634760E-003	1.000000E+000	-6.634760E-003	0.000000E+000
7	6.645620E-003	1.000000E+000	-6.645620E-003	0.000000E+000
8	6.668810E-003	1.000000E+000	-6.668810E-003	0.000000E+000
9	6.674420E-003	1.000000E+000	-6.674420E-003	0.000000E+000
10	1.828010E-002	1.000000E+000	-1.828010E-002	0.000000E+000
11	5.536870E-002	1.000000E+000	-5.536870E-002	0.000000E+000
12	5.603130E-002	1.000000E+000	-5.603130E-002	0.000000E+000
13	1.799690E-001	1.000000E+000	-1.799690E-001	0.000000E+000
14	1.837150E-001	1.000000E+000	-1.837150E-001	0.000000E+000
15	1.873260E-001	1.000000E+000	-1.873260E-001	0.000000E+000
16	2.154390E-001	1.000000E+000	-2.154390E-001	0.000000E+000
17	2.183040E-001	1.000000E+000	-2.183040E-001	0.000000E+000
18	2.186260E-001	1.000000E+000	-2.186260E-001	0.000000E+000
19	2.857100E-001	1.000000E+000	-2.857100E-001	0.000000E+000
20	1.058340E+000	1.000000E+000	-1.058340E+000	0.000000E+000
21	1.065640E+000	1.000000E+000	-1.065640E+000	0.000000E+000
22	1.935620E+000	1.000000E+000	-1.935620E+000	0.000000E+000
23	1.939150E+000	1.000000E+000	-1.939150E+000	0.000000E+000
24	3.004480E+000	1.000000E+000	-3.004480E+000	0.000000E+000
25	3.108560E+000	1.000000E+000	-3.108560E+000	0.000000E+000
26	3.645370E+000	1.000000E+000	-3.645370E+000	0.000000E+000
27	6.955350E+000	1.000000E+000	-6.955350E+000	0.000000E+000
28	7.898270E+000	1.000000E+000	-7.898270E+000	0.000000E+000
29	2.346930E+001	1.000000E+000	-2.346930E+001	0.000000E+000
30	1.414450E+002	1.000000E+000	-1.414450E+002	0.000000E+000
31	1.518310E+002	1.000000E+000	-1.518310E+002	0.000000E+000
32	3.086900E+002	1.000000E+000	-3.086900E+002	0.000000E+000
33	3.184730E+002	1.000000E+000	-3.184730E+002	0.000000E+000
34	3.968480E+002	1.000000E+000	-3.968480E+002	0.000000E+000
35	4.082210E+002	1.000000E+000	-4.082210E+002	0.000000E+000
36	5.543100E+002	1.000000E+000	-5.543100E+002	0.000000E+000
37	5.551180E+002	1.000000E+000	-5.551180E+002	0.000000E+000
38	9.475980E+002	1.000000E+000	-9.475980E+002	0.000000E+000
39	9.504950E+002	1.000000E+000	-9.504950E+002	0.000000E+000
40	2.384260E+003	1.000000E+000	-2.384260E+003	0.000000E+000
41	2.400070E+003	1.000000E+000	-2.400070E+003	0.000000E+000
42	3.001010E+003	1.000000E+000	-3.001010E+003	0.000000E+000
43	3.006990E+003	1.000000E+000	-3.006990E+003	0.000000E+000

44	3.108460E+003	1.000000E+000	-3.108460E+003	0.000000E+000
45	3.115510E+003	1.000000E+000	-3.115510E+003	0.000000E+000
46	3.305300E+003	1.000000E+000	-3.305300E+003	0.000000E+000
47	3.310580E+003	1.000000E+000	-3.310580E+003	0.000000E+000
48	1.909860E+004	1.000000E+000	-1.909860E+004	0.000000E+000
49	1.909860E+004	1.000000E+000	-1.909860E+004	0.000000E+000
50	1.909860E+004	1.000000E+000	-1.909860E+004	0.000000E+000
51	1.909860E+004	1.000000E+000	-1.909860E+004	0.000000E+000
52	1.909860E+004	1.000000E+000	-1.909860E+004	0.000000E+000
53	1.912310E+004	1.000000E+000	-1.912310E+004	0.000000E+000
54	1.914370E+004	1.000000E+000	-1.914370E+004	0.000000E+000
55	1.915750E+004	1.000000E+000	-1.915750E+004	0.000000E+000
56	3.091239E+000	7.140405E-001	-2.207270E+000	+/- 2.164190E+000
57	4.884001E+000	1.358757E-002	-6.636170E-002	+/- 4.883550E+000
58	5.389940E+000	1.621951E-001	-8.742220E-001	+/- 5.318570E+000
59	7.560783E+000	1.575220E-001	-1.190990E+000	+/- 7.466390E+000
60	8.317115E+000	1.759168E-001	-1.463120E+000	+/- 8.187410E+000
61	1.019633E+001	2.062302E-001	-2.102790E+000	+/- 9.977140E+000
62	4.497251E+001	3.703885E-003	-1.665730E-001	+/- 4.497220E+001
63	4.512161E+001	3.683845E-003	-1.662210E-001	+/- 4.512130E+001

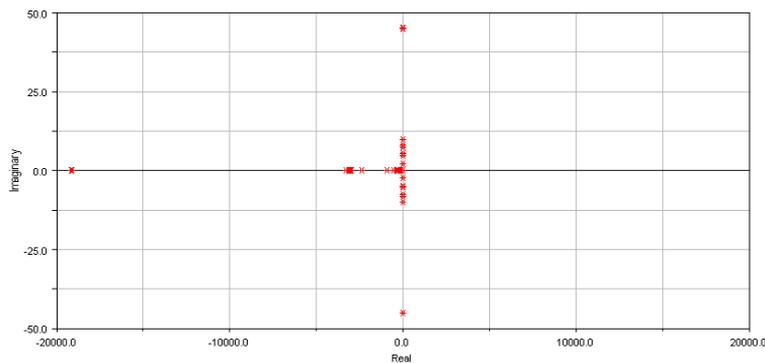
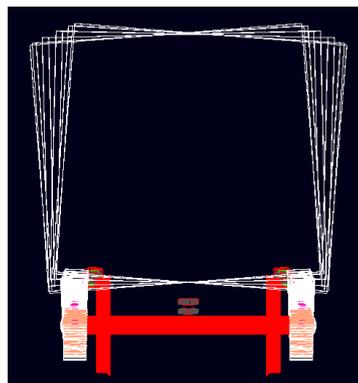


Figura 6.1. Modos de vibración. Parte real Vs Parte imaginaria

También cabe destacar que en este caso, ningún autovalor presenta una parte real positiva, lo que indica que se puede definir a los modos de vibración obtenidos como estables.

Las figuras 6.2, 6.3, 6.4, 6.5, 6.6 y 6.7 representan, el movimiento del vagón para cada uno de los modos propios de vibración.



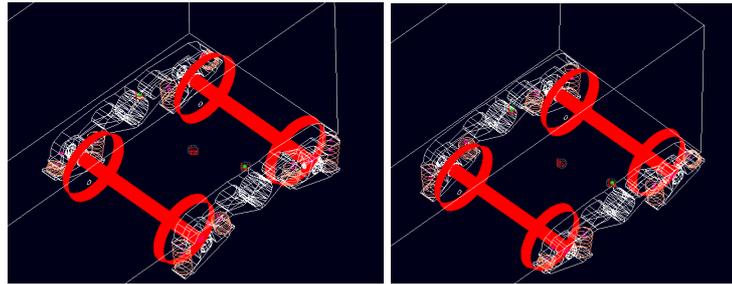


Figura 6.2. Modo de vibración 56

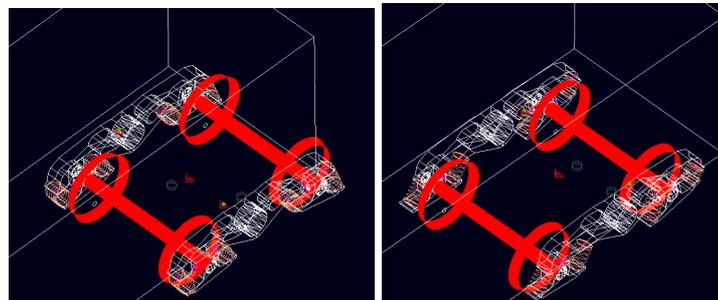
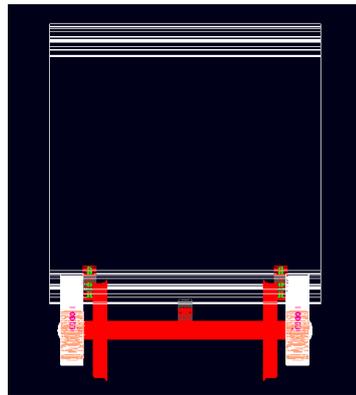
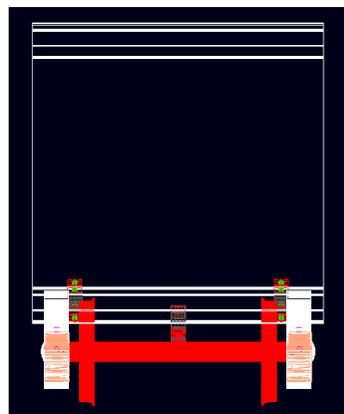


Figura 6.3. Modo de vibración 57



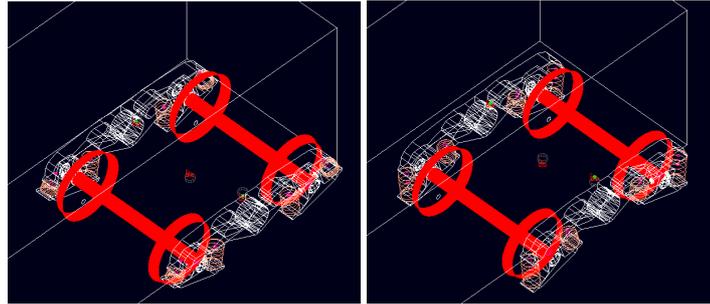


Figura 6.4. Modo de vibración 58 y 59

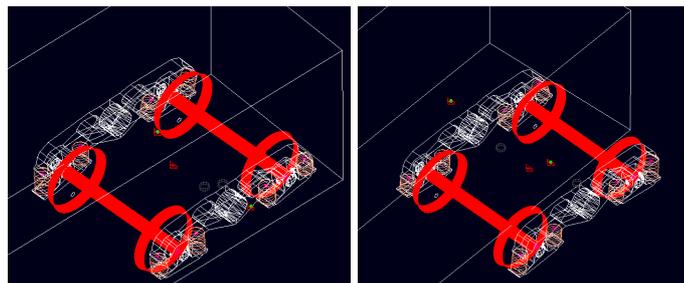
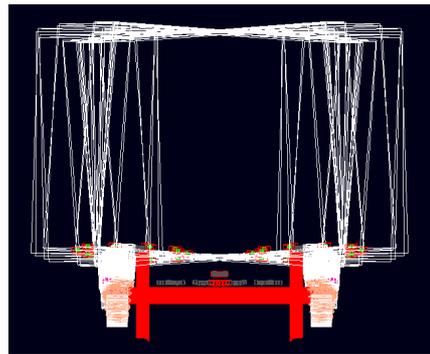


Figura 6.5. Modo de vibración 60

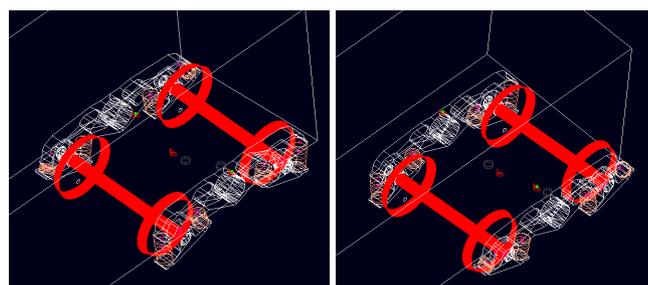
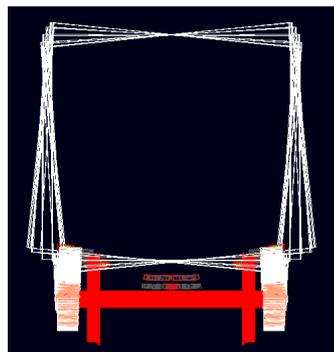


Figura 6.6. Modo de vibración 61

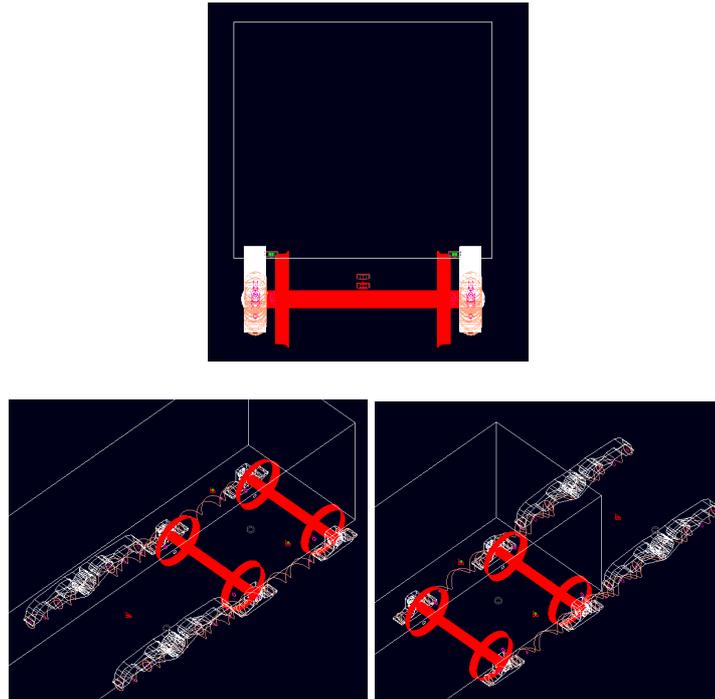


Figura 6.7. Modo de vibración 62 y 63

6.4 Estudio de las aceleraciones de un vagón de mercancías

Antes de poder calcular los índices de confort de cada una de las diferentes situaciones a las que es expuesto el vagón, es necesario calcular las aceleraciones longitudinales, verticales y laterales, para cada uno de los diferentes casos.

En cada uno de los estudios realizados, hay que tener en cuenta que el vagón se compone de dos cuerpos unidos mediante un momento de torsión, en cada una de las graficas se pueden observar los resultados obtenidos para el modulo delantero (rojo) y el modulo trasero del vagón (azul).

6.4.1 Radio de curvatura de 200 m

Para cada uno de los radios de curvatura, el trazado se constituye por una zona recta, seguida por la curva a estudio, por lo tanto, no solo se estudia la curva, sino también lo que sucede en la zona de transición del trazado.

Las velocidades a estudio comprenden desde los 10 m/s hasta los 35 m/s, rango en el que normalmente trabaja el bogie en cuestión:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

A partir de las figuras 6.8, 6.9 y 6.10, se puede comprobar que la pequeña velocidad a la que circula el vagón, da lugar a pequeñas aceleraciones. Mediante un estudio de las gráficas se puede conocer el perfil de la trayectoria seguida, inicialmente, el vagón sigue una línea recta, obteniendo bajas aceleraciones, para posteriormente iniciar la curva, dando lugar a un aumento constante de las aceleraciones, hasta que estas se hacen constantes.

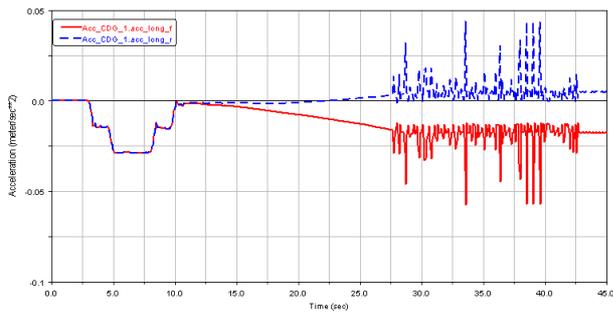


Figura 6.8. Aceleración longitudinal. $R = 200\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

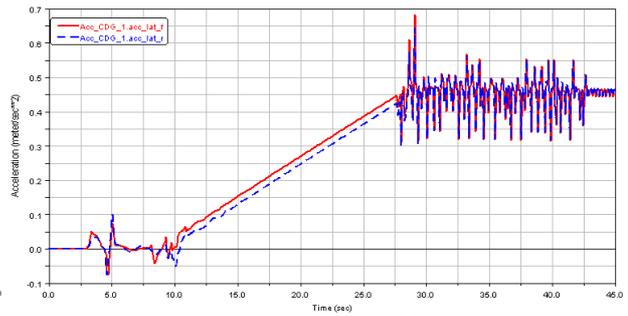


Figura 6.9. Aceleración lateral. $R = 200\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

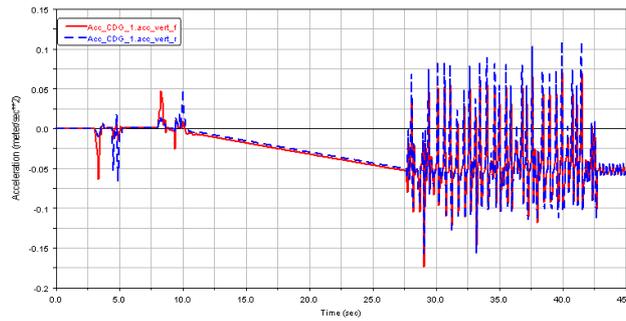


Figura 6.10. Aceleración vertical. $R = 200\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En las figuras 6.11, 6.12 y 6.13 se puede comprobar que un aumento de la velocidad en 5 m/s, produce un aumento de las aceleraciones obtenidas. Destacando que dicho aumento de velocidad también proporciona una mayor estabilidad en las aceleraciones.

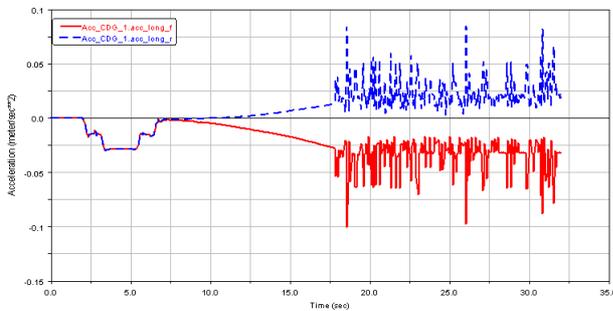


Figura 6.11. Aceleración longitudinal. $R = 200\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

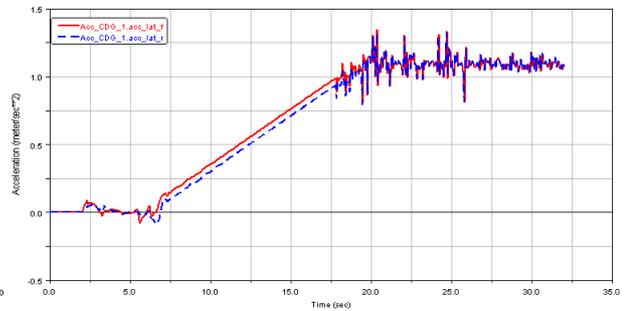


Figura 6.12. Aceleración lateral. $R = 200\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

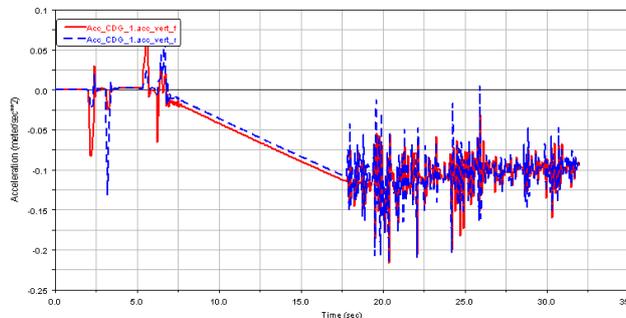


Figura 6.13. Aceleración vertical. $R = 200\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En las figuras 6.14, 6.15 y 6.16, se puede comprobar que el aumento de velocidad produce principalmente un aumento de la aceleración lateral, pasando de 1.2 m/s² a 2 m/s². Además la aceleración lateral va oscilando cada vez menos.

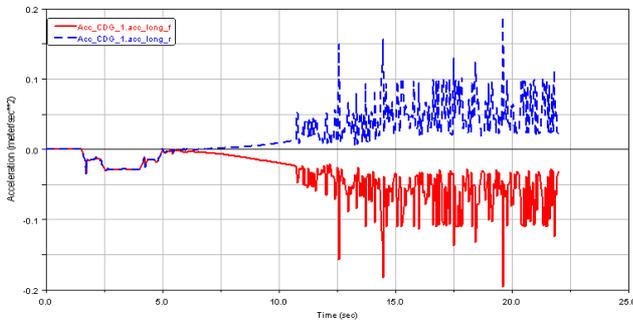


Figura 6.14. Aceleración longitudinal. R = 200 m; V = 20 m/s

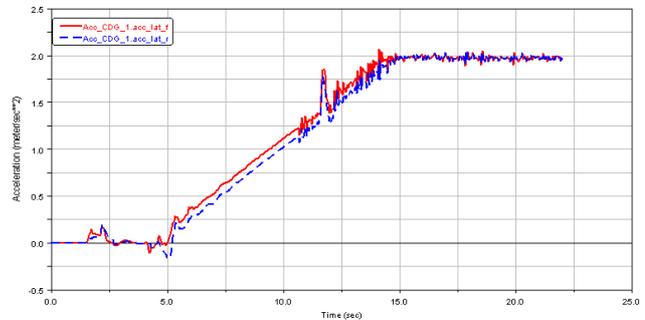


Figura 6.15. Aceleración lateral. R = 200 m; V = 20 m/s

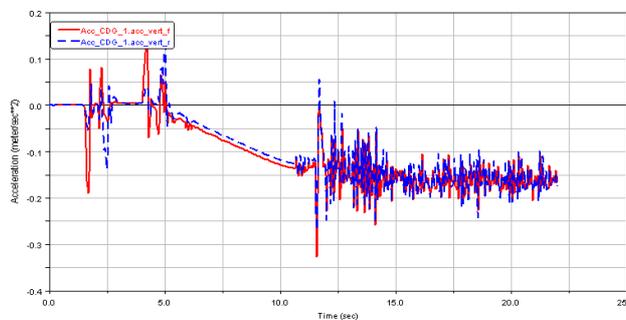


Figura 6.16. Aceleración vertical. R = 200 m; V = 20 m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

A continuación, puede verse como prácticamente las oscilaciones de la aceleración lateral, representada en la figura 6.18, han desaparecido. Además un aumento de la velocidad de 5 m/s ha supuesto un aumento de la aceleración de aproximadamente 1.3 m/s². Con respecto a las aceleraciones longitudinales y verticales, representadas en las figuras 6.17 y 6.19, van aumentando con la velocidad pero en menor medida que la aceleración lateral.

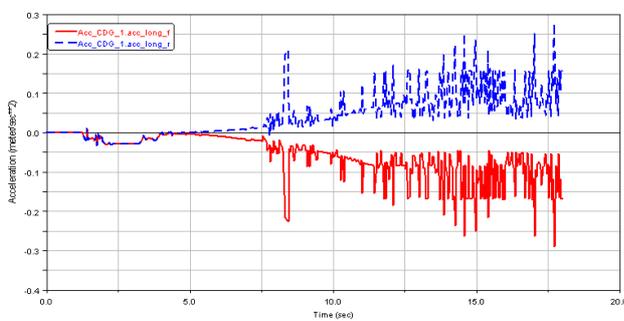


Figura 6.17. Aceleración longitudinal. R = 200 m; V = 25 m/s

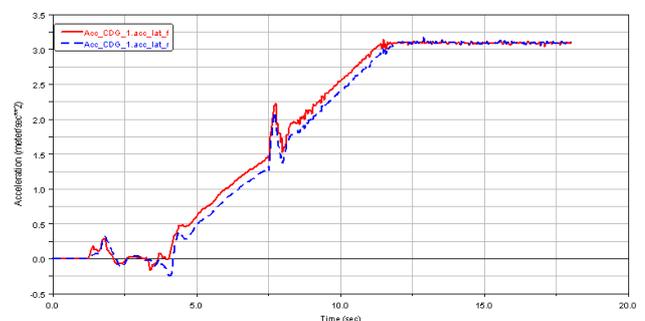


Figura 6.18. Aceleración lateral. R = 200 m; V = 25 m/s

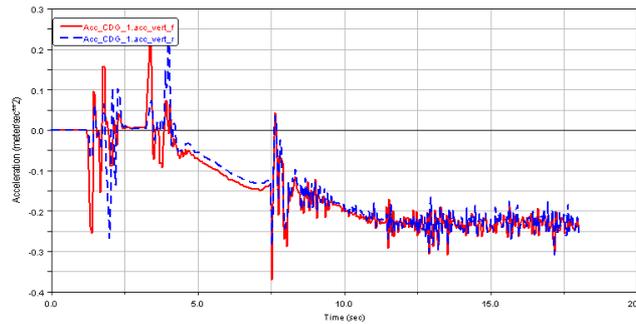


Figura 6.19. Aceleración vertical. $R = 200\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

Cabe destacar que, la aceleración longitudinal, representada en la figura 6.20, a medida que va aumentando la velocidad, presenta una mayor oscilación en su respuesta, inversamente a lo observado en el tramo constante de las aceleraciones laterales y verticales, mostradas en la figura 6.21 y 6.22.

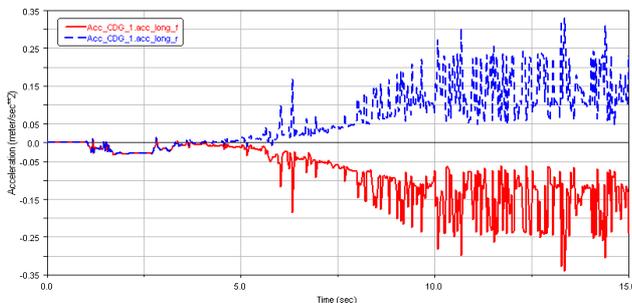


Figura 6.20. Aceleración longitudinal. $R = 200\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

m/s

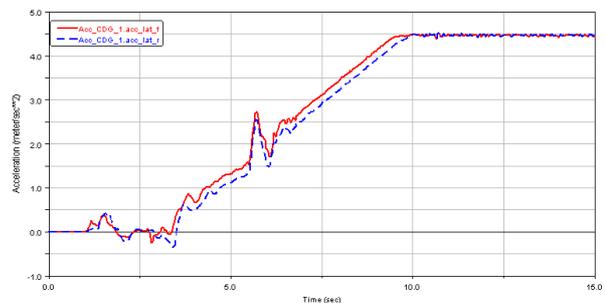


Figura 6.21. Aceleración lateral. $R = 200\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

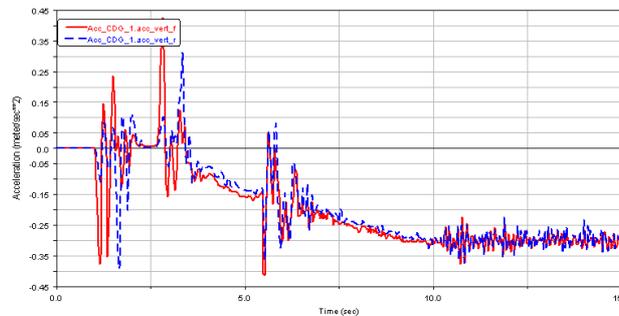


Figura 6.22. Aceleración vertical. $R = 200\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Finalmente, para una curva de 200 metros de radio y una velocidad de 35 m/s, el vagón termina por descarrilar durante el trazado de la curva. Por ese motivo, en las figuras 6.23, 6.24 y 6.25, puede verse como las aceleraciones tienden al infinito para un tiempo aproximado de 9 segundos.

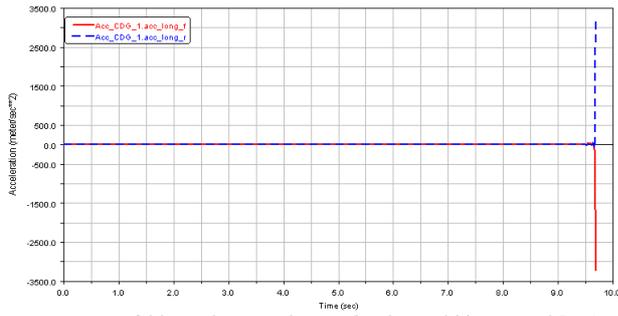


Figura 6.23. Aceleración longitudinal. $R = 200\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

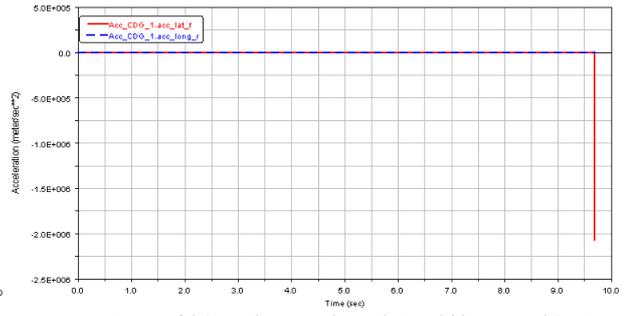


Figura 6.24. Aceleración lateral. $R = 200\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

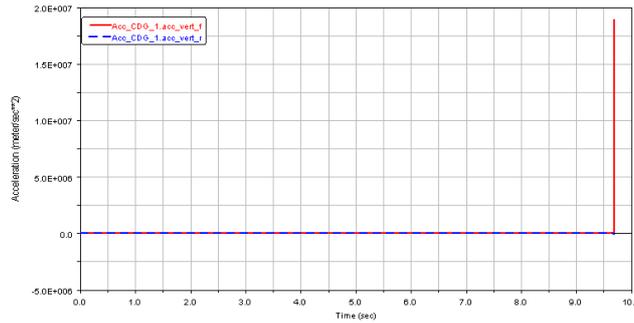


Figura 6.25. Aceleración vertical. $R = 200\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

6.4.2 Radio de curvatura de 300 m

El aumento del radio de curvatura, produce una disminución de las aceleraciones obtenidas, debido principalmente al menor valor de las fuerzas centrífugas:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En las figuras 6.26, 6.27 y 6.28, puede observarse una disminución de las aceleraciones debido al aumento del radio de curvatura. También, cabe destacar que en este caso, las aceleraciones solo presentan fluctuaciones en el momento de iniciar la curva.

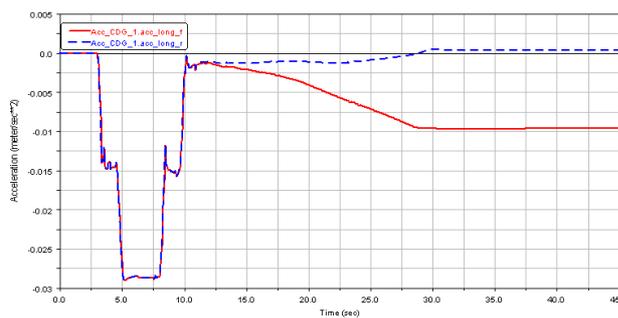


Figura 6.26. Aceleración longitudinal. $R = 300\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

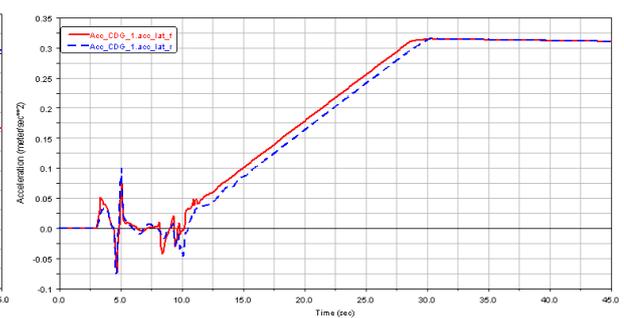


Figura 6.27. Aceleración lateral. $R = 300\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

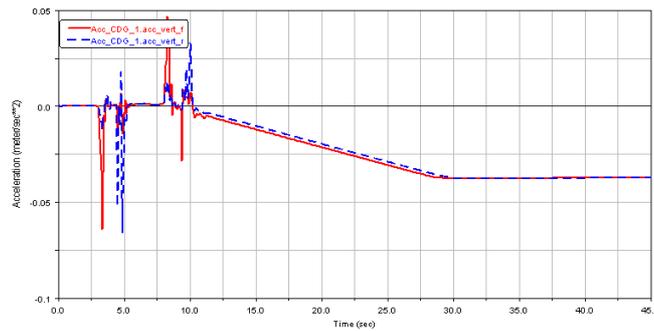


Figura 6.28. Aceleración vertical. $R = 300\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

Debido a un aumento de la velocidad, en las figuras 6.29, 6.30 y 6.31, se puede ver como las aceleraciones han ido aumentando. Aunque, cabe destacar que el mayor porcentaje de aumento, siempre corresponde con las aceleraciones laterales, debido al efecto que las fuerzas centrífugas ejercen en el vagón.

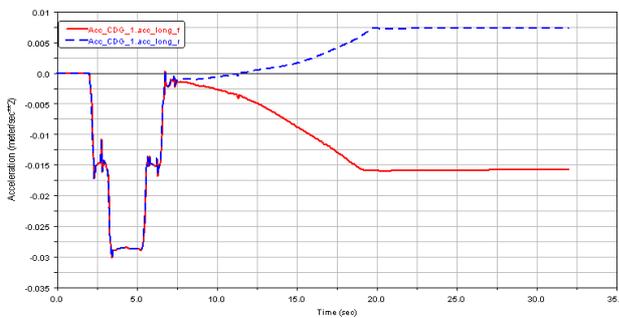


Figura 6.29. Aceleración longitudinal. $R = 300\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

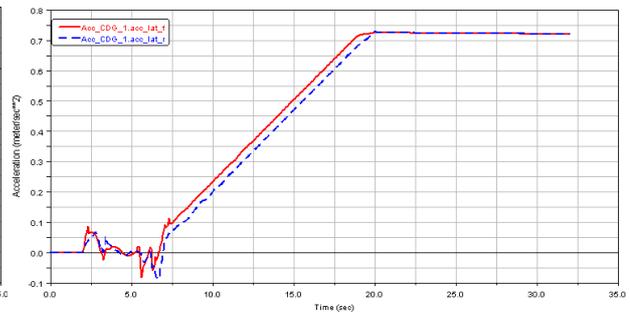


Figura 6.30. Aceleración lateral. $R = 300\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

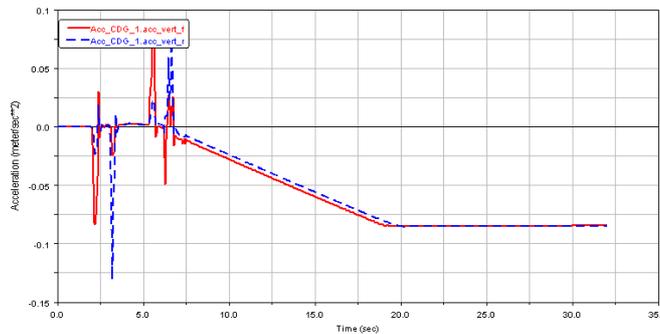


Figura 6.31. Aceleración vertical. $R = 300\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En las figuras 6.32, 6.33 y 6.34, se pueden destacar principalmente el aumento de las oscilaciones en las aceleraciones a estudio, así como el aumento paulatino de las mismas.

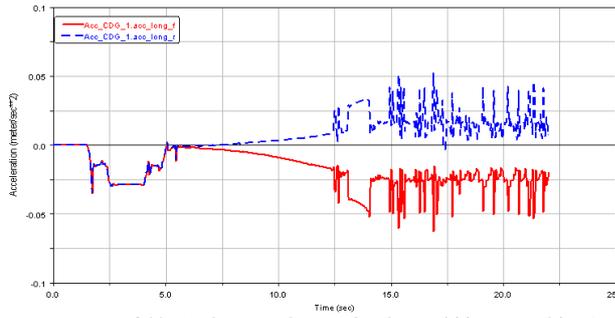


Figura 6.32. Aceleración longitudinal. $R = 300\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

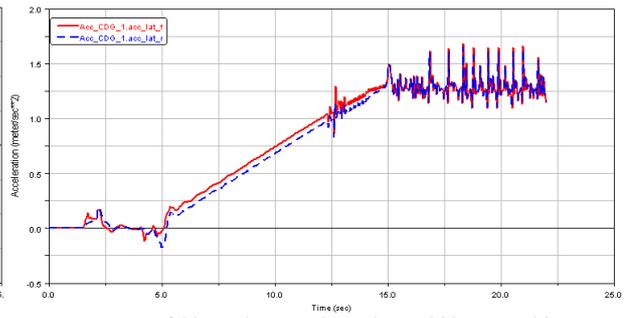


Figura 6.33. Aceleración lateral. $R = 300\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

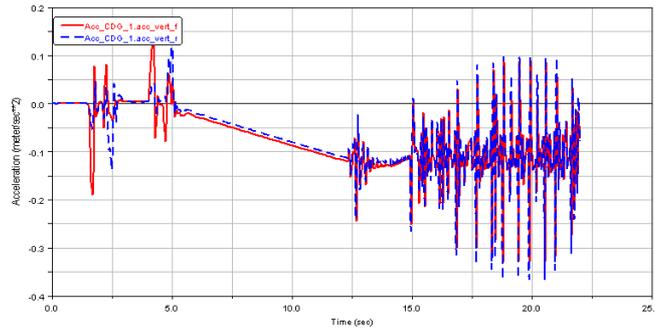


Figura 6.34. Aceleración vertical. $R = 300\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En las figuras 6.35, 6.36 y 6.37 puede apreciarse como el aumento progresivo de la velocidad repercute en mayor medida en la aceleración lateral que en las aceleraciones longitudinal y lateral.

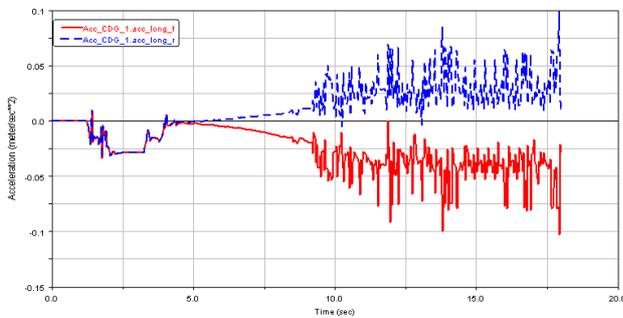


Figura 6.35. Aceleración longitudinal. $R = 300\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

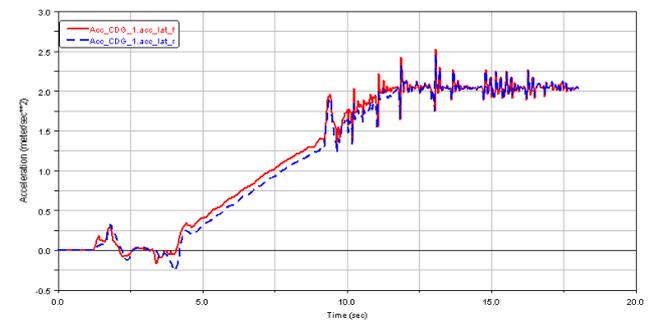


Figura 6.36. Aceleración lateral. $R = 300\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

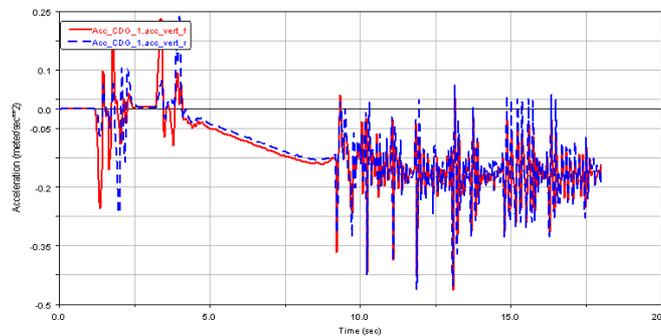


Figura 6.37. Aceleración vertical. $R = 300\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En este caso, se puede ver que un aumento de solo 5 m/s a supuesto un incremento en la aceleración lateral, figura 6.39, de prácticamente 1 m/s^2 , mientras que en las figuras 6.38 y 6.40, el aumento de las aceleraciones es muy pequeño.

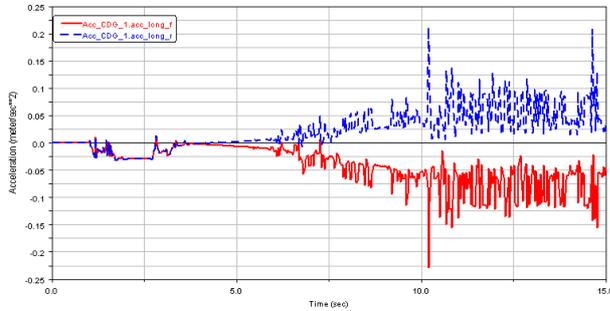


Figura 6.38. Aceleración longitudinal. $R = 300 \text{ m}$; $V = 30 \text{ m/s}$

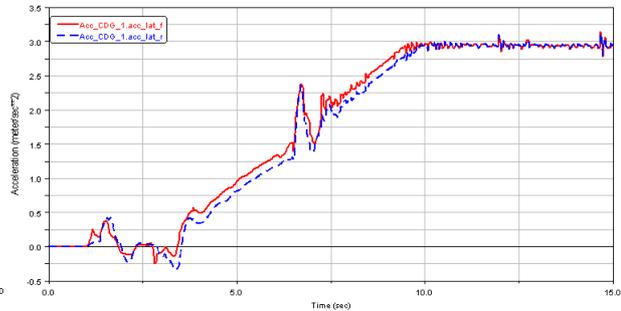


Figura 6.39. Aceleración lateral. $R = 300 \text{ m}$; $V = 30 \text{ m/s}$

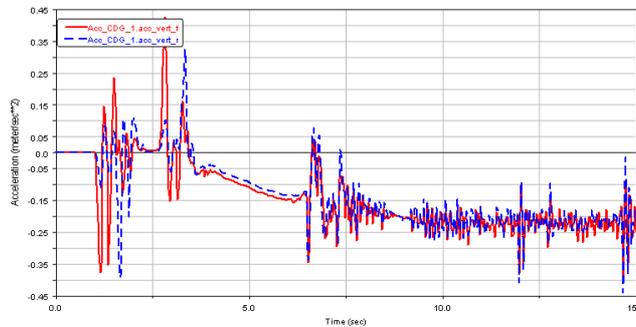


Figura 6.40. Aceleración vertical. $R = 300 \text{ m}$; $V = 30 \text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En las figuras 6.41 y 6.43, las aceleraciones prácticamente se mantienen constantes con respecto al caso anterior. Mientras que, en la figura 6.42 se ha producido, al igual que en el caso anterior, un incremento de 1 m/s^2 , observándose un aumento de las oscilaciones en la zona de transición.

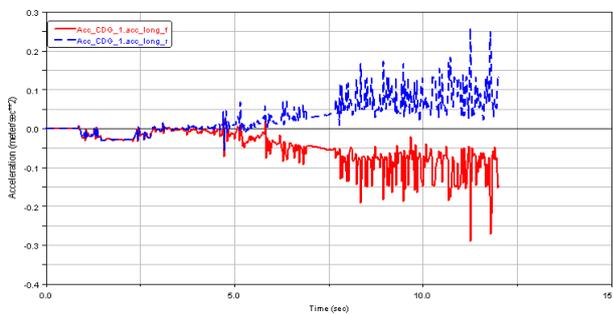


Figura 6.41. Aceleración longitudinal. $R = 300 \text{ m}$; $V = 35 \text{ m/s}$

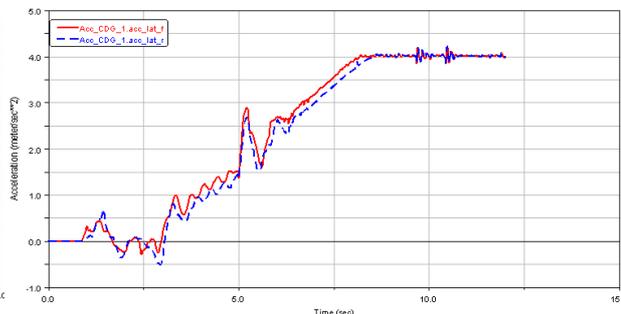


Figura 6.42. Aceleración lateral. $R = 300 \text{ m}$; $V = 35 \text{ m/s}$

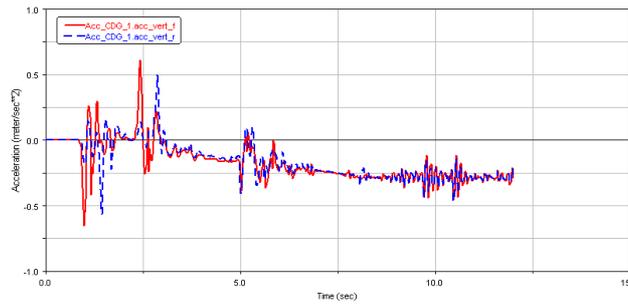


Figura 6.43. Aceleración vertical. $R = 300\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

6.4.3 Radio de curvatura de 400 m

A continuación se pueden observar los valores de las aceleraciones obtenidas para las diferentes velocidades a estudio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En este nuevo caso, al igual que para el radio de curvatura anterior, se caracteriza por la ausencia de oscilaciones en las aceleraciones, representadas en las figuras 6.44, 6.45 y 6.46, menos en la zona en donde se inicia el trazado curvo, esto es debido principalmente a la baja velocidad del vagón, así como al aumento del radio de curvatura.

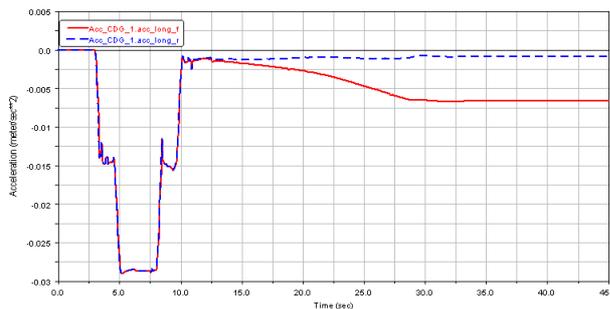


Figura 6.44. Aceleración longitudinal. $R = 400\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

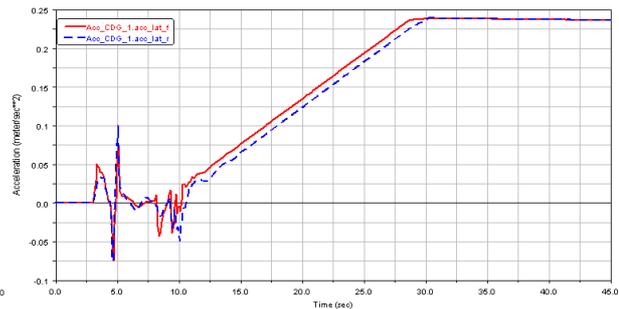


Figura 6.45. Aceleración lateral. $R = 400\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

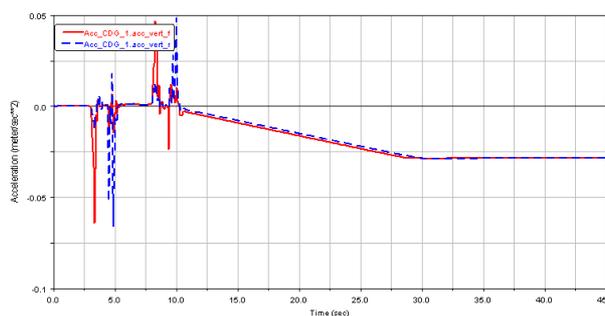


Figura 6.46. Aceleración vertical. $R = 400\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En este caso, caracterizado por las figuras 6.47, 6.48 y 6.49, puede verse un pequeño incremento en las aceleraciones, debido al aumento de la velocidad; ya que a medida que el radio de curvatura aumenta, el incremento de las aceleraciones va siendo cada vez menor.

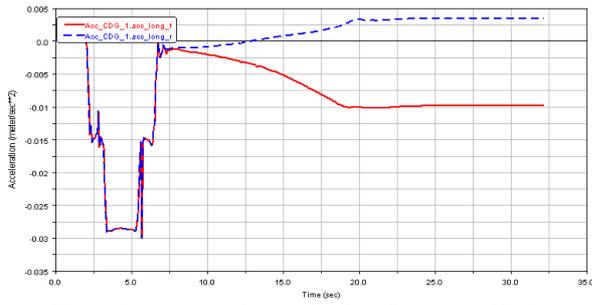


Figura 6.47. Aceleración longitudinal. $R = 400\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

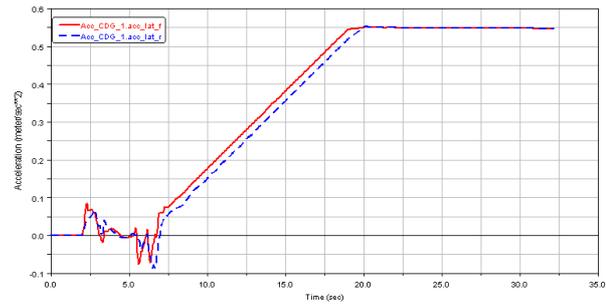


Figura 6.48. Aceleración lateral. $R = 400\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

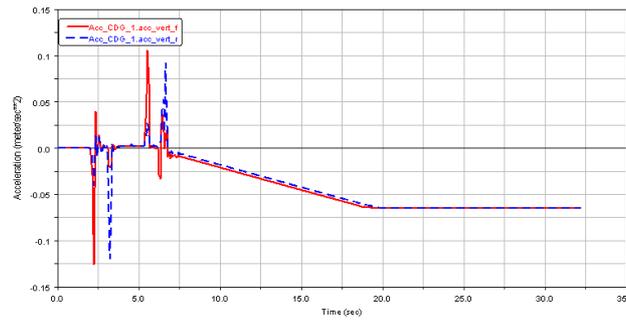


Figura 6.49. Aceleración vertical. $R = 400\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

El aumento de 5m/s respecto al caso anterior, ha supuesto la aparición de las oscilaciones en las figuras 6.50, 6.51 y 6.52.

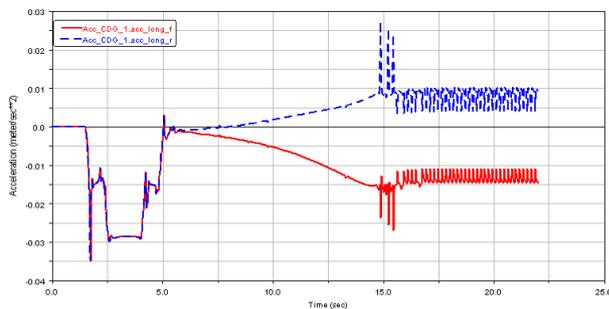


Figura 6.50. Aceleración longitudinal. $R = 400\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

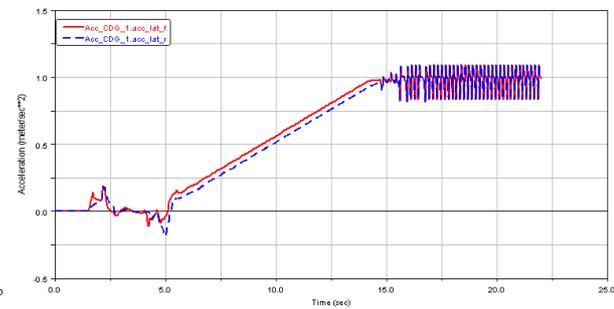


Figura 6.51. Aceleración lateral. $R = 400\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

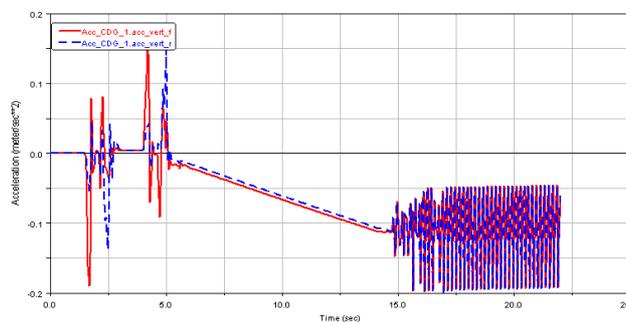


Figura 6.52. Aceleración vertical. $R = 400\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En las figuras 6.53, 6.54 y 6.55, se puede comprobar que una vez aparecidas las oscilaciones en las aceleraciones, un aumento posterior de la velocidad supone un aumento de la longitud de onda de las mismas.

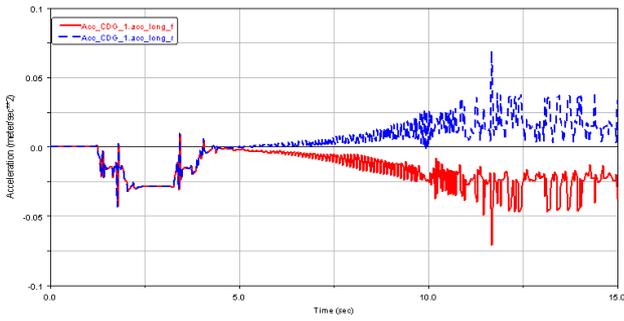


Figura 6.53. Aceleración longitudinal. $R = 400\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

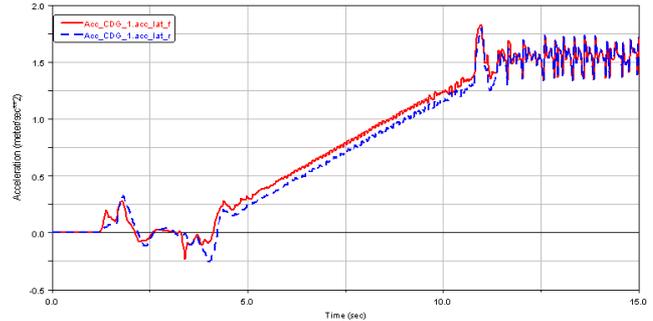


Figura 6.54. Aceleración lateral. $R = 400\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

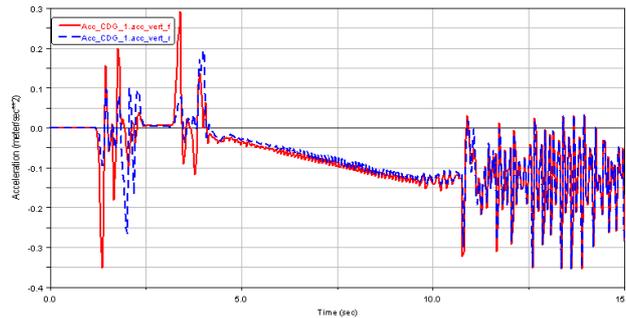


Figura 6.55. Aceleración vertical. $R = 400\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

A medida que se va aumentando la velocidad, se puede observar cómo se va incrementando las aceleraciones representadas en las figuras 6.56, 6.57 y 6.58.

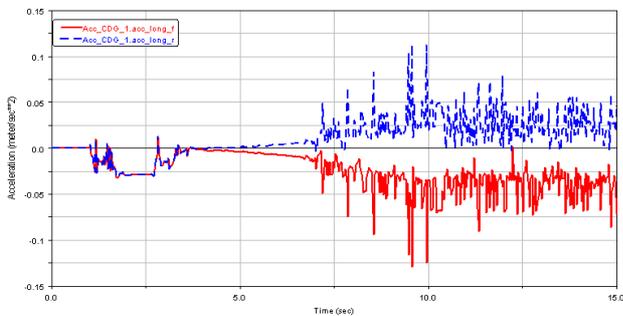


Figura 6.56. Aceleración longitudinal. $R = 400\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

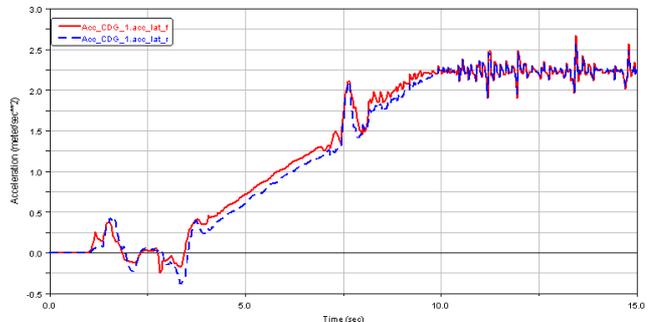


Figura 6.57. Aceleración lateral. $R = 400\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

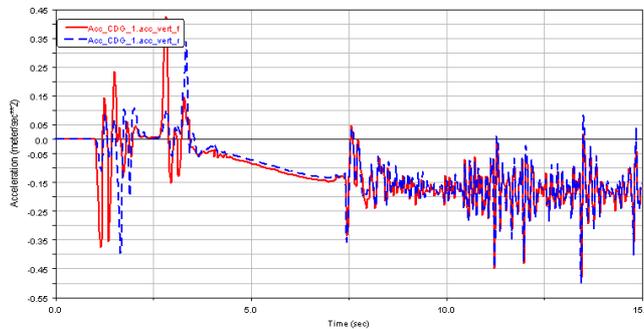


Figura 6.58. Aceleración vertical. $R = 400\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Finalmente, mediante las figuras 6.59, 6.60 y 6.61 se puede comprobar que a medida que aumenta el radio de curvatura, las aceleraciones obtenidas van disminuyendo con respecto al radio de curvatura anterior.

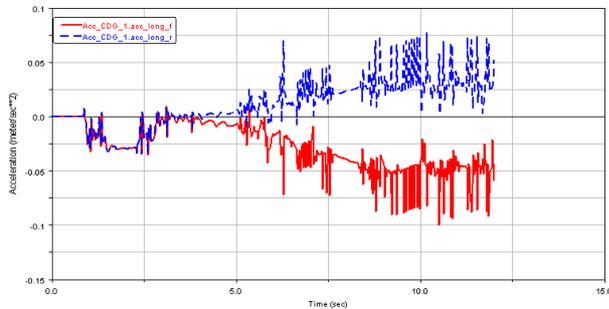


Figura 6.59. Aceleración longitudinal. R = 400 m; V = 35 m/s

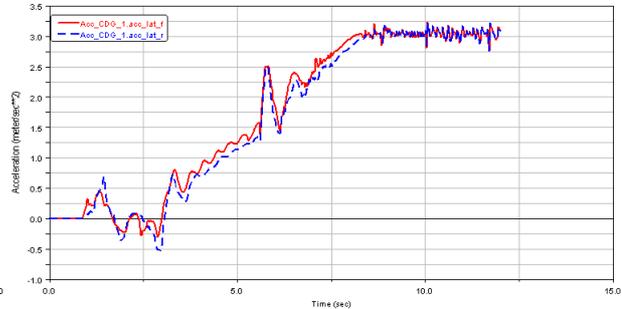


Figura 6.60. Aceleración lateral. R = 400 m; V = 35 m/s

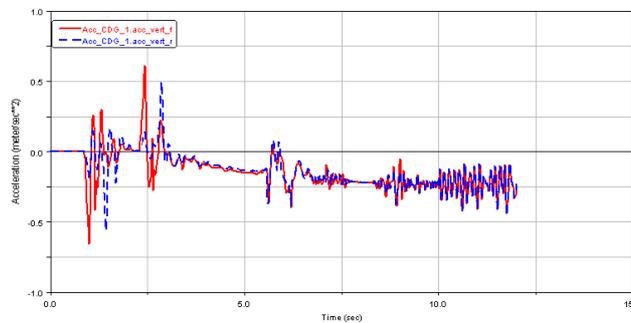


Figura 6.61. Aceleración vertical. R = 400 m; V = 35 m/s

6.4.4 Radio de curvatura de 500 m

Cabe destacar que el aumento del radio de curvatura repercute en la aparición de las perturbaciones para una mayor velocidad simulada, además de la supuesta disminución de las aceleraciones obtenidas respecto a los radios de curvatura anteriormente estudiados:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En las figuras 6.62, 6.63 y 6.64 se pueden observar como disminuyen las aceleraciones longitudinales, laterales y verticales, respecto al radio de curvatura anterior.

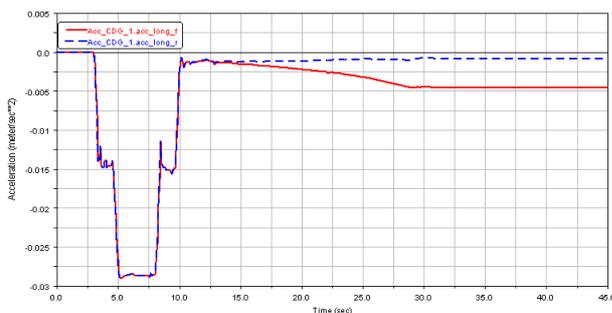


Figura 6.62. Aceleración longitudinal. R = 500 m; V = 10 m/s

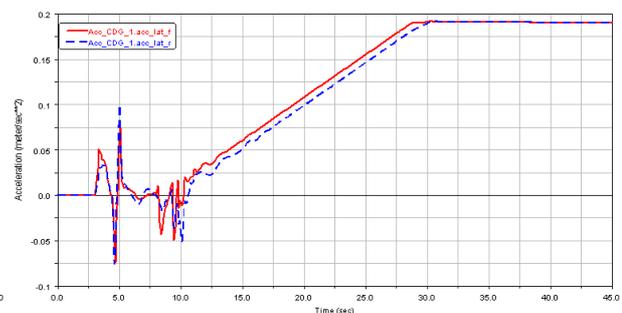


Figura 6.63. Aceleración lateral. R = 500 m; V = 10 m/s

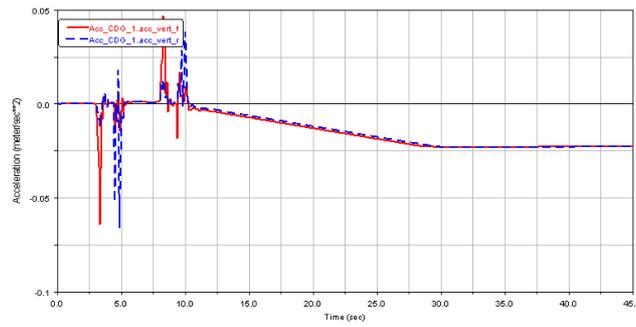


Figura 6.64. Aceleración vertical. $R = 500\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

Un aumento de la velocidad, supone un mínimo aumento de las aceleraciones, representadas en las figuras 6.66, 6.67 y 6.68.

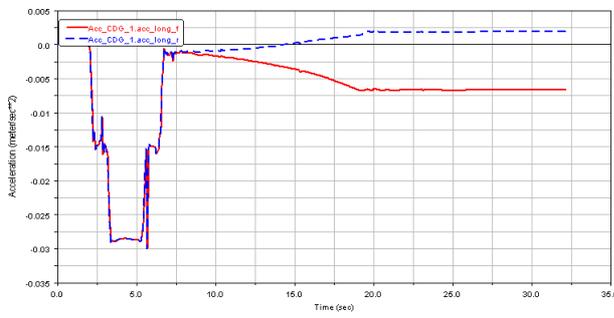


Figura 6.65. Aceleración longitudinal. $R = 500\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

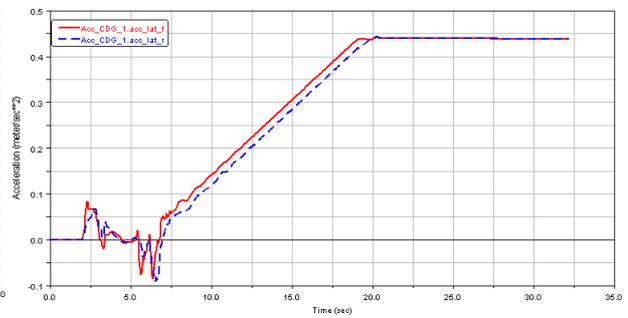


Figura 6.66. Aceleración lateral. $R = 500\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

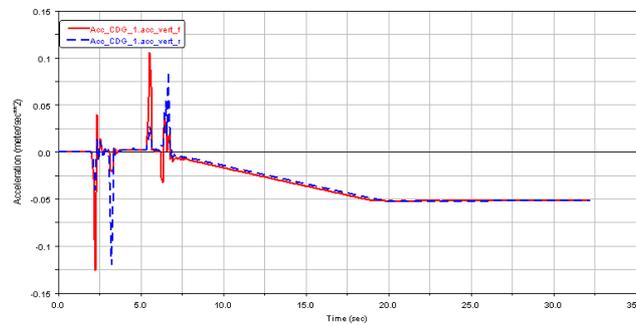


Figura 6.67. Aceleración vertical. $R = 500\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

Cabe destacar, mediante las figuras 6.68, 6.69 y 6.70 que el aumento de las velocidades supone un aumento de las perturbaciones producidas en el comienzo de la curva.

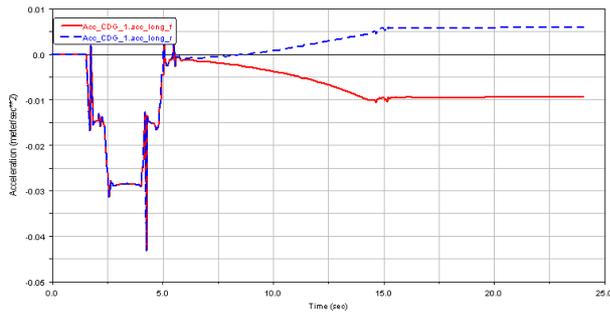


Figura 6.68. Aceleración longitudinal. $R = 500\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

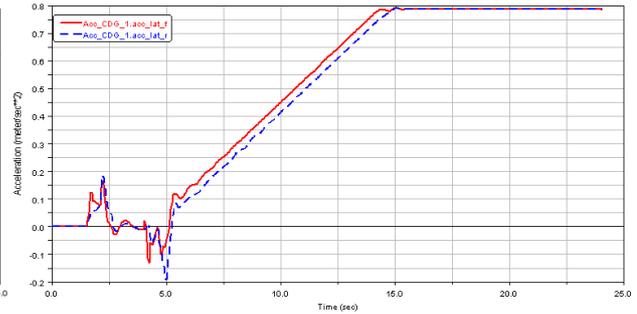


Figura 6.69. Aceleración lateral. $R = 500\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

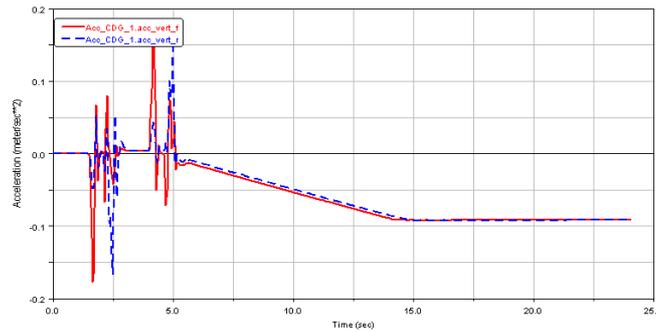


Figura 6.70. Aceleración vertical. $R = 500\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En las figuras 6.71, 6.72 y 6.73, se puede observar la aparición de las oscilaciones para una velocidad de 25 m/s, a diferencia del radio de curvatura anterior, las cuales aparecieron para una velocidad de 20 m/s.

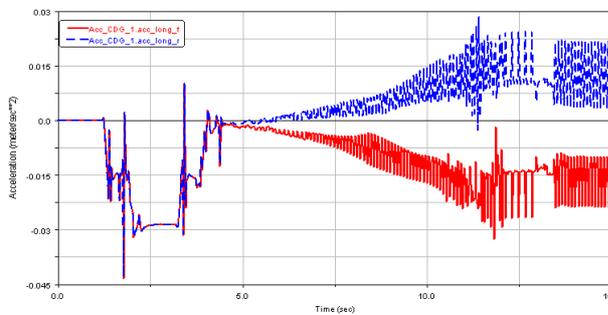


Figura 6.71. Aceleración longitudinal. $R = 500\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

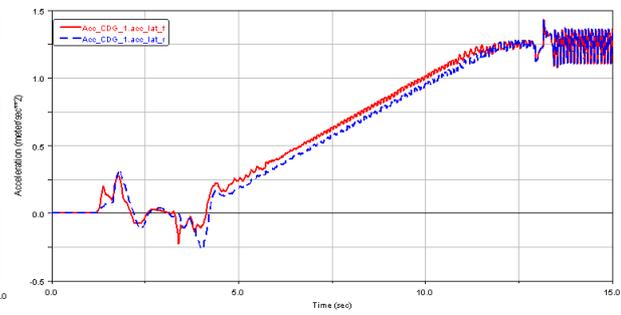


Figura 6.72. Aceleración lateral. $R = 500\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

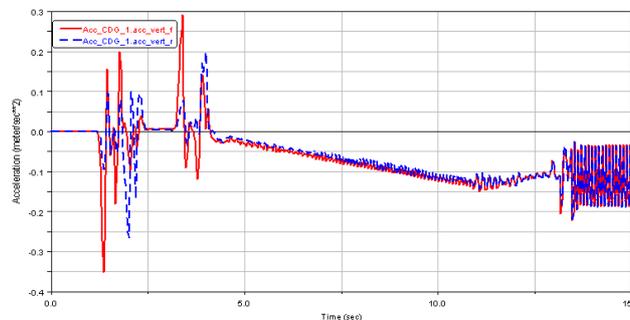


Figura 6.73. Aceleración vertical. $R = 500\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

El aumento de la velocidad, aparte de producir un incremento de las aceleraciones, permiten disminuir la longitud de onda de las oscilaciones aparecidas anteriormente, como se puede comprobar en las figuras 6.74, 6.75 y 6.76.

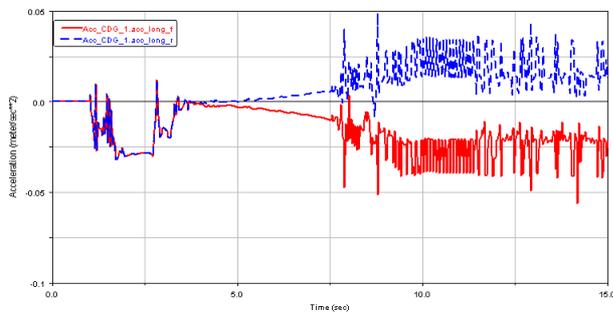


Figura 6.74. Aceleración longitudinal. $R = 500\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

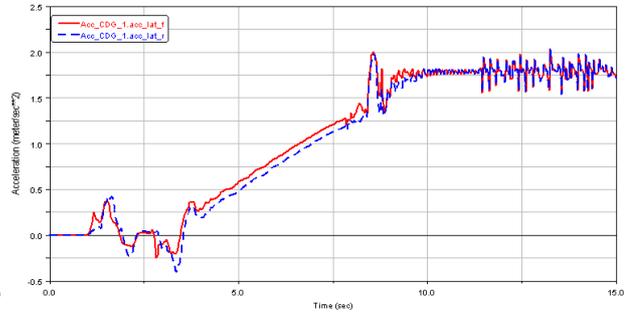


Figura 6.75. Aceleración lateral. $R = 500\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

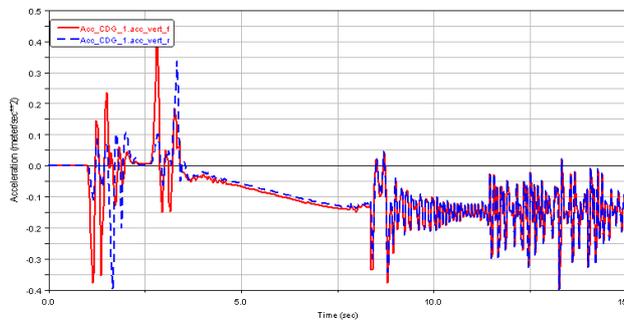


Figura 6.76. Aceleración vertical. $R = 500\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Con respecto al radio de curvatura anterior, el aumento del mismo en 100 metros, supone únicamente una disminución de la aceleración lateral de 0.5 m/s^2 , como se aprecia en la figura 6.78. Cabe destacar la disminución de las oscilaciones tanto en la aceleración lateral como vertical, representada mediante la figura 6.79, mientras que en la figura 6.77, las oscilaciones aumentan, con respecto a la velocidad anterior.

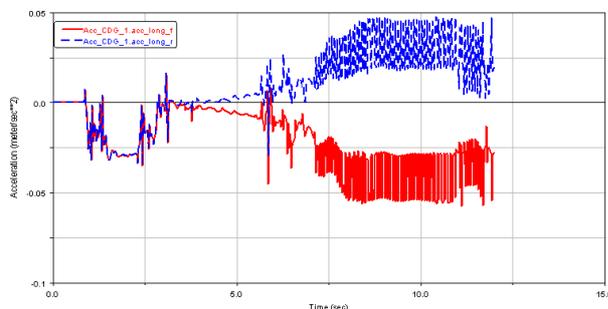


Figura 6.77. Aceleración longitudinal. $R = 500\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

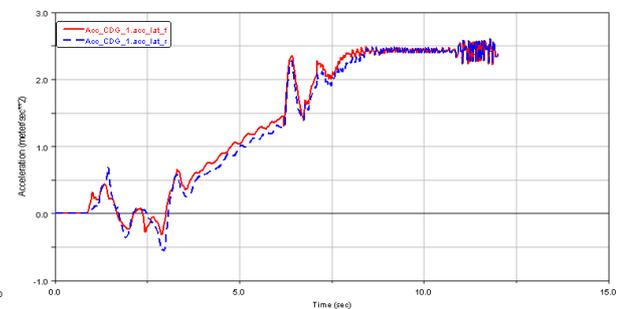


Figura 6.78. Aceleración lateral. $R = 500\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

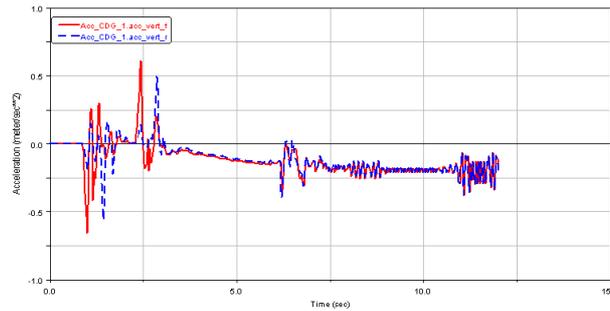


Figura 6.79. Aceleración vertical. $R = 500\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

6.4.5 Radio de curvatura de 600 m

A continuación se representan las diferentes aceleraciones para cada uno de las velocidades estudiadas:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

Al igual que en el caso de 200 metros de radio, a baja velocidad aparecen pequeñas perturbaciones en las aceleraciones, tal como se puede observar en las figuras 6.80, 6.81 y 6.82.

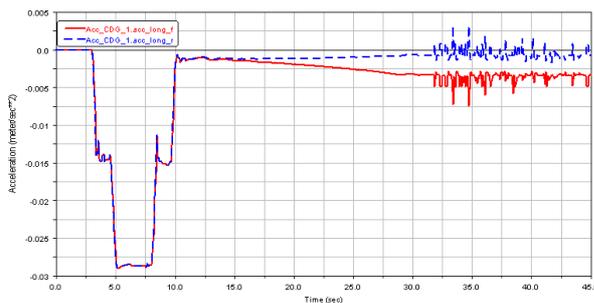


Figura 6.80. Aceleración longitudinal. $R = 600\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

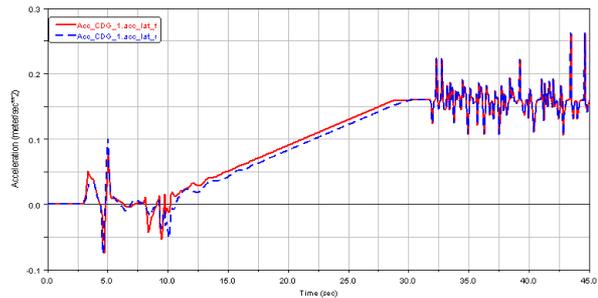


Figura 6.81. Aceleración lateral. $R = 600\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

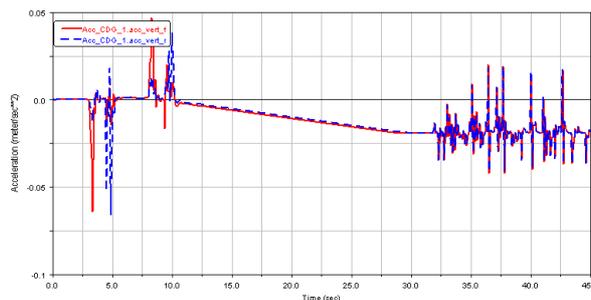


Figura 6.82. Aceleración vertical. $R = 600\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En este caso, mediante las figuras 6.83, 6.84 y 6.85, se puede ver como las oscilaciones prácticamente desaparecen a excepción del inicio y final de la simulación.

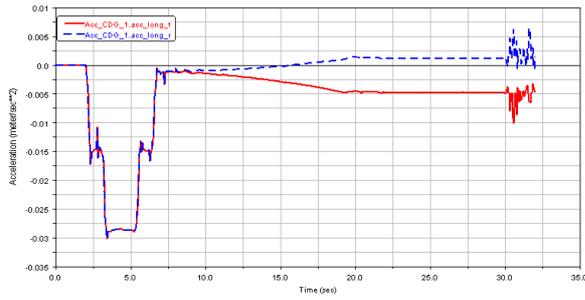


Figura 6.83. Aceleración longitudinal. $R = 600 \text{ m}$; $V = 15 \text{ m/s}$

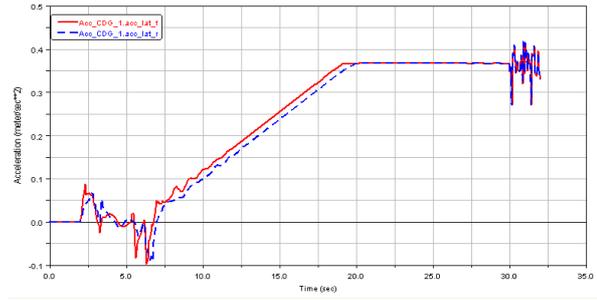


Figura 6.84. Aceleración lateral. $R = 600 \text{ m}$; $V = 15 \text{ m/s}$

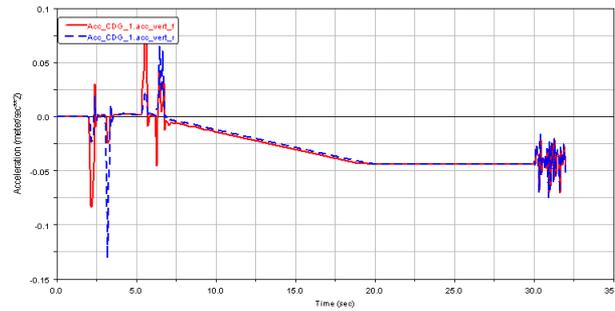


Figura 6.85. Aceleración vertical. $R = 600 \text{ m}$; $V = 15 \text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En las figuras 6.86, 6.87 y 6.88, puede verse como las aceleraciones, cada vez que aumentamos el radio de curvatura, van incrementando su valor en un menor porcentaje.

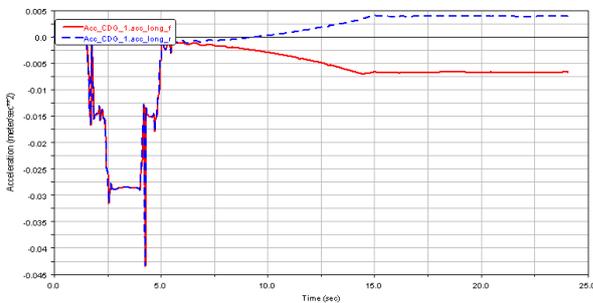


Figura 6.86. Aceleración longitudinal. $R = 600 \text{ m}$; $V = 20 \text{ m/s}$

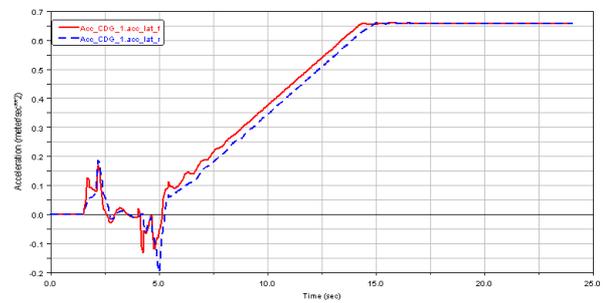


Figura 6.87. Aceleración lateral. $R = 600 \text{ m}$; $V = 20 \text{ m/s}$

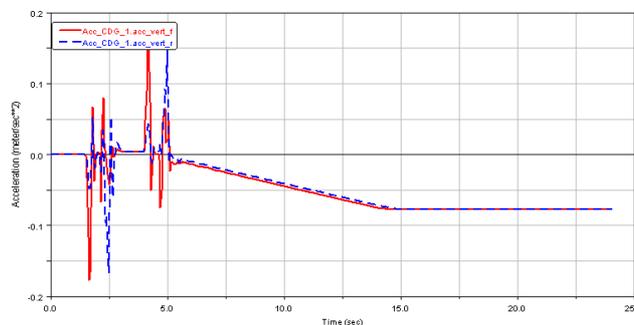


Figura 6.88. Aceleración vertical. $R = 600 \text{ m}$; $V = 20 \text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

A parte del aumento del valor de las aceleraciones, en las figuras 6.89, 6.90 y 6.91, se puede observar el aumento de las perturbaciones iniciales a la entrada de la curva con respecto a la velocidad anteriormente estudiada.

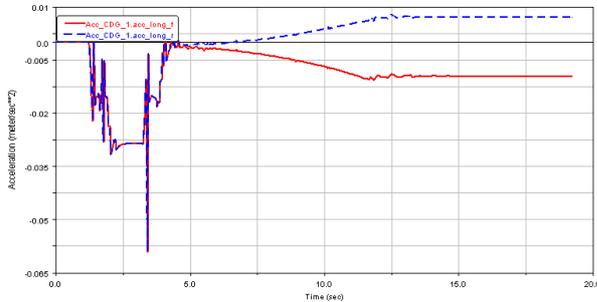


Figura 6.89. Aceleración longitudinal. $R = 600\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

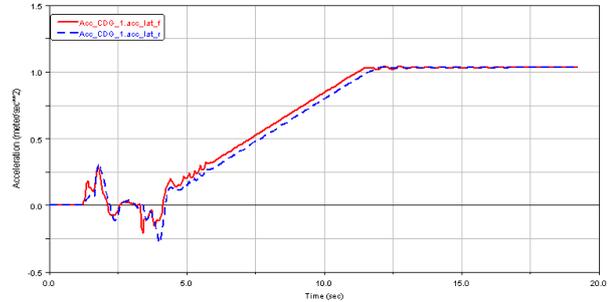


Figura 6.90. Aceleración lateral. $R = 600\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

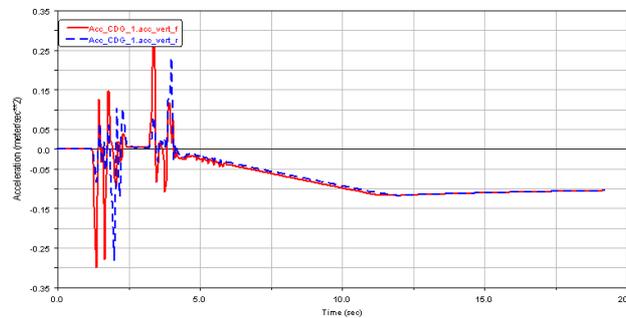


Figura 6.91. Aceleración vertical. $R = 600\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En el caso de tener un radio de curvatura de 600 metros, se observa en las graficas 6.92, 6.93 y 6.94, la inclusión de las oscilaciones para una velocidad de 30 m/s, mientras que para 500 metros de radio las oscilaciones aparecerían para una velocidad de 25 m/s.

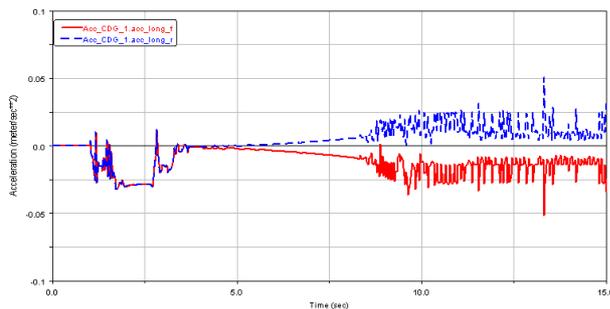


Figura 6.92. Aceleración longitudinal. $R = 600\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

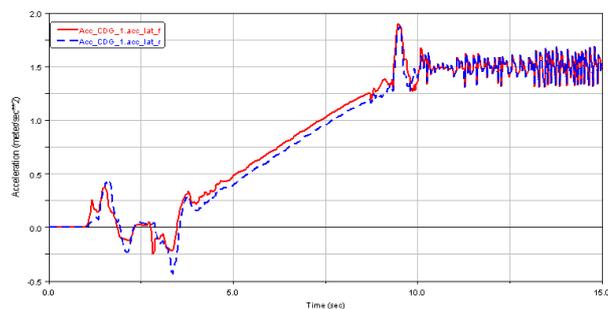


Figura 6.93. Aceleración lateral. $R = 600\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

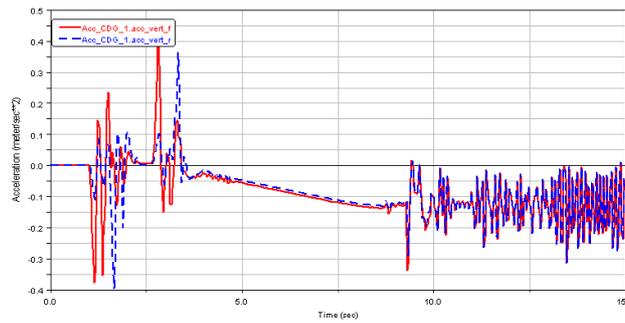


Figura 6.94. Aceleración vertical. $R = 600\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Si comparamos los valores obtenidos en las figuras 6.95, 6.96 y 6.97, con respecto a las obtenidas para la misma velocidad y para los radios de curvatura más pequeños estudiados, se puede comprobar cómo las aceleraciones han disminuido considerablemente su valor.

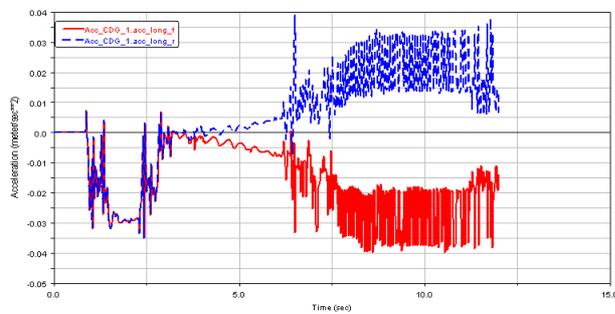


Figura 6.95. Aceleración longitudinal. $R = 600\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

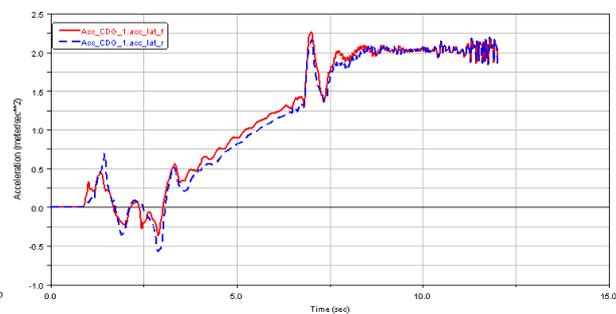


Figura 6.96. Aceleración lateral. $R = 600\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

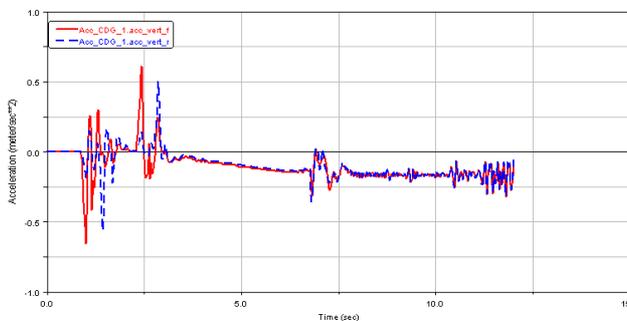


Figura 6.97. Aceleración vertical. $R = 600\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

6.5 Estudio de las aceleraciones en dos vagones de mercancías

En el caso del estudio de dos vagones unidos entre sí, se puede observar en cada gráfica cuatro resultados, correspondientes a las aceleraciones tanto del primer como del segundo vagón; así como, la parte delantera y trasera de cada uno de los mismos.

Este estudio ha sido llevado a cabo para conocer si existen diferencias representativas en el confort dependiendo de la posición del vagón.

6.5.1 Radio de curvatura de 200 m

Debido al pequeño radio de curvatura estudiado, ambos vagones sufren importantes aceleraciones, llegando incluso al descarrilamiento para la mayor velocidad simulada:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En las figuras 6.98, 6.99 y 6.100, puede verse las diferencias existentes entre el primer y el segundo vagón, pudiendo darse cuenta de que la principal diferencia es el tiempo en el que tienen lugar los diferentes sucesos, así como el mantenimiento de los valores de las aceleraciones con respecto al caso de un único vagón.

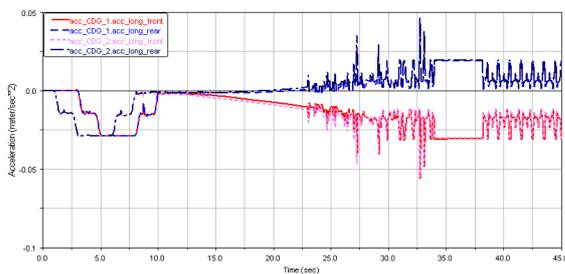


Figura 6.98. Aceleración longitudinal 2V. R = 200 m; V = 10 m/s

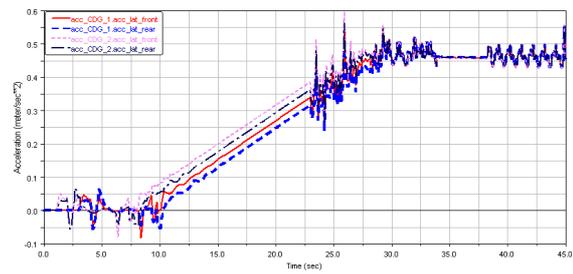


Figura 6.99. Aceleración lateral 2V. R = 200 m; V = 10 m/s

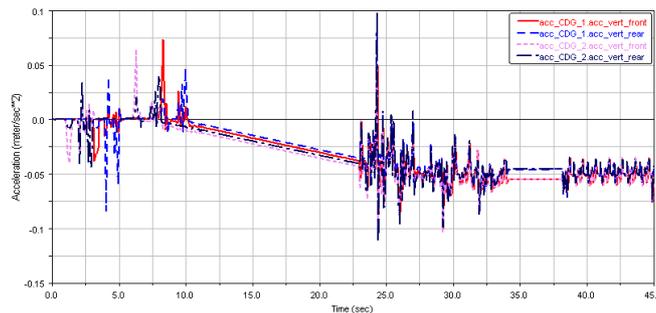


Figura 6.100. Aceleración vertical 2V. R = 200 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En este caso, se representan las aceleraciones longitudinales, laterales y verticales para una velocidad de 15 m/s, mediante las figuras 6.101, 6.102 y 6.103.

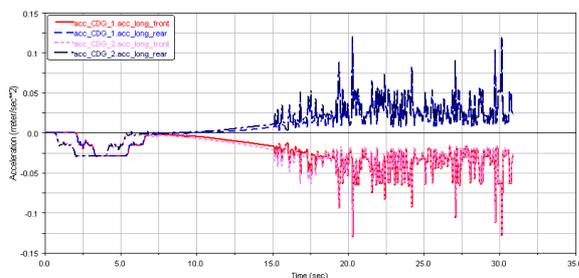


Figura 6.101. Aceleración longitudinal 2V. R = 200 m; V = 15 m/s

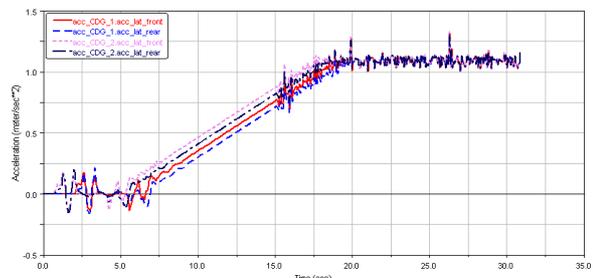


Figura 6.102. Aceleración lateral 2V. R = 200 m; V = 15 m/s

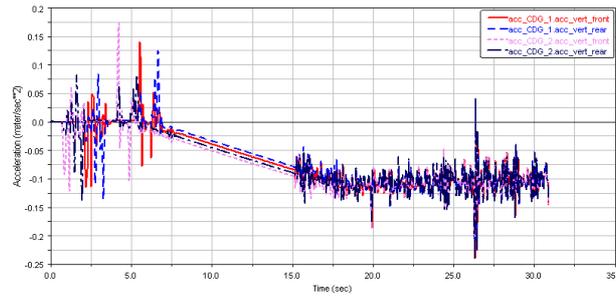


Figura 6.103. Aceleración vertical 2V. R = 200 m; V = 15 m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

Con el siguiente aumento de la velocidad, de 5 m/s, se puede ver en las figuras 6.104, 6.105 y 6.106 un aumento paulatino de las aceleraciones, siendo el mayor incremento ocasionado en la aceleración lateral, prácticamente de 1 m/s con respecto al caso anterior.

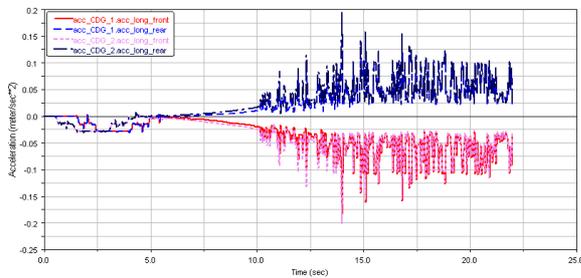


Figura 6.104. Aceleración longitudinal 2V. R = 200 m; V = 20 m/s

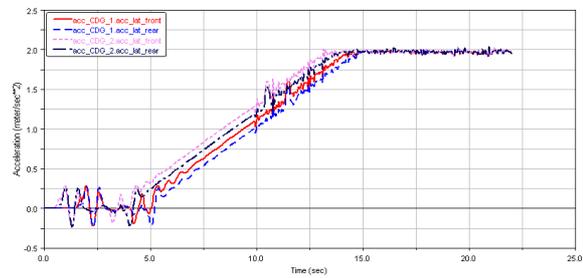


Figura 6.105. Aceleración lateral 2V. R = 200 m; V = 20 m/s

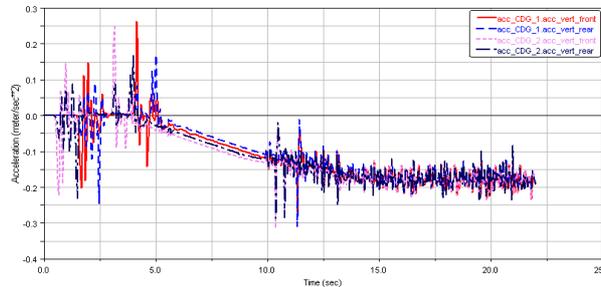


Figura 6.106. Aceleración vertical 2V. R = 200 m; V = 20 m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En las figuras 6.107 y 6.109, cabe destacar el menor incremento de las aceleraciones con respecto al incremento producido en la aceleración lateral, representada mediante la figura 6.108.

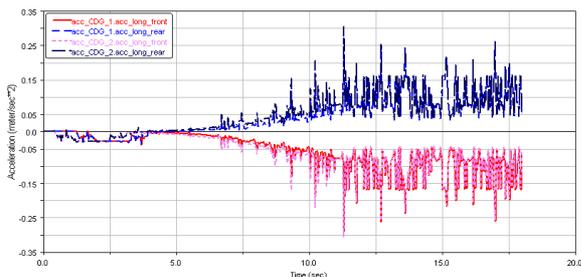


Figura 6.107. Aceleración longitudinal 2V. R = 200 m; V = 25 m/s

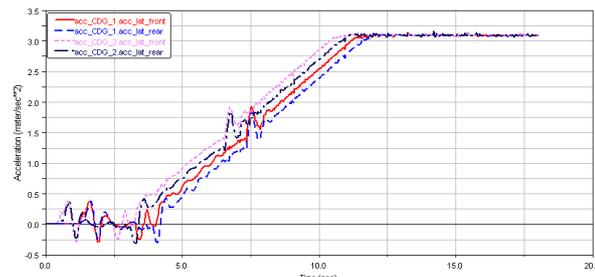


Figura 6.108. Aceleración lateral 2V. R = 200 m; V = 25 m/s

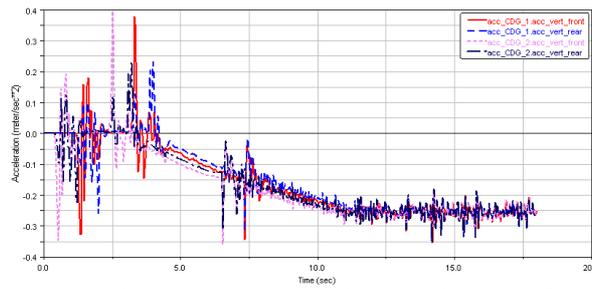


Figura 6.109. Aceleración vertical 2V. $R = 200\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En la figura 6.110, puede verse un pequeño aumento en el valor de la aceleración longitudinal; con respecto a la figura 6.111, puede comprobarse la desaparición de las oscilaciones una vez que la aceleración lateral se ha hecho constante, destacando el aumento de las perturbaciones en la zona de transición. Finalmente, en la figura 6.112 se representa la aceleración vertical, con una disminución significativa de las oscilaciones, así como un pequeño aumento en el valor de la aceleración.

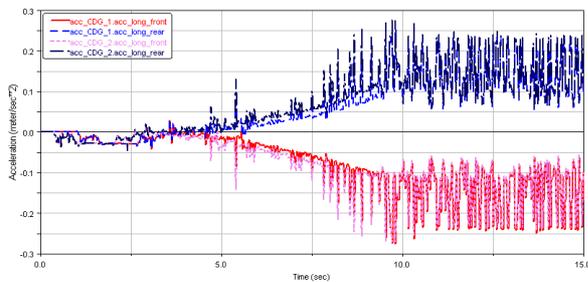


Figura 6.110. Aceleración longitudinal 2V. $R = 200\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

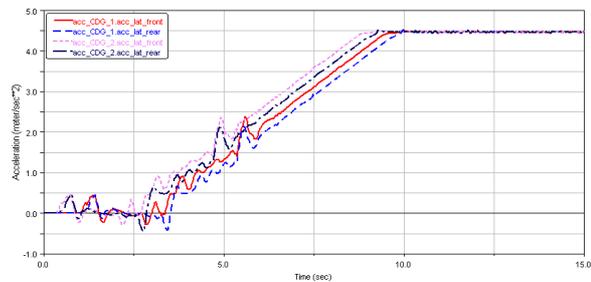


Figura 6.111. Aceleración lateral 2V. $R = 200\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

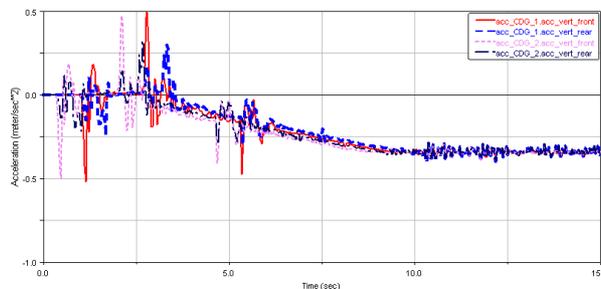


Figura 6.112. Aceleración vertical 2V. $R = 200\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Al igual que en el caso para un vagón, en las figuras 6.113, 6.114 y 6.115, puede verse como las aceleraciones obtenidas tienden al infinito, debido al descarrilamiento producido durante el trazado de la curva.

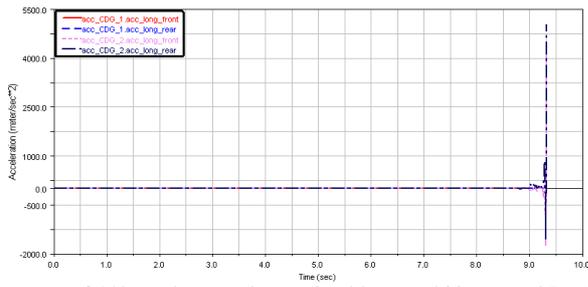


Figura 6.113. Aceleración longitudinal 2V. R = 200 m; V = 35 m/s

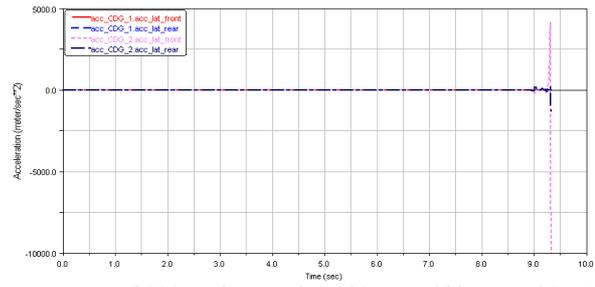


Figura 6.114. Aceleración lateral 2V. R = 200 m; V = 35 m/s

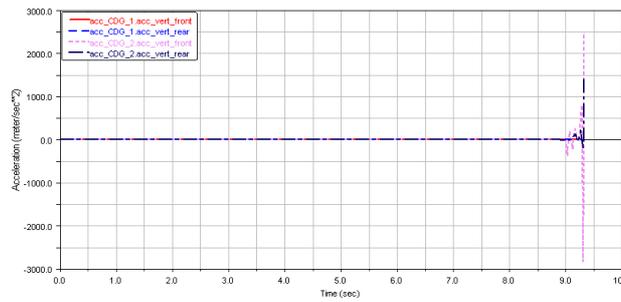


Figura 6.115. Aceleración vertical 2V. R = 200 m; V = 35 m/s

6.5.2 Radio de curvatura de 300 m

El aumento del radio de curvatura, repercute favorablemente en el índice de confort, debido a la disminución de las aceleraciones, como se puede observar en los siguientes casos:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En las figuras 6.116, 6.117 y 6.118, se puede comprobar que un aumento en el radio de la curva a estudio, ocasiona generalmente una disminución de las oscilaciones presentes en las aceleraciones, así como una disminución en las aceleraciones obtenidas.

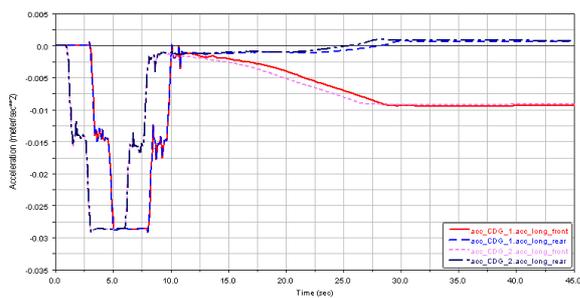


Figura 6.116. Aceleración longitudinal 2V. R = 300 m; V = 10 m/s

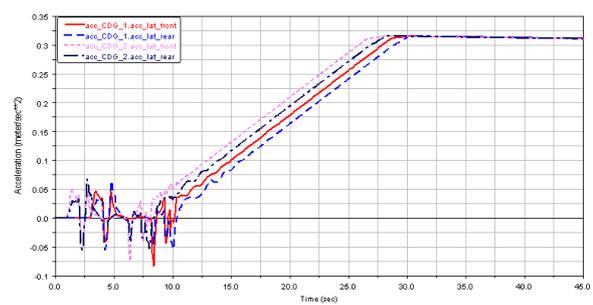


Figura 6.117. Aceleración lateral 2V. R = 300 m; V = 10 m/s

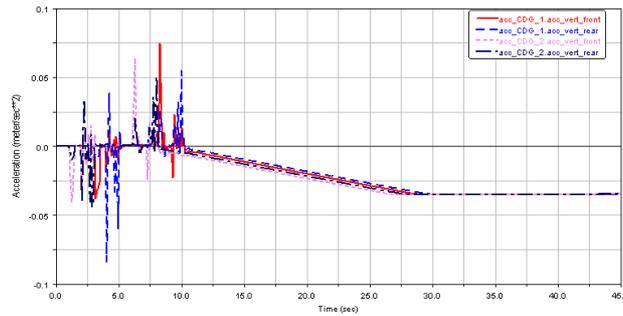


Figura 6.118. Aceleración vertical 2V. R = 300 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

El aumento de la velocidad en 5 m/s produce en las figuras 6.119, 6.120 y 6.121 un incremento tanto de las oscilaciones, en el inicio de la curva, como de las aceleraciones; pero hay que tener en cuenta que el incremento que se produce en las aceleraciones va disminuyendo según se va aumentando el radio de la curva.

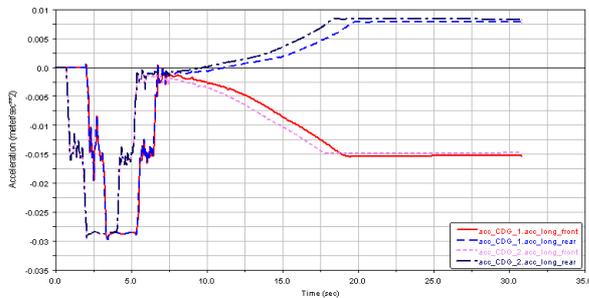


Figura 6.119. Aceleración longitudinal 2V. R = 300 m; V = 15 m/s

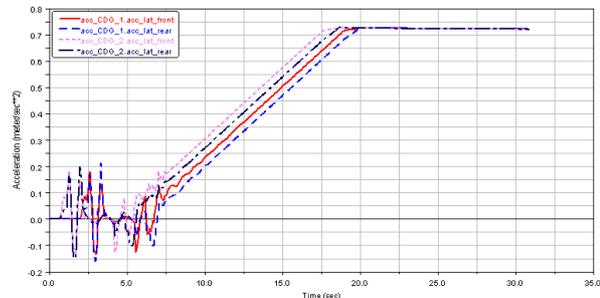


Figura 6.120. Aceleración lateral 2V. R = 300 m; V = 15 m/s

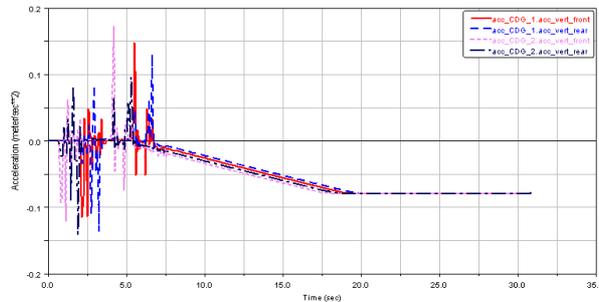


Figura 6.121. Aceleración vertical 2V. R = 300 m; V = 15 m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

A la velocidad de 20 m/s y para un radio de curvatura de 300 metros, se observa en las figuras 6.122, 6.123 y 6.124 un incremento de las oscilaciones durante el desarrollo de la curva, así como el correspondiente incremento de las aceleraciones.

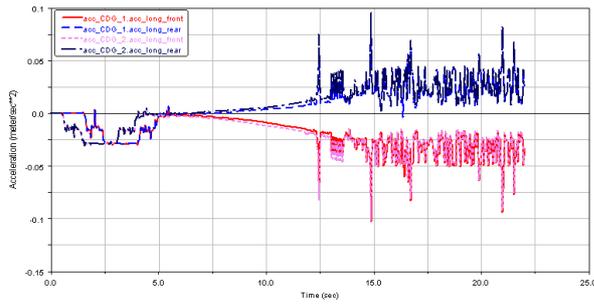


Figura 6.122. Aceleración longitudinal 2V. R = 300 m; V = 20 m/s

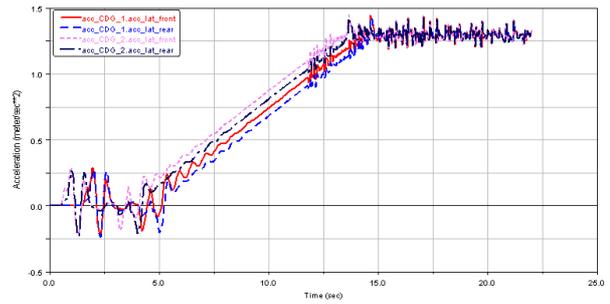


Figura 6.123. Aceleración lateral 2V. R = 300 m; V = 20 m/s

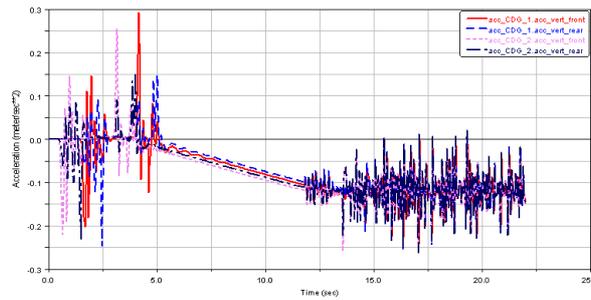


Figura 6.124. Aceleración vertical 2V. R = 300 m; V = 20 m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En las figuras 6.125, 6.126 y 6.127 puede comprobarse como el aumento de la velocidad, manteniendo constante el trazado, supone un aumento de las aceleraciones obtenidas, así como en este caso, una disminución de las perturbaciones presentes.

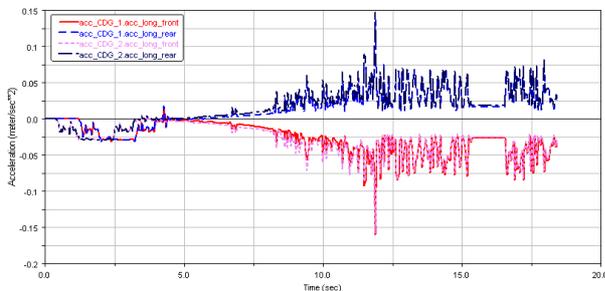


Figura 6.125. Aceleración longitudinal 2V. R = 300 m; V = 25 m/s

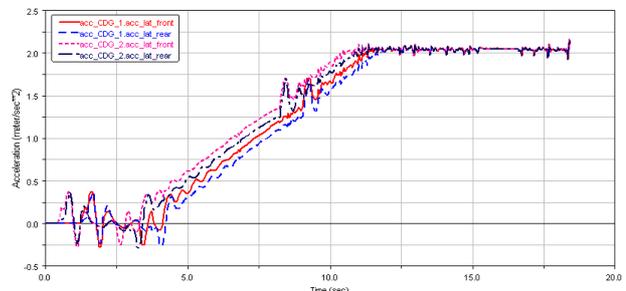


Figura 6.126. Aceleración lateral 2V. R = 300 m; V = 25 m/s

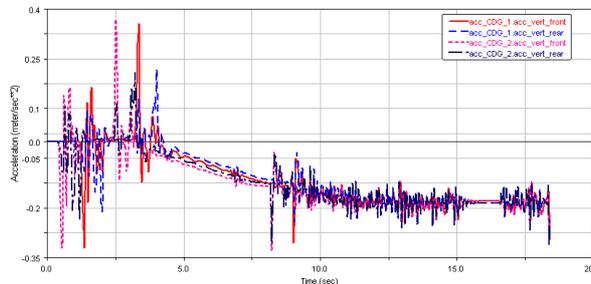


Figura 6.127. Aceleración vertical 2V. R = 300 m; V = 25 m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En las figuras 6.128, 6.129 y 6.130, puede apreciarse el aumento paulatino de las aceleraciones, destacando el aumento de las oscilaciones en la zona de transición para la aceleración lateral.

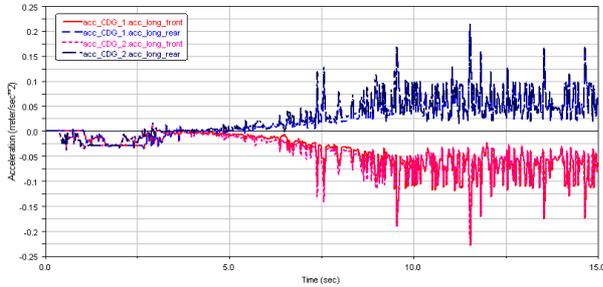


Figura 6.128. Aceleración longitudinal 2V. R = 300 m; V = 30 m/s

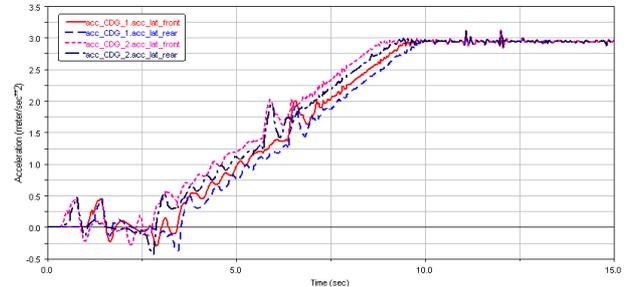


Figura 6.129. Aceleración lateral 2V. R = 300 m; V = 30 m/s

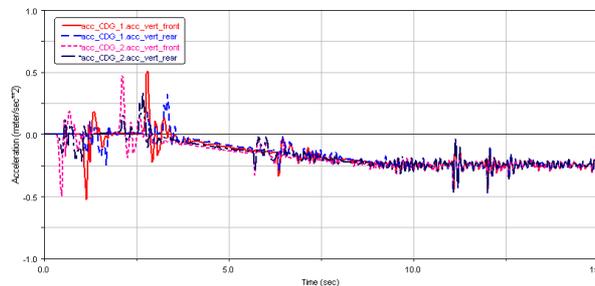


Figura 6.130. Aceleración vertical 2V. R = 300 m; V = 30 m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

El aumento de 5 m/s de la velocidad, ocasiona el aumento de la aceleración lateral en 1 m/s², como puede verse en la figura 6.132. Mientras que en las figuras 6.131 y 6.133 los incrementos producidos en las aceleraciones son muy pequeños.

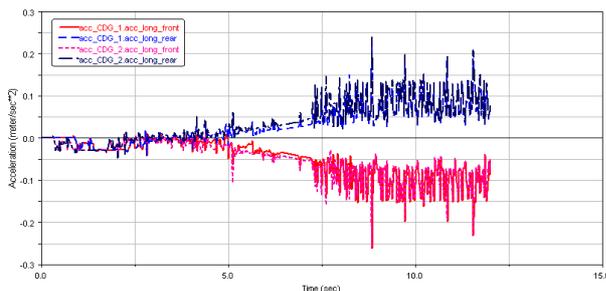


Figura 6.131. Aceleración longitudinal 2V. R = 300 m; V = 35 m/s

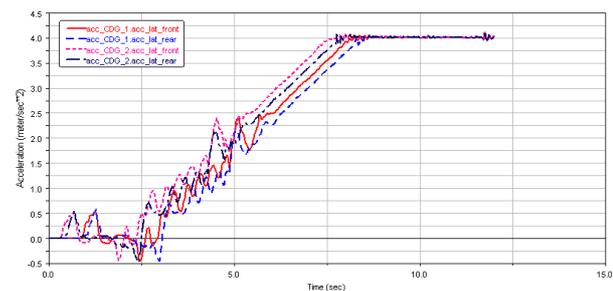


Figura 6.132. Aceleración lateral 2V. R = 300 m; V = 35 m/s

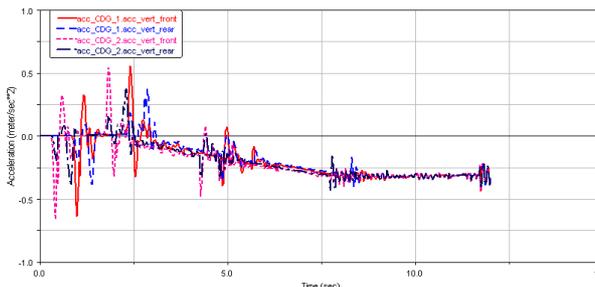


Figura 6.133. Aceleración vertical 2V. R = 300 m; V = 35 m/s

6.5.3 Radio de curvatura de 400 m

A continuación se exponen los resultados obtenidos para una curva de 400 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

El aumento del radio de curvatura, ha ocasionado en las figuras 6.134, 6.135 y 6.136 una disminución de las aceleraciones obtenidas, con respecto a los radios de curvatura anteriormente estudiados.

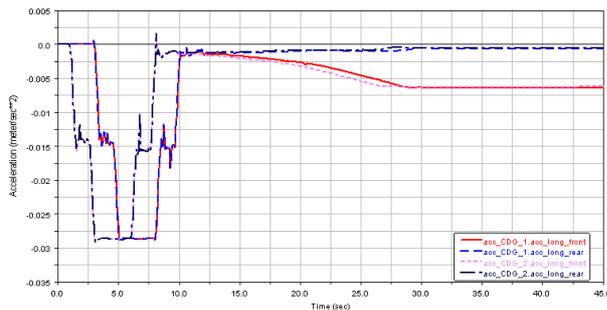


Figura 6.134. Aceleración longitudinal 2V. R = 400 m; V = 10 m/s

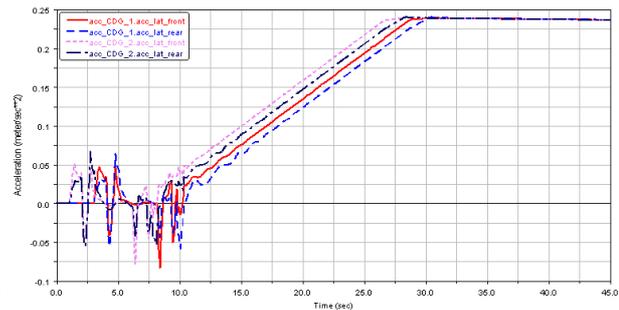


Figura 6.135. Aceleración lateral 2V. R = 400 m; V = 10 m/s

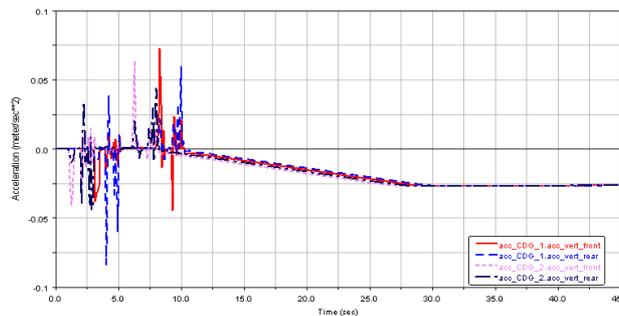


Figura 6.136. Aceleración vertical 2V. R = 400 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En las figuras 6.137, 6.138 y 6.139, puede verse un aumento considerable de las oscilaciones de las aceleraciones en el comienzo del trayecto, así como en el inicio de la curva.

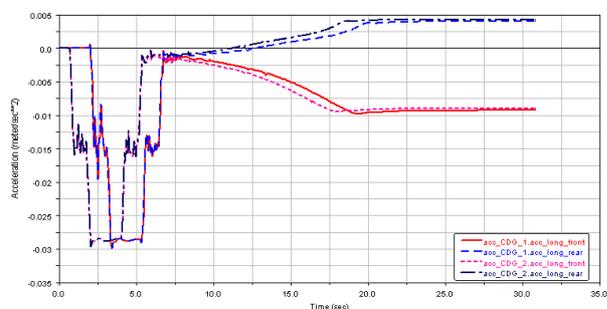


Figura 6.137. Aceleración longitudinal 2V. R = 400 m; V = 15 m/s

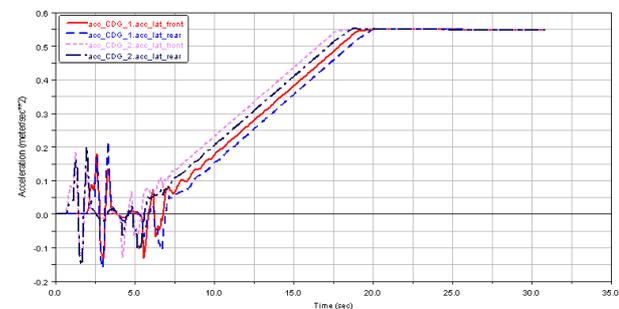


Figura 6.138. Aceleración lateral 2V. R = 400 m; V = 15 m/s

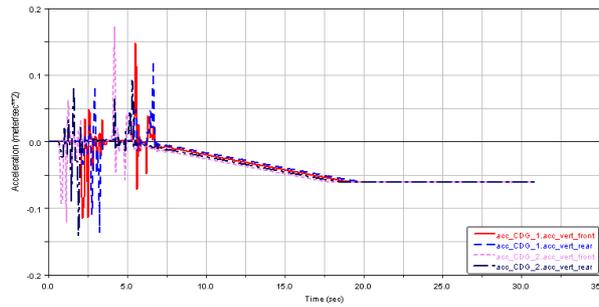


Figura 6.139. Aceleración vertical 2V. R = 400 m; V = 15 m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

Al igual que para el radio de curvatura anterior, la velocidad de 20 m/s ha ocasionado en las figuras 6.140, 6.141 y 6.142 la aparición de las oscilaciones durante el trazado de la curva.

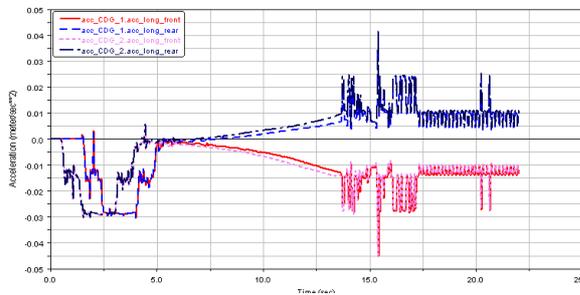


Figura 6.140. Aceleración longitudinal 2V. R = 400 m; V = 20 m/s

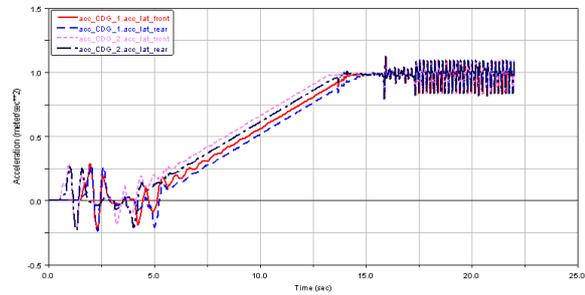


Figura 6.141. Aceleración lateral 2V. R = 400 m; V = 20 m/s

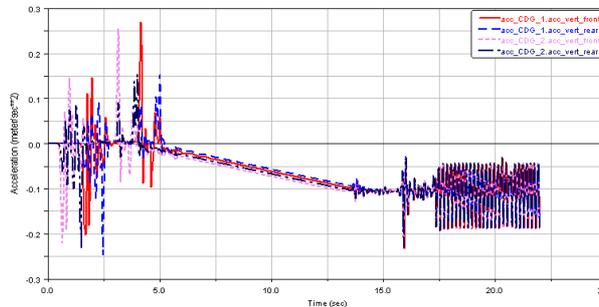


Figura 6.142. Aceleración vertical 2V. R = 400 m; V = 20 m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En las figuras 6.143, 6.144 y 6.145 puede apreciarse la presencia de grandes oscilaciones puntuales, además del correspondiente incremento de los valores de las aceleraciones con respecto al caso anterior.

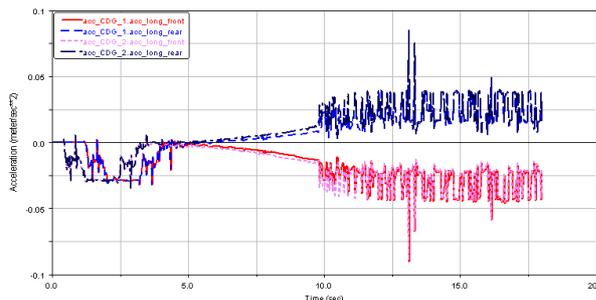


Figura 6.143. Aceleración longitudinal 2V. R = 400 m; V = 25 m/s

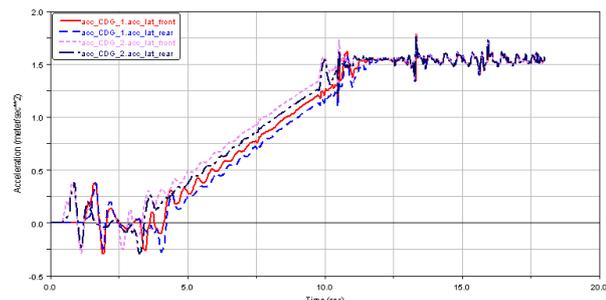


Figura 6.144. Aceleración lateral 2V. R = 400 m; V = 25 m/s

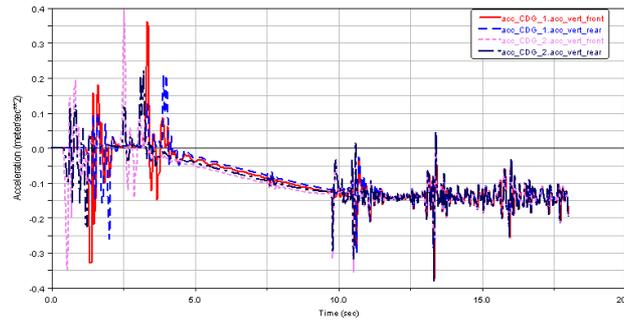


Figura 6.145. Aceleración vertical 2V. R = 400 m; V = 25 m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

A excepción de la figura 6.146, la presencia de las oscilaciones puntuales prácticamente ha desaparecido, como puede observarse en las figuras 6.147 y 6.148.

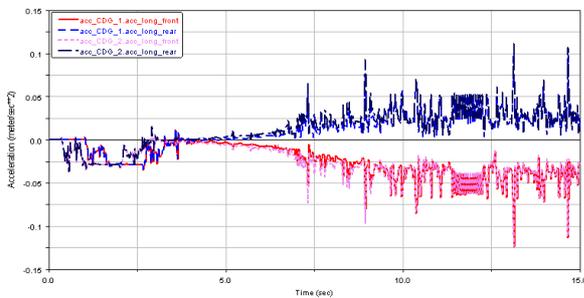


Figura 6.146. Aceleración longitudinal 2V. R = 400 m; V = 30 m/s

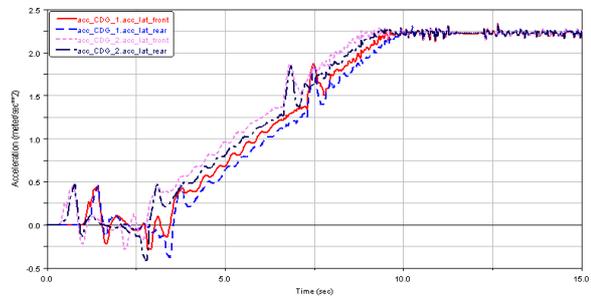


Figura 6.147. Aceleración lateral 2V. R = 400 m; V = 30 m/s

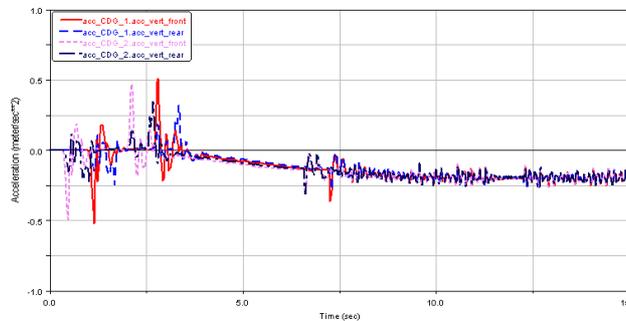


Figura 6.148. Aceleración vertical 2V. R = 400 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En las figuras 6.149, 6.150 y 6.151, puede verse un decremento importante del valor de las aceleraciones debido al aumento del radio de curvatura. Principalmente, este hecho, puede comprobarse en las aceleraciones laterales, con una disminución de hasta 1 m/s^2 con respecto al radio de curvatura anterior.

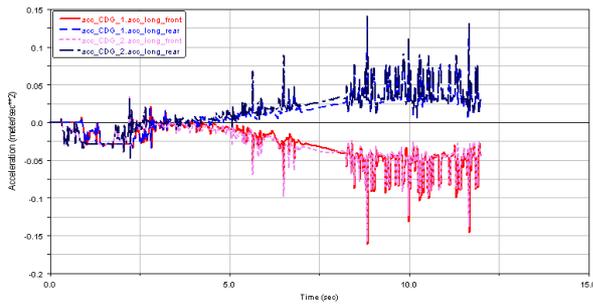


Figura 6.149. Aceleración longitudinal 2V. R = 400 m; V = 35 m/s

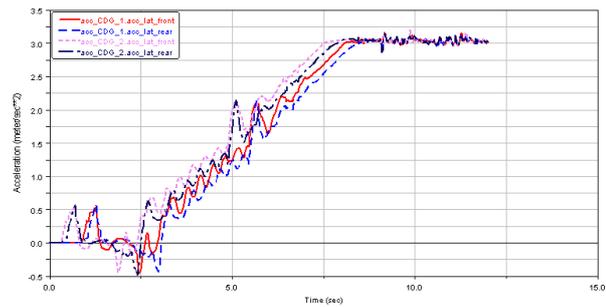


Figura 6.150. Aceleración lateral 2V. R = 400 m; V = 35 m/s

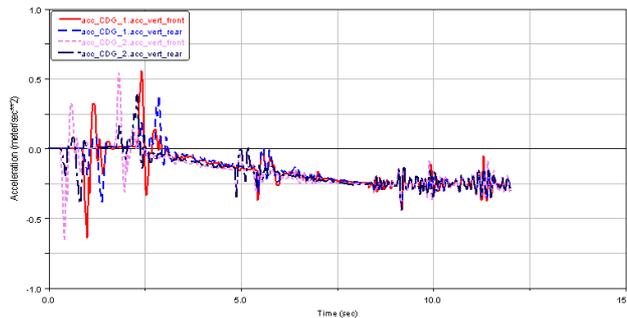


Figura 6.151. Aceleración vertical 2V. R = 400 m; V = 10 m/s

6.5.4 Radio de curvatura de 500 m

El aumento del radio de curvatura, produce la disminución de las aceleraciones presentes en el modelo, destacando las similitudes presentes con respecto al estudio de un vagón de mercancías:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

El aumento del radio de curvatura, ha ocasionado en las figuras 6.152, 6.153 y 6.154 una disminución de las aceleraciones obtenidas con respecto al radio de la curva anterior.

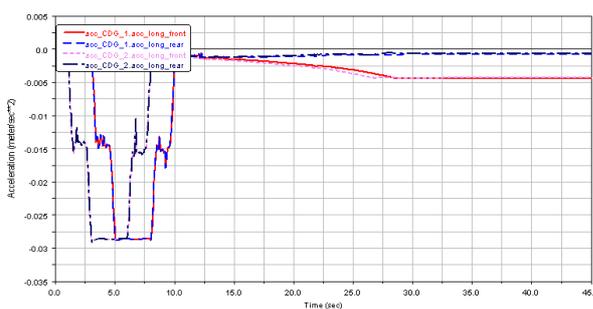


Figura 6.152. Aceleración longitudinal 2V. R = 500 m; V = 10 m/s

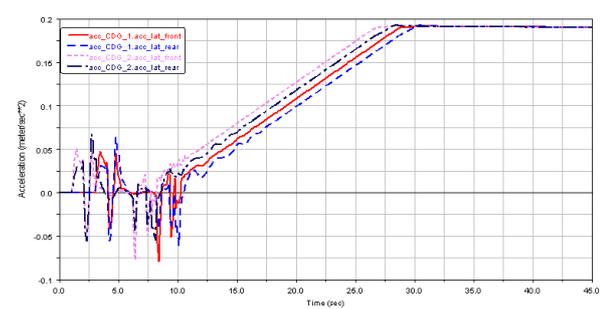


Figura 6.153. Aceleración lateral 2V. R = 500 m; V = 10 m/s

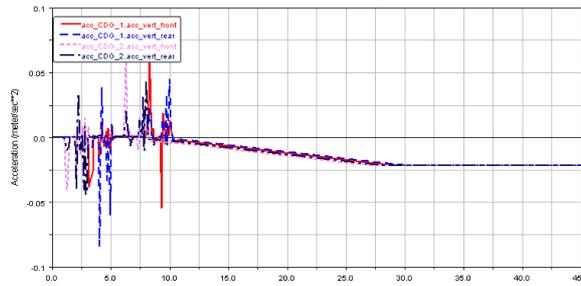


Figura 6.154. Aceleración vertical 2V. R = 500 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

El aumento de la velocidad en 5 m/s ha causado en las figuras 6.155, 6.156 y 6.157 un aumento considerable de las oscilaciones en el tramo inicial del trazado, hasta la toma de la curva correspondiente.

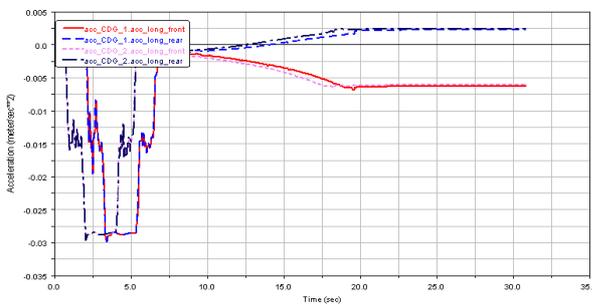


Figura 6.155. Aceleración longitudinal 2V. R = 500 m; V = 15 m/s

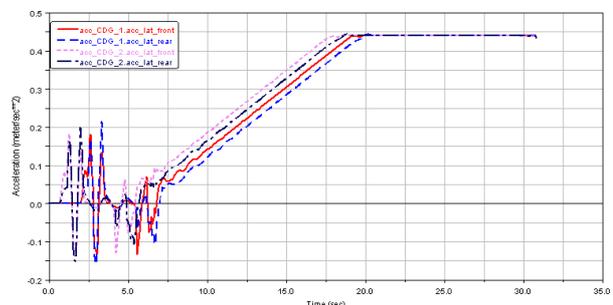


Figura 6.156. Aceleración lateral 2V. R = 500 m; V = 10 m/s

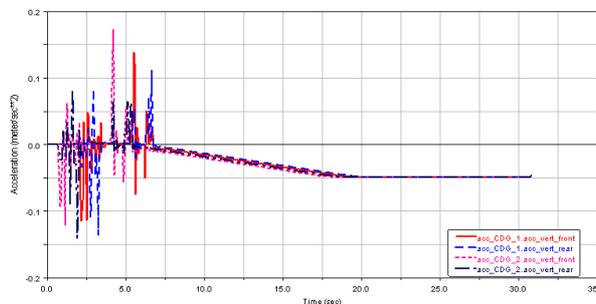


Figura 6.157. Aceleración vertical 2V. R = 500 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En las figuras 6.158, 6.159 y 6.160 pueden verse la aparición de oscilaciones para una velocidad de 20 m/s, a diferencia del caso para un único vagón que aparecían para una velocidad de 25 m/s.

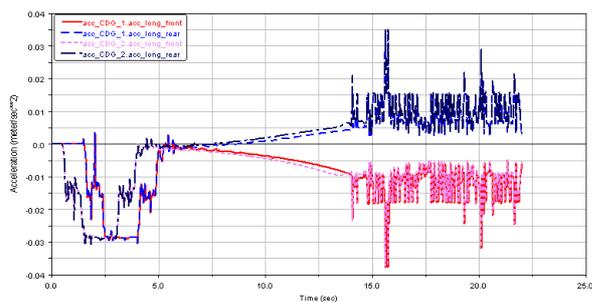


Figura 6.158. Aceleración longitudinal 2V. R = 500 m; V = 20 m/s

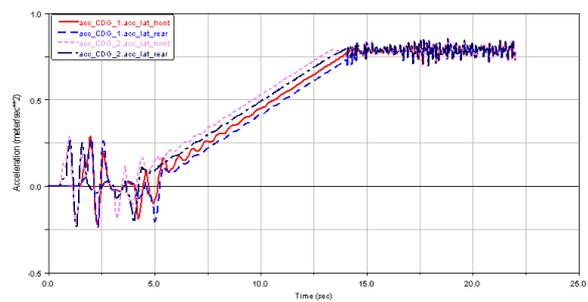


Figura 6.159. Aceleración lateral 2V. R = 500 m; V = 20 m/s

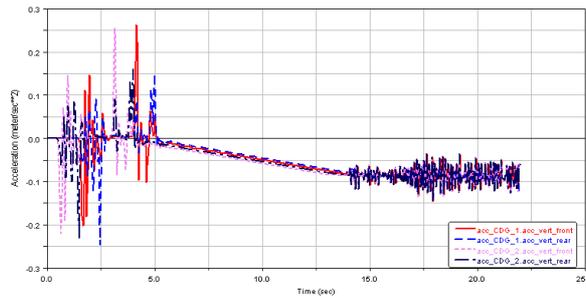


Figura 6.160. Aceleración vertical 2V. R = 500 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

Un incremento de la velocidad ocasiona un aumento de las oscilaciones en el arranque del tren, mientras que las aceleraciones siguen incrementando su valor paulatinamente, como puede comprobarse en las figuras 6.161, 6.162 y 6.163.

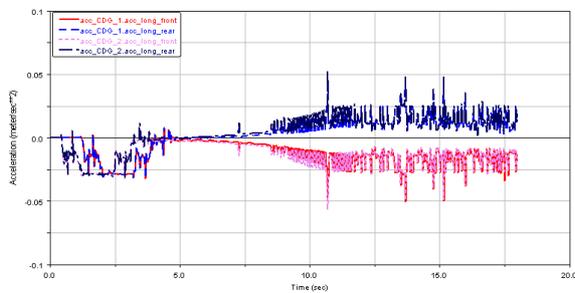


Figura 6.161. Aceleración longitudinal 2V. R = 500 m; V = 25 m/s

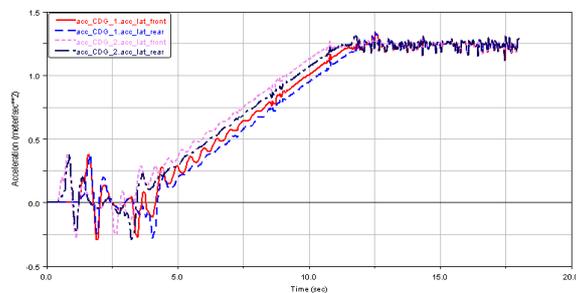


Figura 6.162. Aceleración lateral 2V. R = 500 m; V = 25 m/s

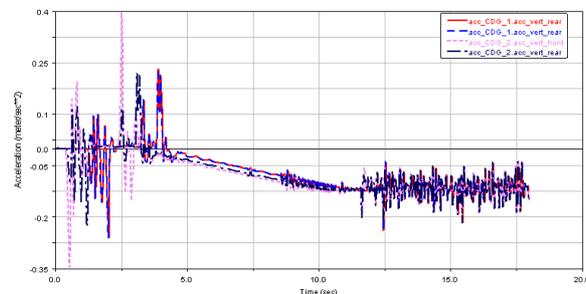


Figura 6.163. Aceleración vertical 2V. R = 500 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

El aumento de la velocidad en 5 m/s ha ocasionado la desaparición de las perturbaciones durante la circulación en curva, como puede apreciarse en las figuras 6.164, 6.165 y 6.166.

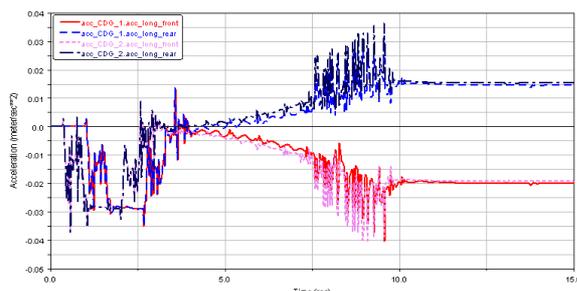


Figura 6.164. Aceleración longitudinal 2V. R = 500 m; V = 30 m/s

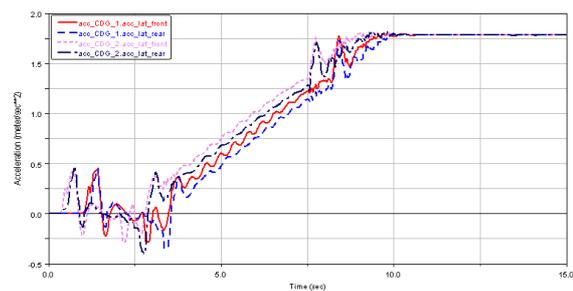


Figura 6.165. Aceleración lateral 2V. R = 500 m; V = 30 m/s

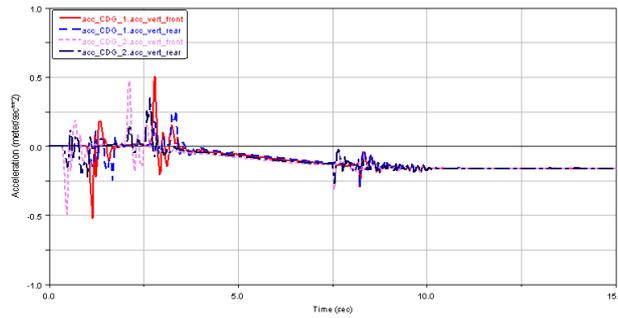


Figura 6.166. Aceleración vertical 2V. R = 500 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En las figuras 6.167, 6.168 y 6.169 se representan las aceleraciones longitudinales, laterales y verticales para una velocidad de 35 m/s. Destacando que estas mantienen los valores con respecto al caso de un único vagón.

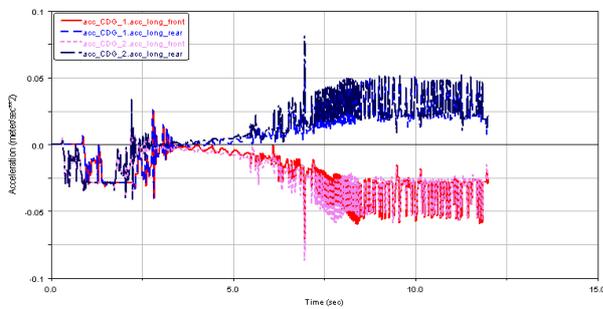


Figura 6.167. Aceleración longitudinal 2V. R = 500 m; V = 30 m/s

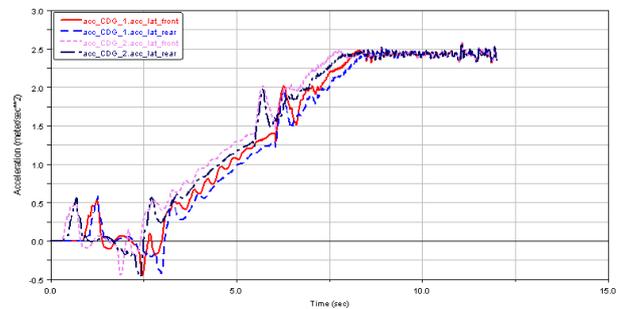


Figura 6.168. Aceleración lateral 2V. R = 500 m; V = 35 m/s

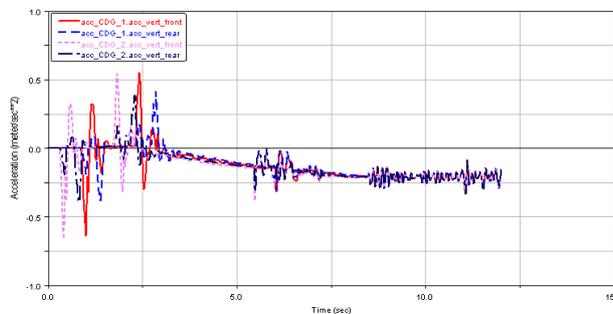


Figura 6.169. Aceleración vertical 2V. R = 500 m; V = 10 m/s

6.5.5 Radio de curvatura de 600 m

Como se puede observar en los siguientes casos, las diferencias presente entre ambos vagones son mínimas, destacando las similitudes con respecto al estudio de un vagón de mercancías:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En las figuras 6.170, 6.171 y 6.172, puede verse que las aceleraciones toman valores bastante pequeños en comparación con los resultados obtenidos para un radio de 200 metros.

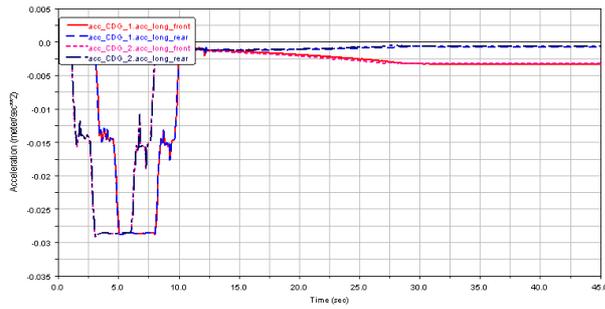


Figura 6.170. Aceleración longitudinal 2V. R = 600 m; V = 10 m/s

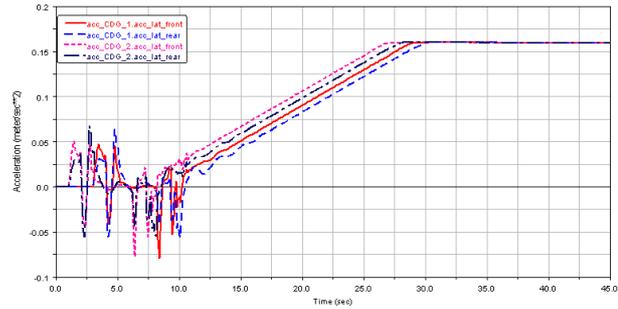


Figura 6.171. Aceleración lateral 2V. R = 600 m; V = 10 m/s

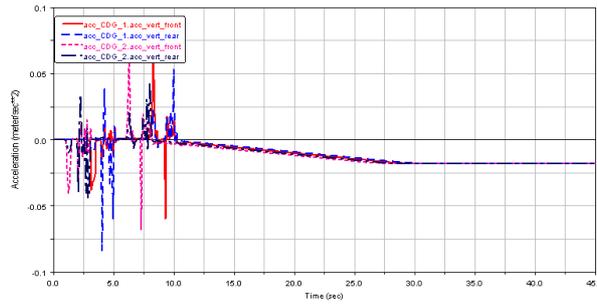


Figura 6.172. Aceleración vertical 2V. R = 600 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

El aumento de la velocidad, ocasiona un aumento de las aceleraciones. Hay que tener en cuenta que este incremento va siendo cada vez menor, debido al aumento del radio de curvatura, tal como se puede comprobar en las figuras 6.173, 6.174 y 6.175.

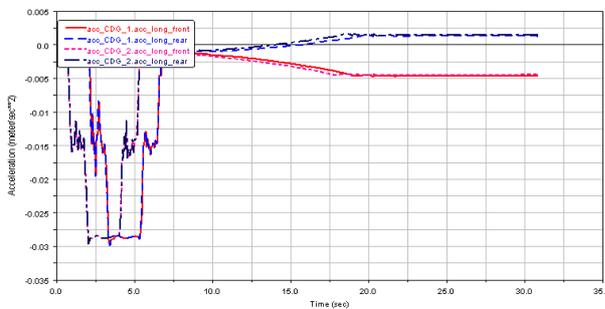


Figura 6.173. Aceleración longitudinal 2V. R = 600 m; V = 15 m/s

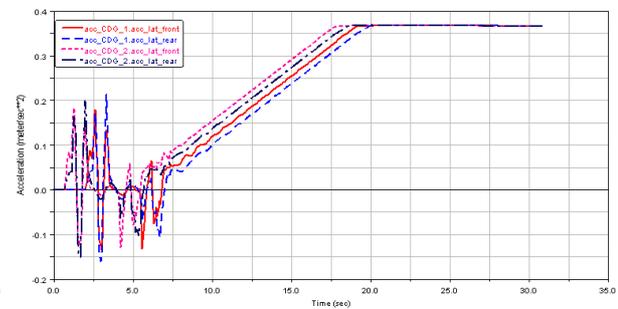


Figura 6.174. Aceleración lateral 2V. R = 600 m; V = 15 m/s

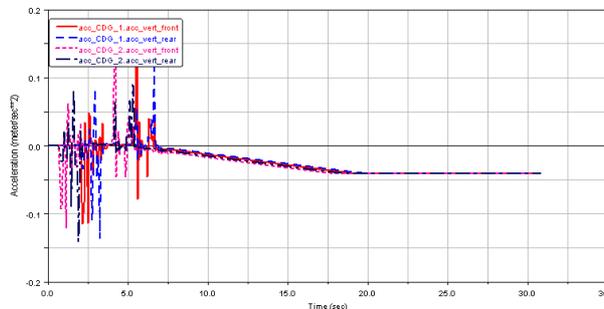


Figura 6.175. Aceleración vertical 2V. R = 600 m; V = 15 m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En las figuras 6.176, 6.177 y 6.178, puede comprobarse que las oscilaciones iniciales mantienen su valor independientemente del aumento de la velocidad, pero puede apreciarse la aparición de las oscilaciones en la zona de transición.

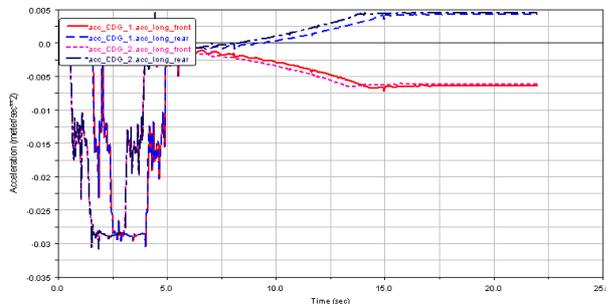


Figura 6.176. Aceleración longitudinal 2V. R = 600 m; V = 20 m/s

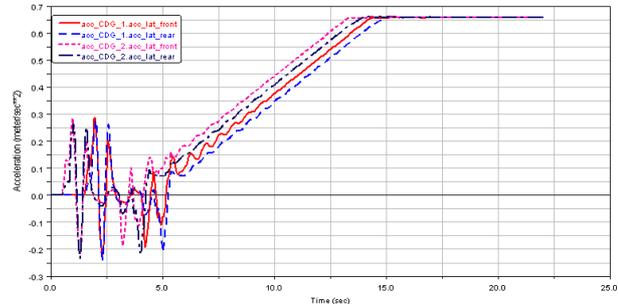


Figura 6.177. Aceleración lateral 2V. R = 600 m; V = 20 m/s

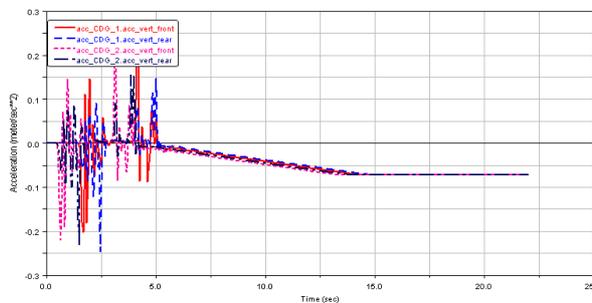


Figura 6.178. Aceleración vertical 2V. R = 600 m; V = 20 m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

A diferencia del caso de un vagón, la presencia de las oscilaciones en las figuras 6.179, 6.180 y 6.181 han tenido lugar para una velocidad de 25 m/s, a diferencia de los 30 m/s necesarios para su aparición en el caso de un único vagón.

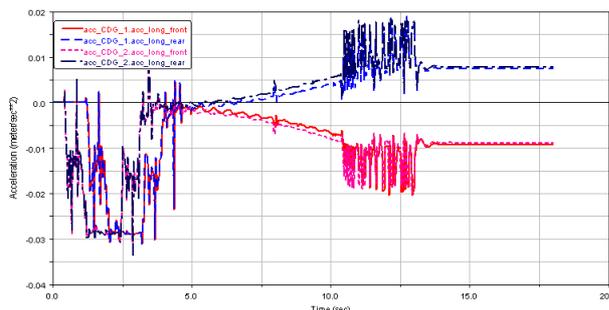


Figura 6.179. Aceleración longitudinal 2V. R = 600 m; V = 25 m/s

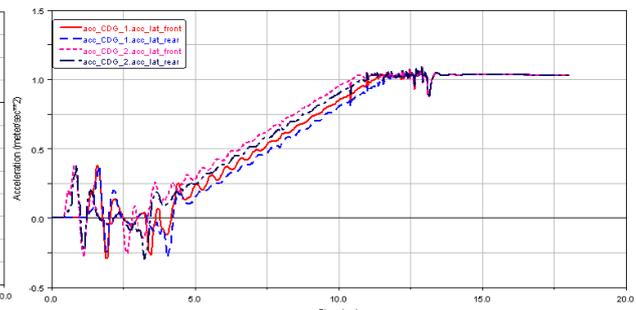


Figura 6.180. Aceleración lateral 2V. R = 600 m; V = 25 m/s

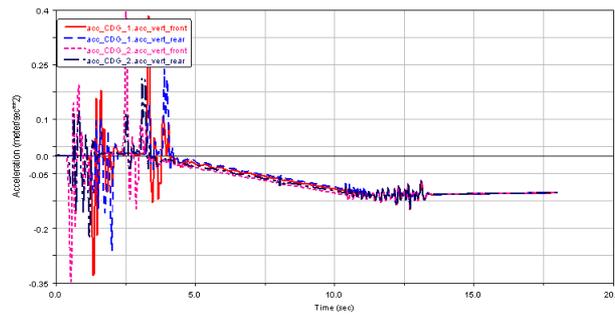


Figura 6.181. Aceleración vertical 2V. R = 600 m; V = 25 m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En las figuras 6.182, 6.183 y 6.184, se representan las aceleraciones longitudinales, laterales y verticales para dos vagones. Se puede comprobar principalmente en la figura 6.183, como la zona de transición empieza a diferentes tiempos, debido a que un vagón inicia la toma de la curva antes que otro.

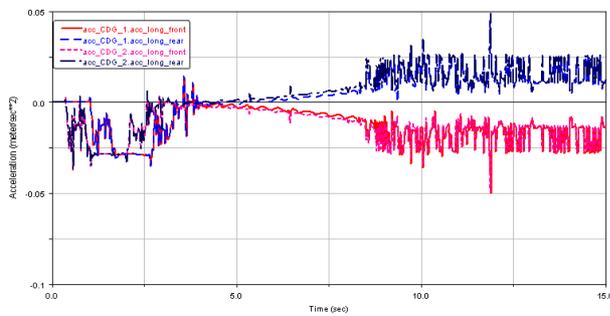


Figura 6.182. Aceleración longitudinal 2V. R = 600 m; V = 30 m/s

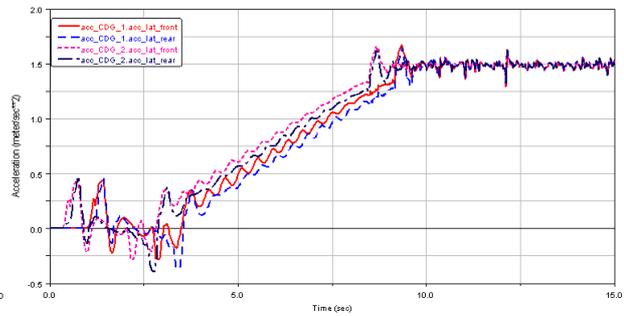


Figura 6.183. Aceleración lateral 2V. R = 600 m; V = 30 m/s

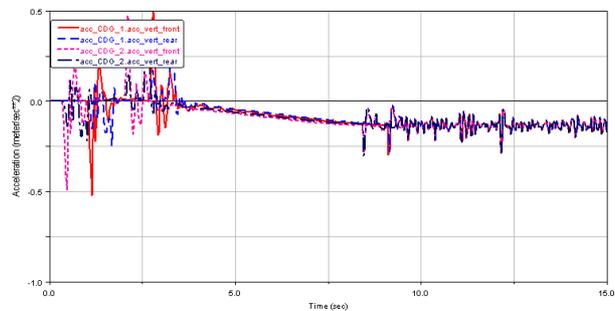


Figura 6.184. Aceleración vertical 2V. R = 600 m; V = 30 m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Por último, en las figuras 6.185, 6.186 y 6.187, puede verse como las aceleraciones obtenidas son bastante menores que para un radio de curvatura inferior, debido principalmente al menor valor de las fuerzas de inercia implicadas en el suceso.

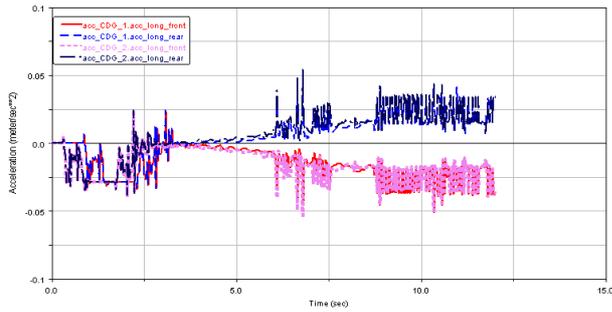


Figura 6.185. Aceleración longitudinal 2V. R = 600 m; V = 35 m/s

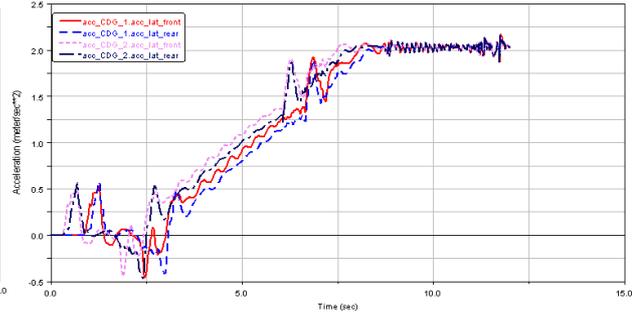


Figura 6.186. Aceleración lateral 2V. R = 600 m; V = 35 m/s

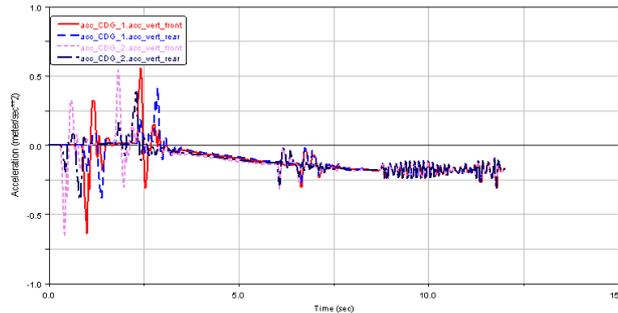


Figura 6.187. Aceleración vertical 2V. R = 600 m; V = 35 m/s

Tras el estudio de las aceleraciones obtenidas, se puede observar como a medida que la velocidad va disminuyendo o el radio de curvatura aumentando, las aceleraciones obtenidas son menores, por otro lado, se comprueba las continuas oscilaciones presentes en este tipo de bogés de carga. Por último, cabe destacar la poca diferencia existente entre los resultados con un vagón y con dos vagones, por ese motivo, y con el objetivo de ahorrar cálculos innecesarios, a partir de este punto, solo se realizara el estudio de un vagón de mercancías.

6.6 Estudio de las aceleraciones en presencia de irregularidades en el vía

Tras la realización del estudio anterior, en el que se ha considerado la vía como ideal, se lleva a cabo el estudio de un vagón de mercancías ante la presencia de irregularidades en la vía. El principal objetivo de este estudio, es comprobar las diferencias existentes en el comportamiento del bogie Y25, según se tenga en cuenta la presencia o ausencia de las irregularidades.

Para la realización de este estudio, se ha utilizado la técnica de generación de irregularidades de la vía basado en función PSD, ya que este proceso se ha propuesto por numerosas autoridades ferroviarias tales como SNCF en Francia o FRA en EE.UU.

Las irregularidades de la vía, se consideran estacionarias en el espacio, es decir, se pueden generar mediante funciones aleatorias en función de la distancia de paso del tren, y frecuentemente se caracterizan por la función PSD, $S(\gamma)$, como se muestran en las siguientes expresiones [37]:

$$S_z(\gamma) = \frac{A\gamma_2^2(\gamma^2 + \gamma_1^2)}{\gamma^4(\gamma^2 + \gamma_2^2)} \quad (m^3) \quad \text{Ecuación 51}$$

$$S_y(\gamma) = \frac{A\gamma_2^2}{(\gamma^2 + \gamma_1^2)(\gamma^2 + \gamma_2^2)} \quad (m^3) \quad \text{Ecuación 52}$$

Donde γ (m^{-1}) es el número de onda considerado en la generación de γ_1 y γ_2 , y A (m^3) es el valor determinado según el tipo y el estado del carril clasificado en una escala de 6 clases.

En las figuras 6.188 y 6.189, se representa un ejemplo de las irregularidades presentes en la vía, tanto en el eje Y como en el eje Z.

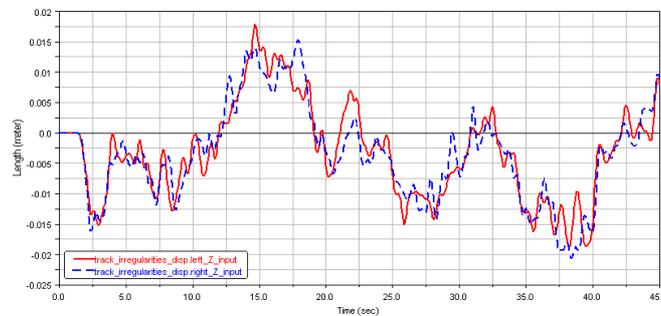


Figura 6.188. Irregularidades a ambos lados del eje Z

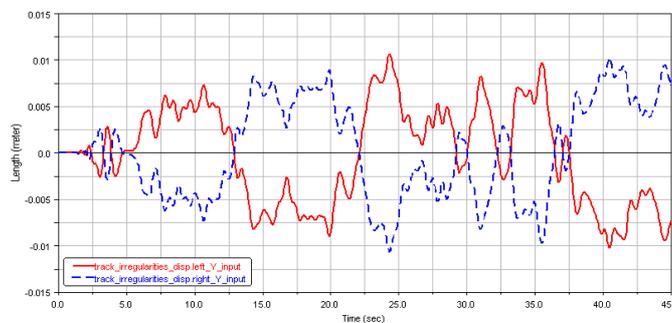


Figura 6.189. Irregularidades a ambos lados del eje Y

A continuación, se exponen los resultados obtenidos para las aceleraciones longitudinales, verticales y laterales para cada uno de los casos a estudio.

6.6.1 Radio de curvatura de 200 m

A continuación se exponen los resultados obtenidos para las diferentes velocidades simuladas, teniendo en cuenta que el trayecto seguido consta de una curva de 200 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

La presencia de irregularidades, repercute negativamente en las aceleraciones mostradas en las figuras 6.190, 6.191 y 6.192, ya que aumenta los valores de las mismas, así como las perturbaciones presentes.

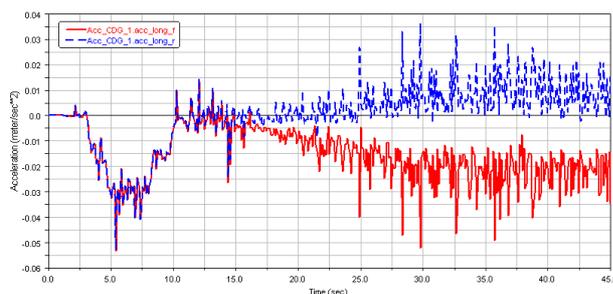


Figura 6.190. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 200 m; V = 10 m/s

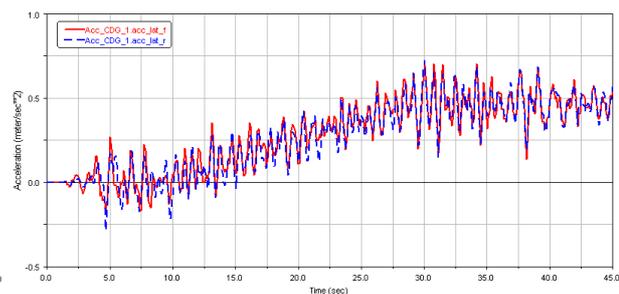


Figura 6.191. Aceleración lateral. Irreg . R = 200 m; V = 10 m/s

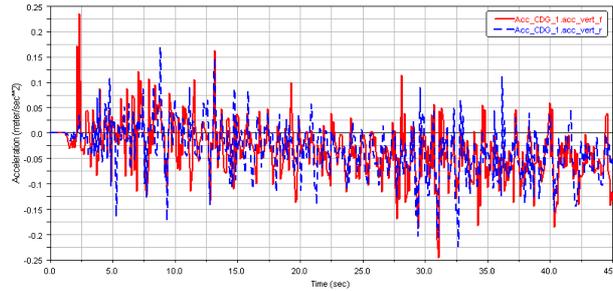


Figura 6.192. Aceleración vertical. Irreg. $R = 200\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En las figuras 6.193, 6.194 y 6.195, pueden apreciarse que el aumento de la velocidad proporciona un aumento de las aceleraciones obtenidas, además en este caso puede apreciarse grandes oscilaciones aisladas, tanto en la aceleración longitudinal como en la vertical.

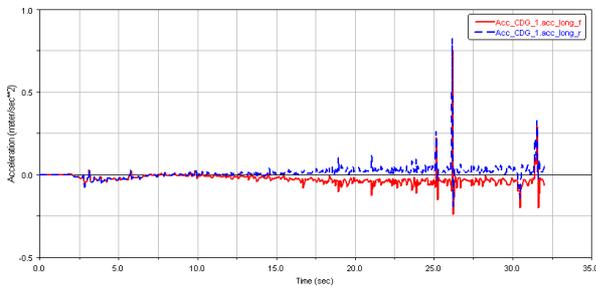


Figura 6.193. Aceleración longitudinal. Irreg. $R = 200\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

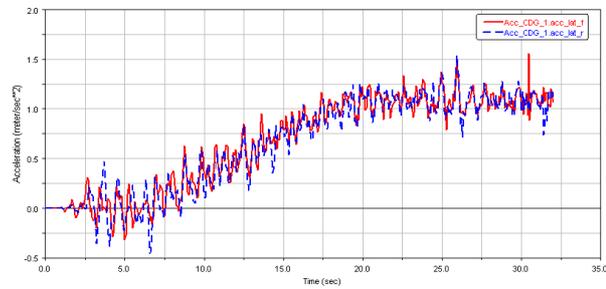


Figura 6.194. Aceleración lateral. Irreg. $R = 200\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

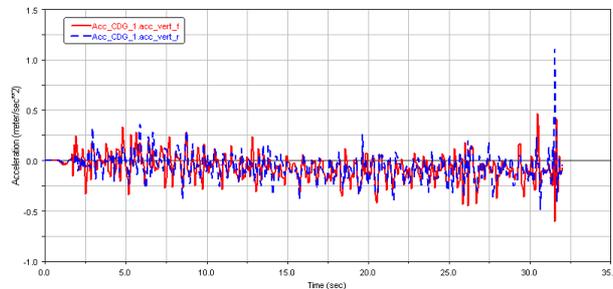


Figura 6.195. Aceleración vertical. Irreg. $R = 200\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En este caso, un pequeño aumento de la velocidad en 5 m/s, proporciona un importante incremento de la aceleración lateral, como se muestra en la figura 6.197, mientras que en las figuras 6.196 y 6.198, sus valores también se incrementan, pero en menor medida que en el caso de la aceleración lateral.

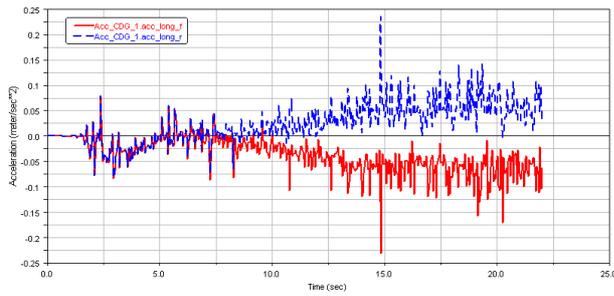


Figura 6.196. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 200 m; V = 20 m/s

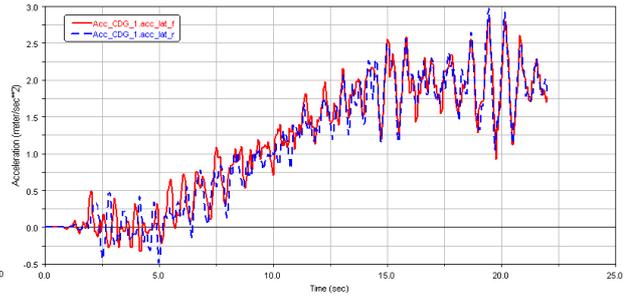


Figura 6.197. Aceleración lateral. Irreg . R = 200 m; V = 20 m/s

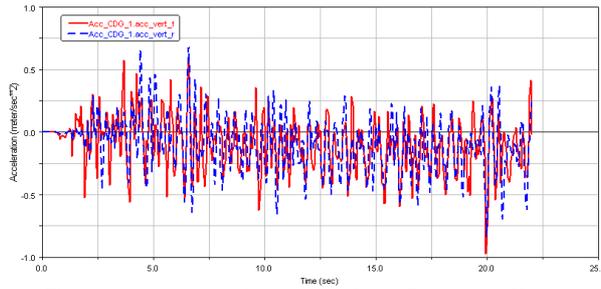


Figura 6.198. Aceleración vertical. Irreg. R = 200 m; V = 20 m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En las figuras 6.199, 6.200 y 6.201, se puede comprobar cómo las aceleraciones aumentan considerablemente debido al aumento de velocidad realizado.

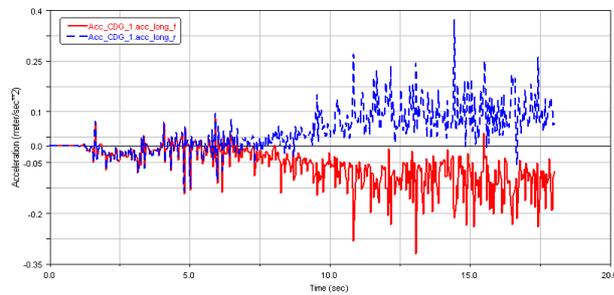


Figura 6.199. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 200 m; V = 25 m/s

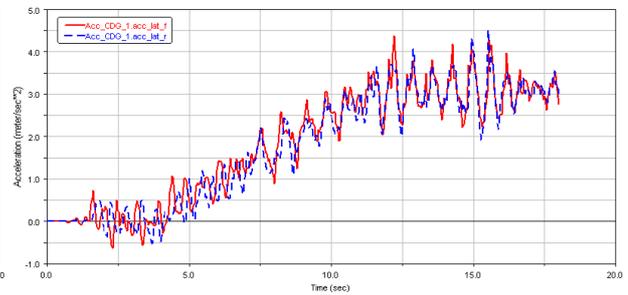


Figura 6.200. Aceleración lateral. Irreg . R = 200 m; V = 25 m/s

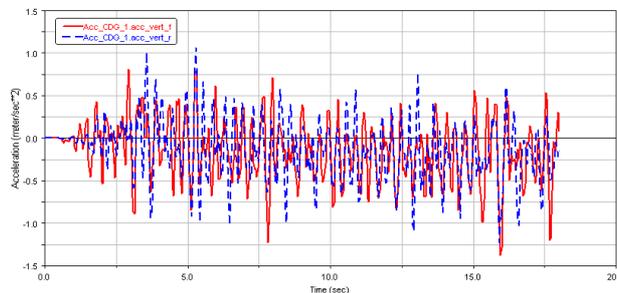


Figura 6.201. Aceleración vertical. Irreg. R = 200 m; V = 25 m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En el caso de la presencia de irregularidades, se obtienen aceleraciones bastantes superiores a las obtenidas en ausencia de las mismas, como puede

verse principalmente en la figura 6.203, como también en las figuras 6.202 y 6.204.

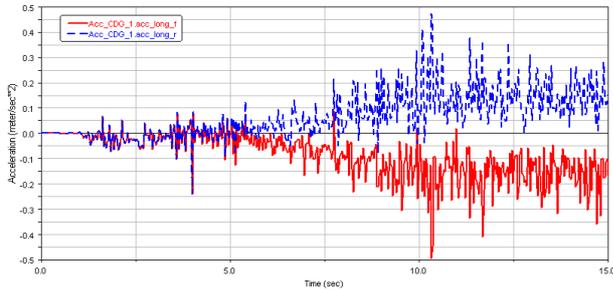


Figura 6.202. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 200 m; V = 30 m/s

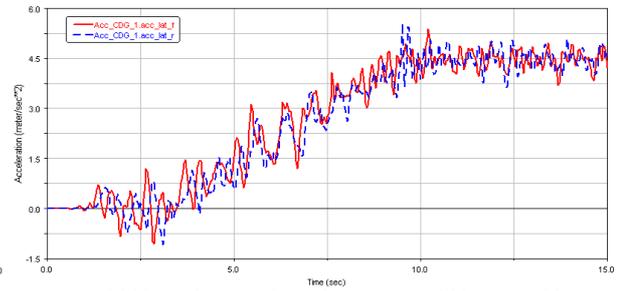


Figura 6.203. Aceleración lateral. Irreg . R = 200 m; V = 30 m/s

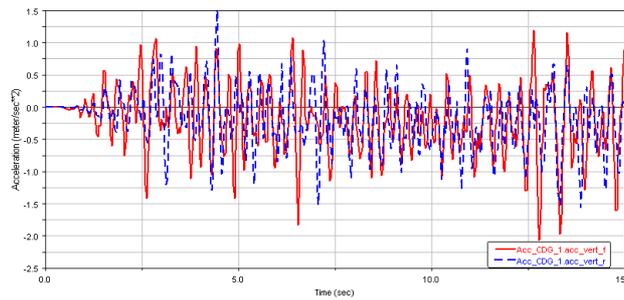


Figura 6.204. Aceleración vertical. Irreg. R = 200 m; V = 30 m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Para un radio de curvatura tan pequeño como el simulado en este caso, una velocidad de 35 m/s puede provocar el descarrilamiento del vehículo, por ese motivo en las graficas 6.205, 6.206 y 5.207, se observan grandes aceleraciones cuando tiene lugar el descarrilamiento del vagón.

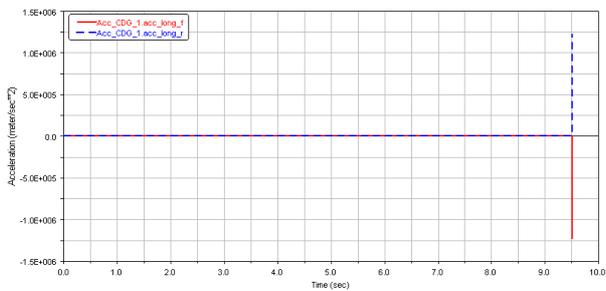


Figura 6.205. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 200 m; V = 35 m/s

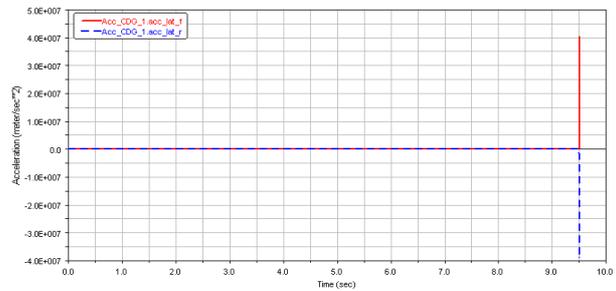


Figura 6.206. Aceleración lateral. Irreg . R = 200 m; V = 35 m/s

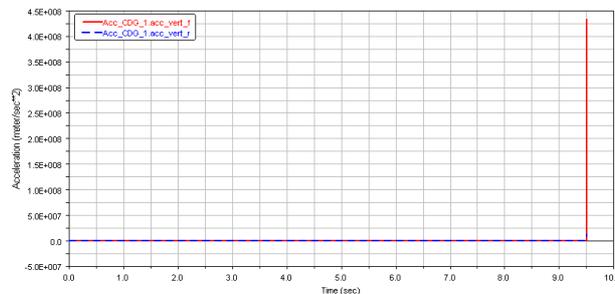


Figura 6.207. Aceleración vertical. Irreg. R = 200 m; V = 35 m/s

6.6.2 Radio de curvatura de 300 m

A continuación se exponen los resultados obtenidos para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto seguido consta de una curva de 300 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

El aumento del radio de curvatura, tendrá consecuencias positivas en el confort, ya que el incremento que sufren las aceleraciones con la velocidad irá disminuyendo; en las graficas 6.208, 6.209 y 6.210, se puede ver una pequeña disminución en las aceleraciones con respecto al radio de curvatura anterior.

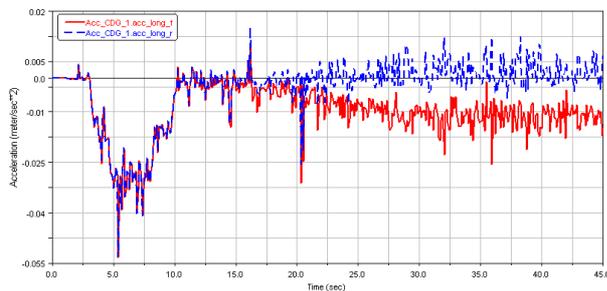


Figura 6.208. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 300 m; V = 10 m/s

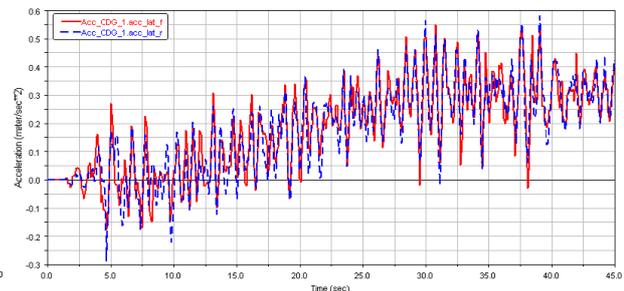


Figura 6.209. Aceleración lateral. Irreg . R = 300 m; V = 10 m/s

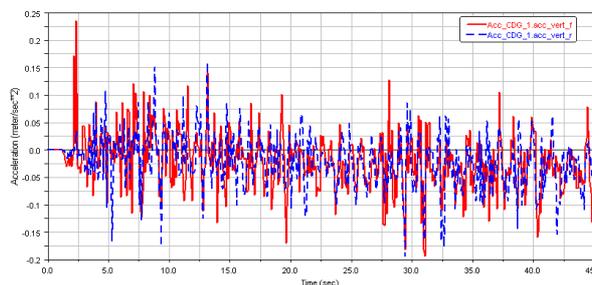


Figura 6.210. Aceleración vertical. Irreg. R = 300 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

Al igual que en el radio de curvatura anterior, para una velocidad de 15 m/s, aparecen en las figuras 6.211 y 6.213 grandes perturbaciones aisladas al final del periodo de simulación, por este motivo, los índices de confort pueden verse alterados de su verdadero valor; con respecto a la figura 6.212, puede verse como la aceleración va incrementando su valor con la velocidad.

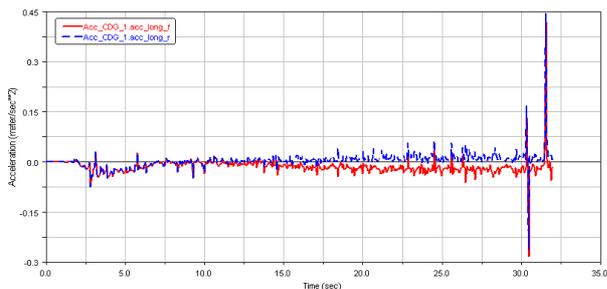


Figura 6.211. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 300 m; V = 15 m/s

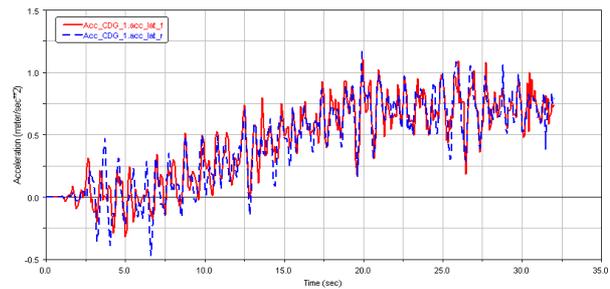


Figura 6.212. Aceleración lateral. Irreg . R = 300 m; V = 15 m/s

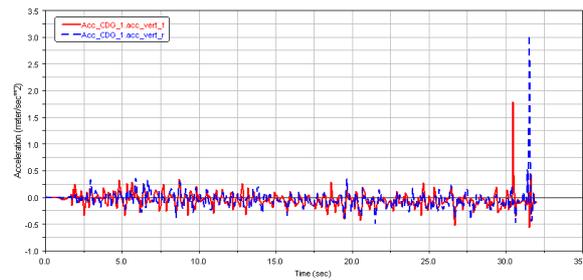


Figura 6.213. Aceleración vertical. Irreg. $R = 300\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En las figuras 6.214, 6.215 y 6.216, se mantienen algunas grandes perturbaciones aisladas debido a la presencia de las irregularidades, además los valores de las mismas han disminuido con respecto al radio de curvatura anterior.

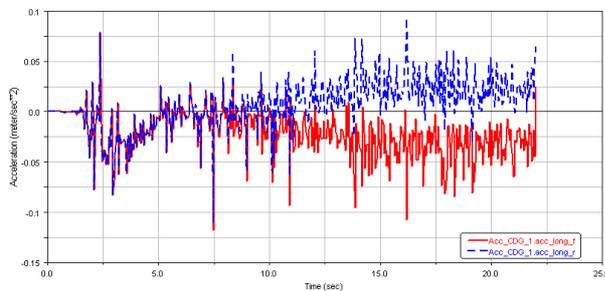


Figura 6.214. Aceleración longitudinal. Irreg. $R = 300\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

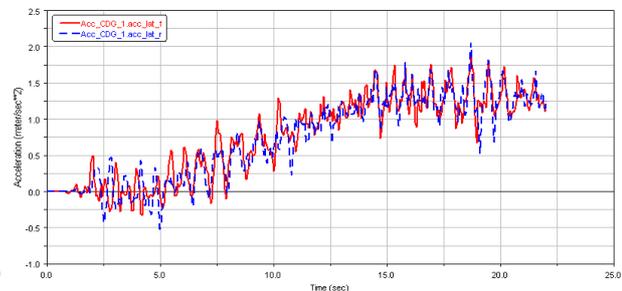


Figura 6.215. Aceleración lateral. Irreg. $R = 300\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

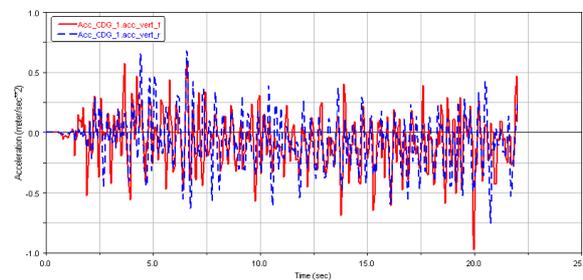


Figura 6.216. Aceleración vertical. Irreg. $R = 300\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

Como se puede observar en las figuras 6.217, 6.218 y 6.219 con relación a las aceleraciones obtenidas para la velocidad anteriormente estudiada, es que la aceleración longitudinal y vertical aumentan en menor medida su valor en relación al incremento sufrido por la aceleración lateral.

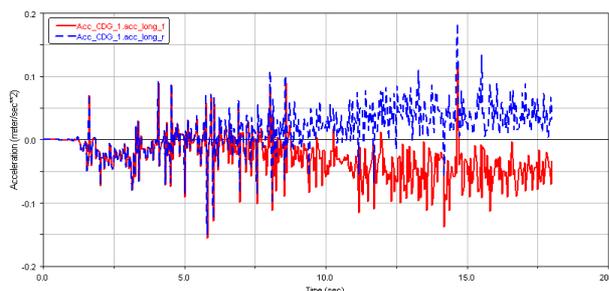


Figura 6.217. Aceleración longitudinal. Irreg. $R = 300\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

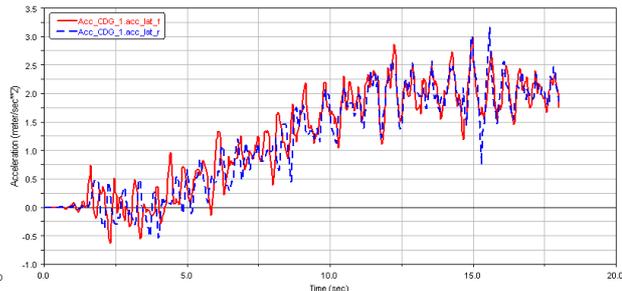


Figura 6.218. Aceleración lateral. Irreg. $R = 300\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

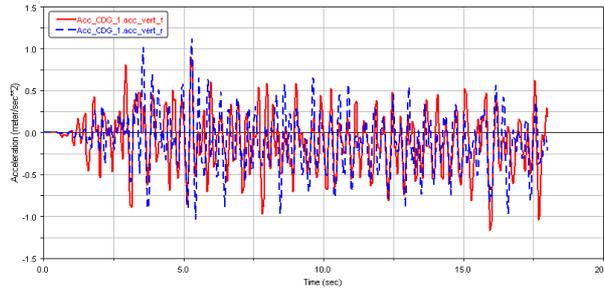


Figura 6.219. Aceleración vertical. Irreg. $R = 300\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

El aumento de la velocidad en 5 m/s a supuesto a las figuras 6.220, 6.221 y 6.222 un incremento de sus valores, destacando que la aceleración lateral llega a alcanzar incluso valores de 4 m/s^2 .

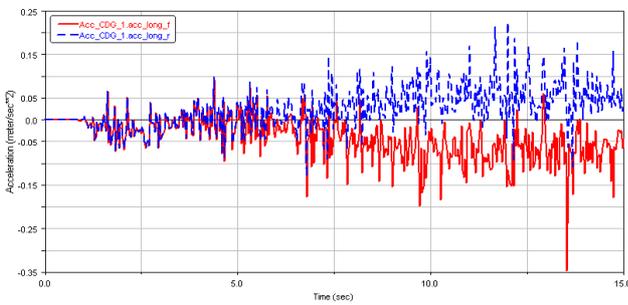


Figura 6.220. Aceleración longitudinal. Irreg. $R = 300\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

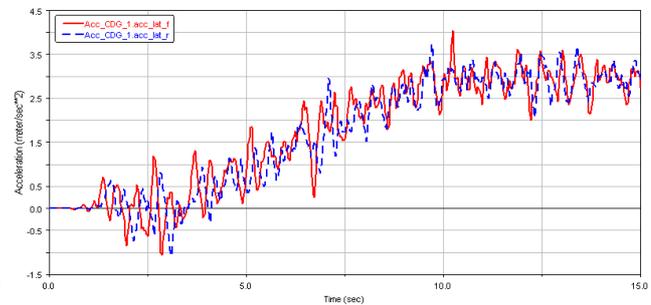


Figura 6.221. Aceleración lateral. Irreg. $R = 300\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

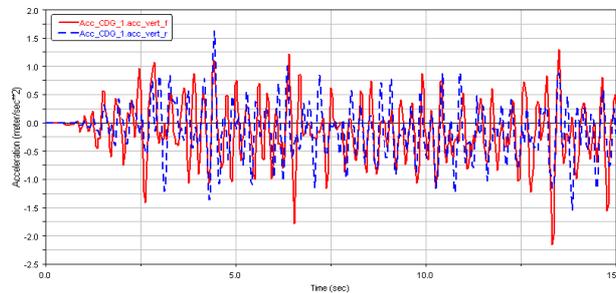


Figura 6.222. Aceleración vertical. Irreg. $R = 300\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Para una velocidad de 35 m/s, se puede ver en la figura 6.224 como la aceleración se hace constante para un valor de aproximadamente 4.5 m/s^2 , muy superior al valor obtenido en ausencia de las irregularidades, con respecto a las figuras 6.223 y 6.225, también se observa un incremento de sus valores, pero en menor medida que para la aceleración lateral.

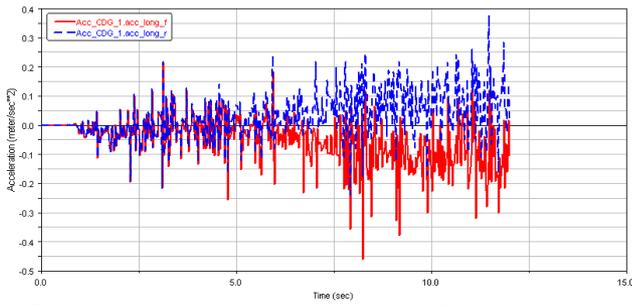


Figura 6.223. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 300 m; V = 35 m/s

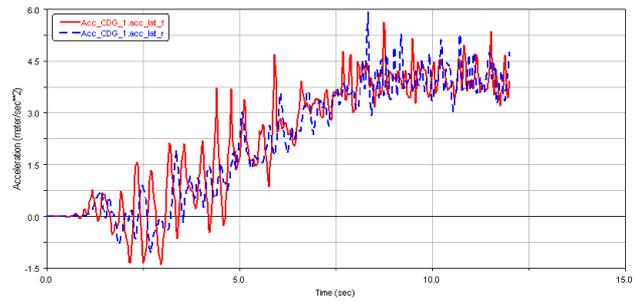


Figura 6.224. Aceleración lateral. Irreg . R = 300 m; V = 35 m/s

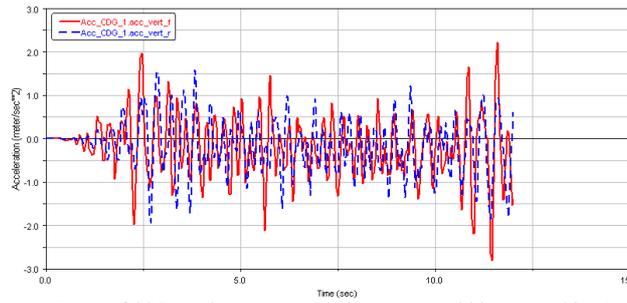


Figura 6.225. Aceleración vertical. Irreg. R = 300 m; V = 10 m/s

6.6.3 Radio de curvatura de 400 m

A continuación se exponen los resultados obtenidos para las diferentes velocidades a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto seguido consta de una curva de 400 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En las figuras 6.226, 6.227 y 6.228, puede apreciarse la presencia de grandes perturbaciones, principalmente en la aceleración longitudinal, la cual, llega a tomar un valor de -2 m/s^2 .

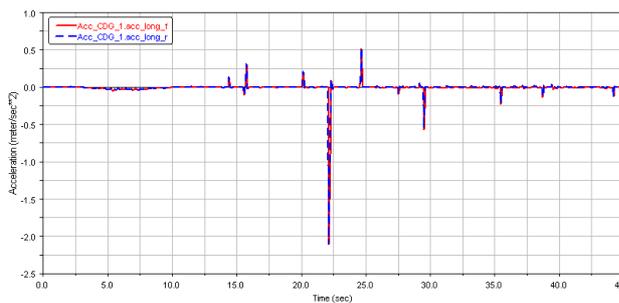


Figura 6.226. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 400 m; V = 10 m/s

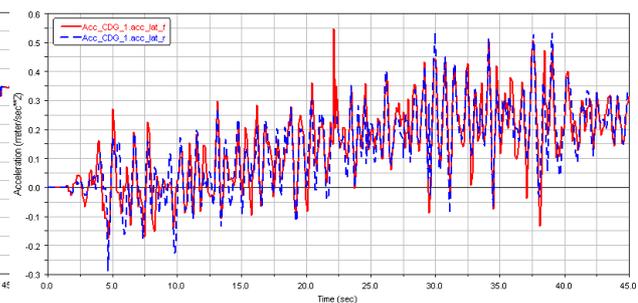


Figura 6.227. Aceleración lateral. Irreg . R = 400 m; V = 10 m/s

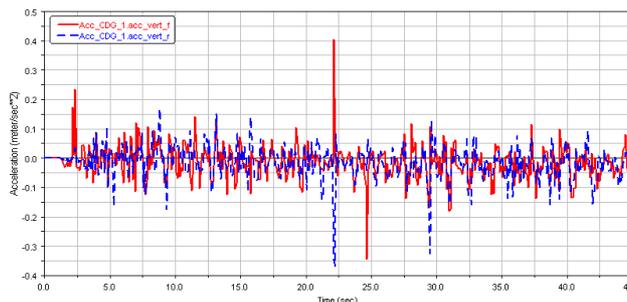


Figura 6.228. Aceleración vertical. Irreg. R = 400 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

Al igual que para la velocidad anterior, así como para los radios de curvatura anteriormente estudiados, se aprecian grandes perturbaciones aisladas en las figuras 6.229 y 6.231, mientras que en la figura 6.230 puede apreciarse un pequeño incremento de su valor.

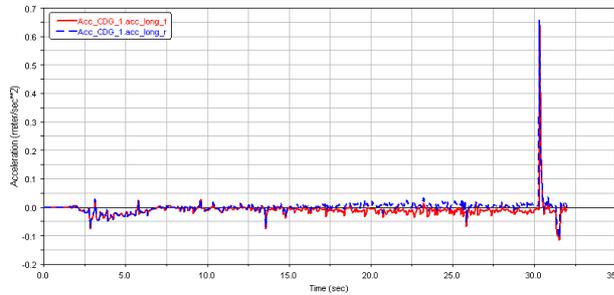


Figura 6.229. Aceleración longitudinal. Irreg. $R = 400\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

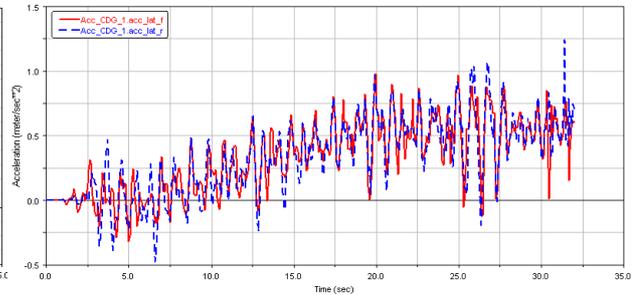


Figura 6.230. Aceleración lateral. Irreg. $R = 400\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

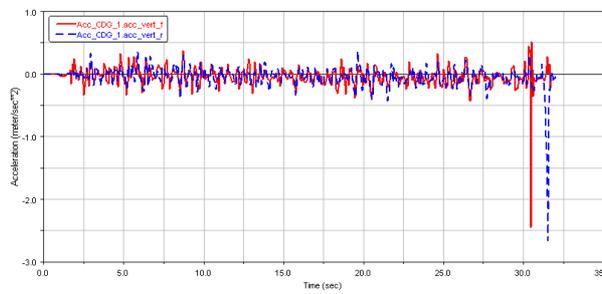


Figura 6.231. Aceleración vertical. Irreg. $R = 400\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En las figuras 6.232, 6.233 y 6.234 puede comprobarse como las aceleraciones siguen aumentando su valor a medida que aumenta la velocidad de circulación del vehículo ferroviario.

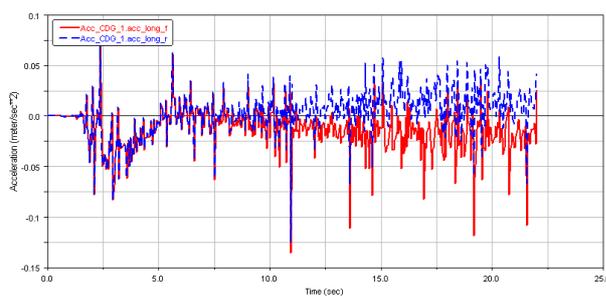


Figura 6.232. Aceleración longitudinal. Irreg. $R = 400\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

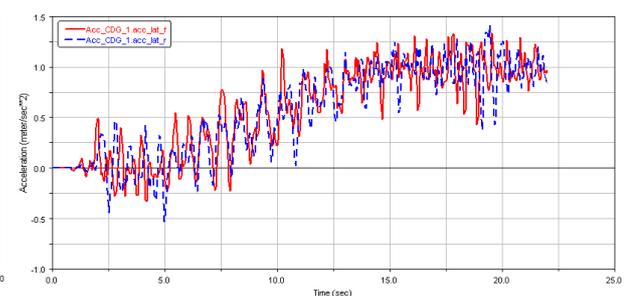


Figura 6.233. Aceleración lateral. Irreg. $R = 400\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

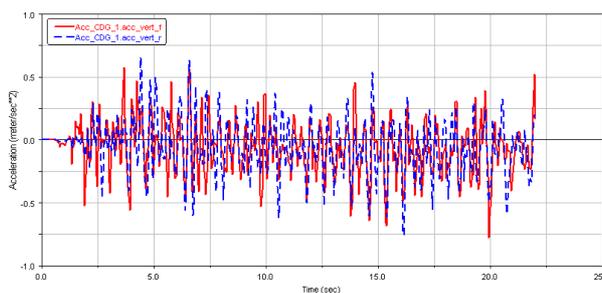


Figura 6.234. Aceleración vertical. Irreg. $R = 400\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

Debido a la presencia de las irregularidades, las aceleraciones presentan grandes desviaciones respecto a sus valores medios, como puede observarse en las figuras 6.235, 6.236 y 6.237.

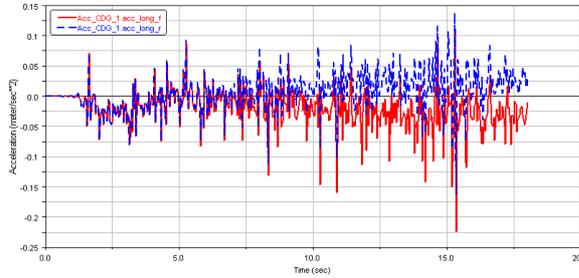


Figura 6.235. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 400 m; V = 25 m/s

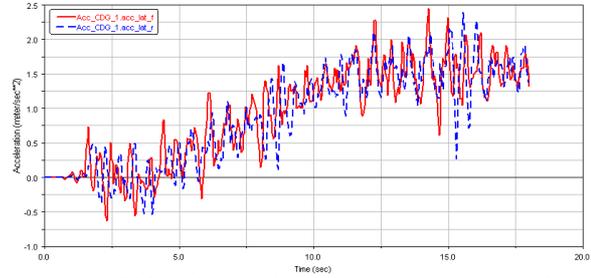


Figura 6.236. Aceleración lateral. Irreg . R = 400 m; V = 25 m/s

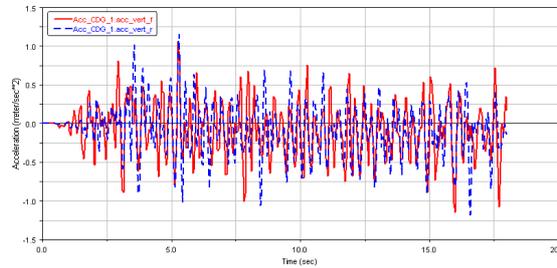


Figura 6.237. Aceleración vertical. Irreg . R = 400 m; V = 25 m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En las figuras 6.238, 6.239 y 6.240, se puede apreciar principalmente el incremento de la aceleración lateral en aproximadamente 1 m/s^2 , manteniéndose las aceleraciones longitudinales y verticales similares al caso anterior.

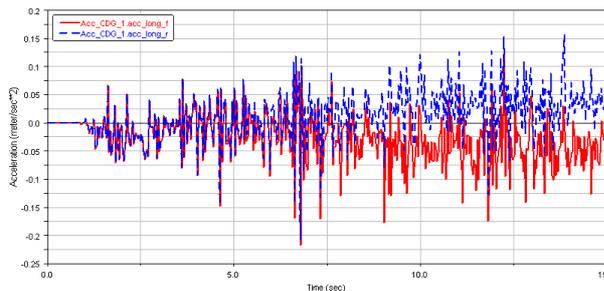


Figura 6.238. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 400 m; V = 30 m/s

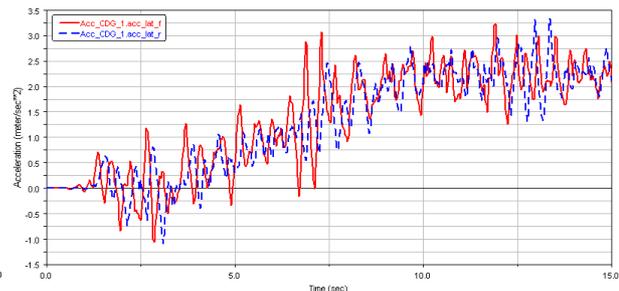


Figura 6.239. Aceleración lateral. Irreg . R = 400 m; V = 30 m/s

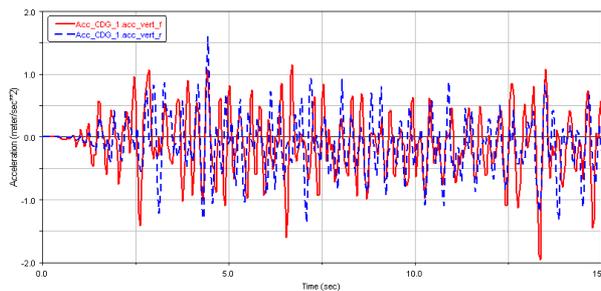


Figura 6.240. Aceleración vertical. Irreg . R = 400 m; V = 30 m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En el siguiente caso de estudio, destacan las grandes perturbaciones existentes en las figuras 6.241, 6.242 y 6.243, destacando que la aceleración vertical pasa de un valor de -3 m/s^2 a 2 m/s^2 en apenas unas decimas de segundo.

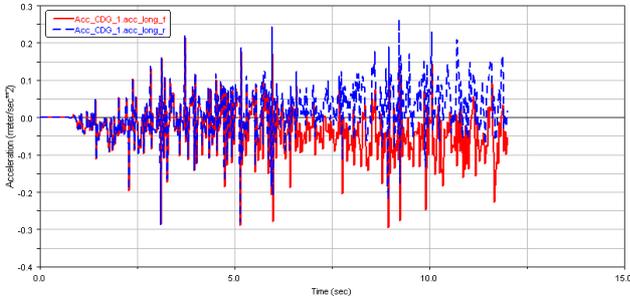


Figura 6.241. Aceleración longitudinal. Irreg . $R = 400 \text{ m}$; $V = 35 \text{ m/s}$

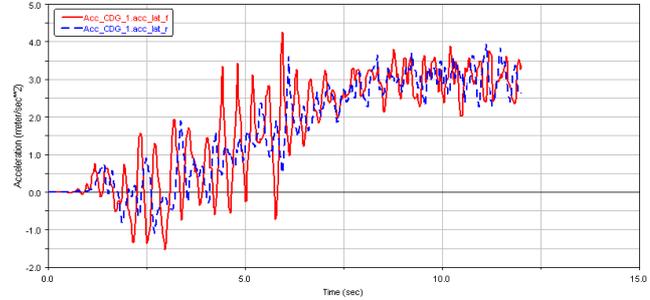


Figura 6.242. Aceleración lateral. Irreg . $R = 400 \text{ m}$; $V = 35 \text{ m/s}$

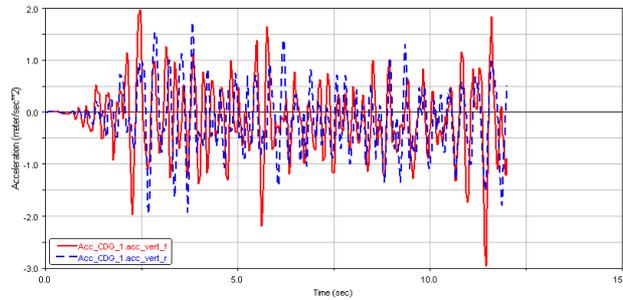


Figura 6.243. Aceleración vertical. Irreg. $R = 400 \text{ m}$; $V = 35 \text{ m/s}$

6.6.4 Radio de curvatura de 500 m

A continuación se exponen los resultados obtenidos para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto seguido consta de una curva de 500 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

Debido al aumento del radio de curvatura, con respecto a las simulaciones anteriores, así como a la baja velocidad estudiada, se obtienen en las graficas 6.244, 6.245 y 6.246 valores en las aceleraciones bastante pequeños, pudiendo suponer de manera inicial un buen confort en el vehículo.

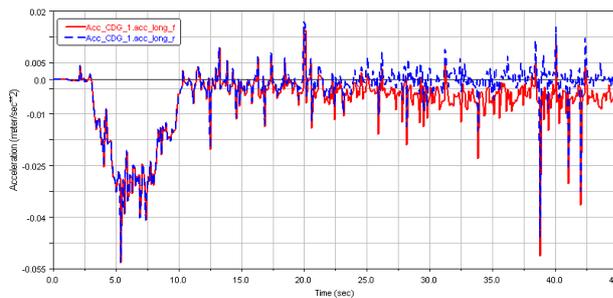


Figura 6.244. Aceleración longitudinal. Irreg . $R = 500 \text{ m}$; $V = 10 \text{ m/s}$

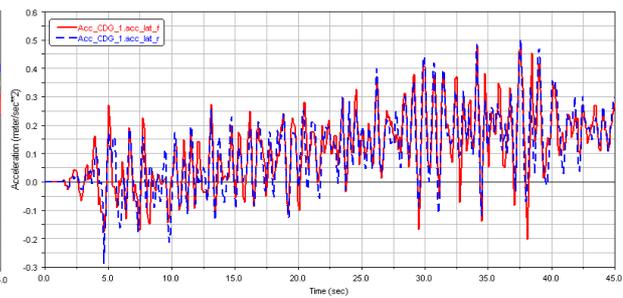


Figura 6.245. Aceleración lateral. Irreg . $R = 500 \text{ m}$; $V = 10 \text{ m/s}$

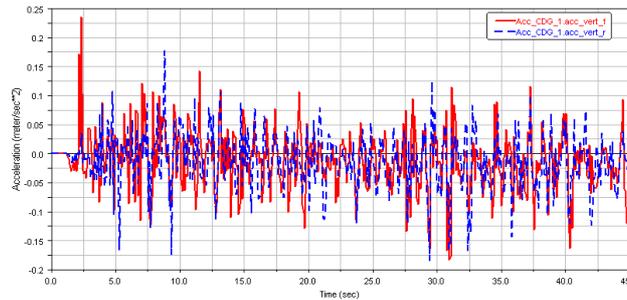


Figura 6.246. Aceleración vertical. Irreg. $R = 500\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

Al igual que en los radios de curvatura antes estudiados para una velocidad de 15 m/s, se obtienen unas grandes perturbaciones al final de la simulación, principalmente en las figuras 6.247 y 6.249, por otro lado mediante la figura 6.248, puede apreciarse un incremento de la aceleración debido al aumento de la velocidad.

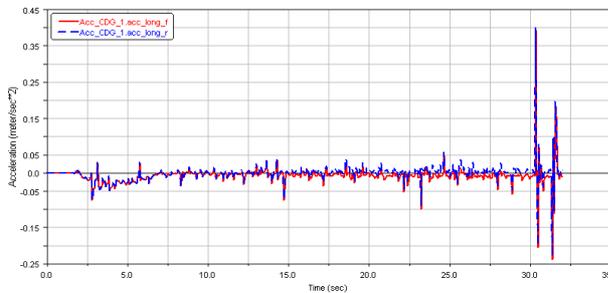


Figura 6.247. Aceleración longitudinal. Irreg. $R = 500\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

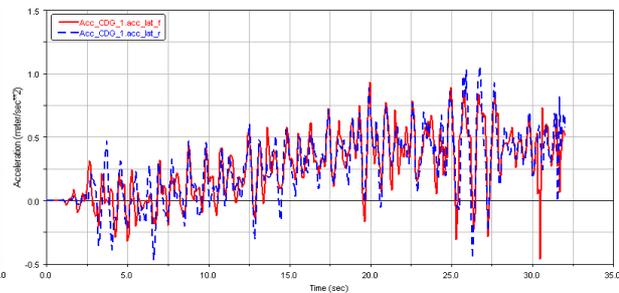


Figura 6.248. Aceleración lateral. Irreg. $R = 500\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

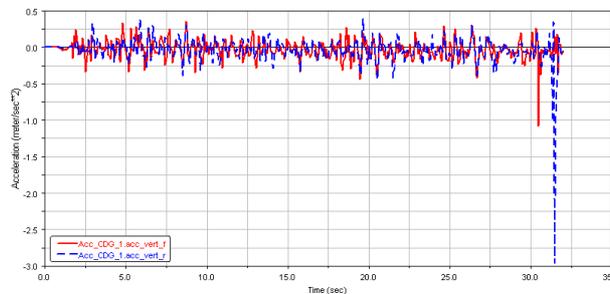


Figura 6.249. Aceleración vertical. Irreg. $R = 500\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En las figuras 6.250, 6.252 y 6.252, puede verse un aumento en las oscilaciones presentes, así como un incremento del valor de dichas aceleraciones.

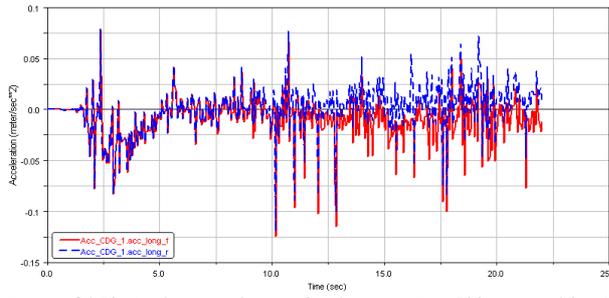


Figura 6.250. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 500 m; V = 20 m/s

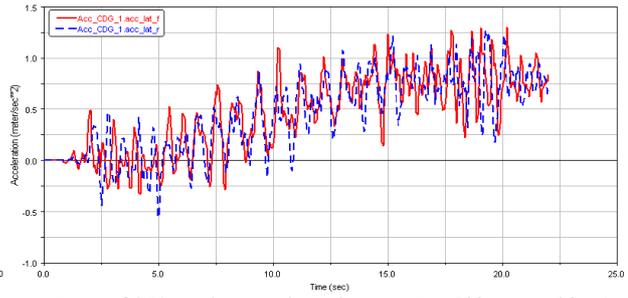


Figura 6.251. Aceleración lateral. Irreg . R = 500 m; V = 20 m/s

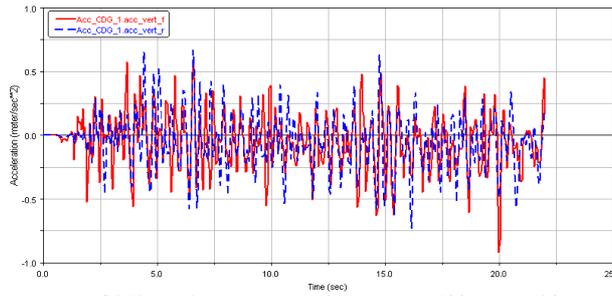


Figura 6.252. Aceleración vertical. Irreg . R = 500 m; V = 20 m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

El aumento de la velocidad, repercute en las figuras 6.253, 6.254 y 6.255, aumentando sus valores con respecto a los casos anteriores, destacando el mayor incremento producido en la aceleración lateral debido al trazado de la curva.

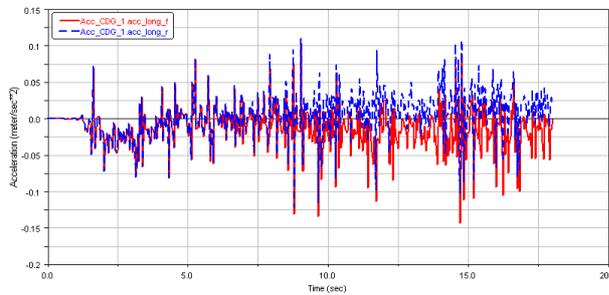


Figura 6.253. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 500 m; V = 25 m/s

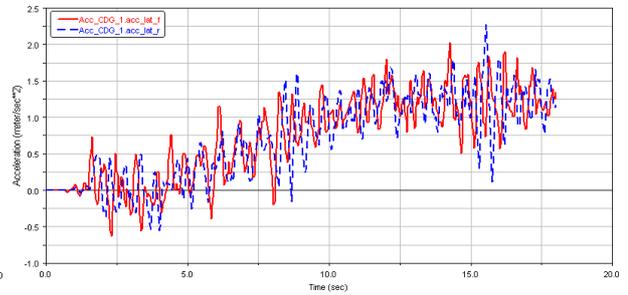


Figura 6.254. Aceleración lateral. Irreg . R = 500 m; V = 25 m/s

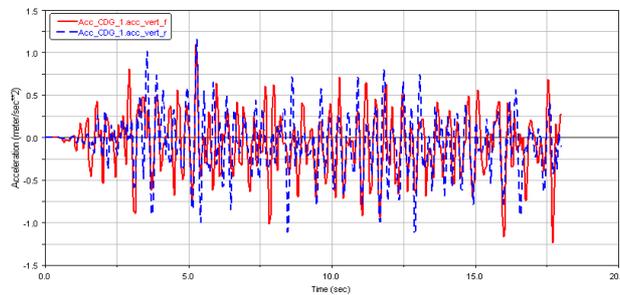


Figura 6.255. Aceleración vertical. Irreg . R = 500 m; V = 25 m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En las figuras 6.256, 6.257 y 6.258 puede apreciarse un aumento de sus valores, principalmente debido al aumento de la amplitud de las oscilaciones.

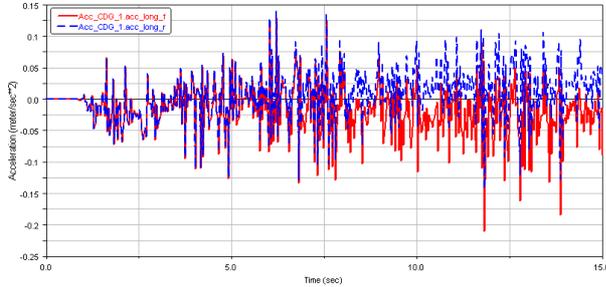


Figura 6.256. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 500 m; V = 30 m/s

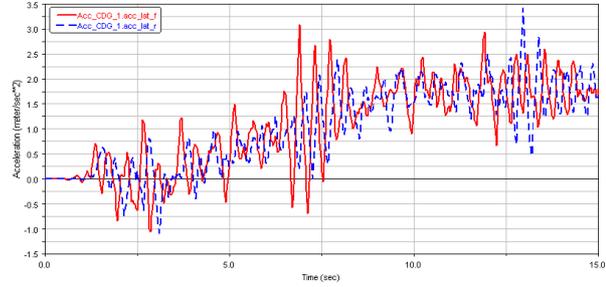


Figura 6.257. Aceleración lateral. Irreg . R = 500 m; V = 30 m/s

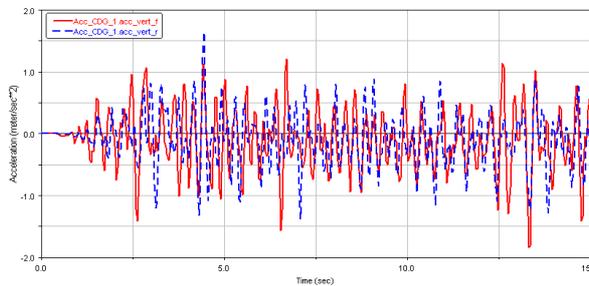


Figura 6.258. Aceleración vertical. Irreg . R = 500 m; V = 30 m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En las figuras 6.259, 6.260 y 6.261 puede verse como su valor se ha ido incrementando con respecto a simulaciones anteriores, pero destacando que el incremento de las mismas va disminuyendo a medida que se aumenta el radio de curvatura.

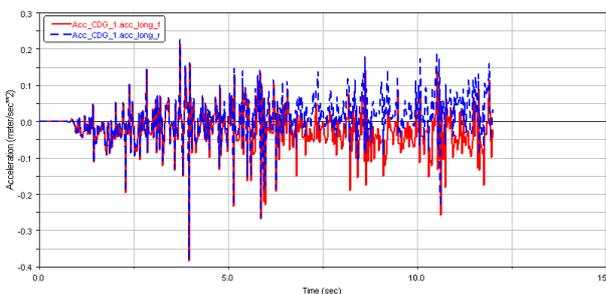


Figura 6.259. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 500 m; V = 35 m/s

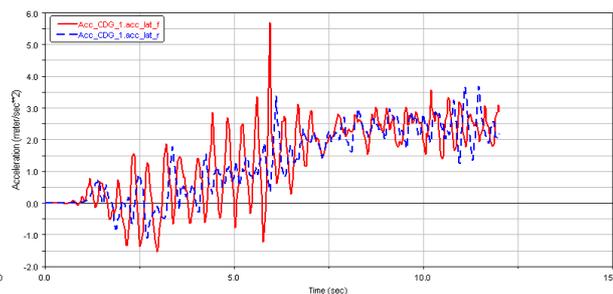


Figura 6.260. Aceleración lateral. Irreg . R = 500 m; V = 35 m/s

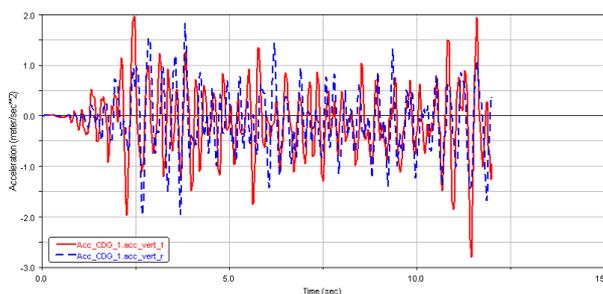


Figura 6.261. Aceleración vertical. Irreg . R = 500 m; V = 35 m/s

6.6.5 Radio de curvatura de 600 m

A continuación se exponen los resultados obtenidos para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto seguido consta de una curva de 600 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En las figuras 6.262, 6.263 y 6.264 puede apreciarse como las aceleraciones van disminuyendo a medida que aumenta el radio de curvatura.

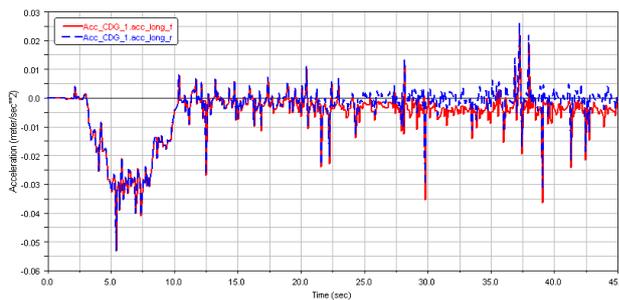


Figura 6.262. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 600 m; V = 10 m/s

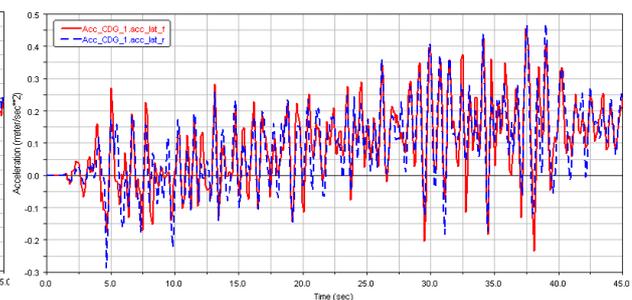


Figura 6.263. Aceleración lateral. Irreg . R = 600 m; V = 10 m/s

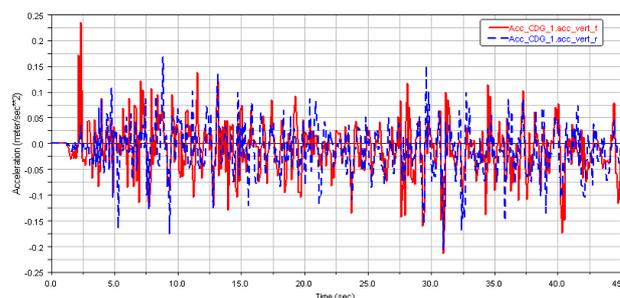


Figura 6.264. Aceleración vertical. Irreg. R = 600 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En las figuras 6.265, 6.266 y 6.267, se aprecia, al igual que en radios de curvatura anteriores la presencia de grandes perturbaciones al final de la simulación, pudiendo ser causa de las irregularidades presentes en dicho punto, o debido al propio proceso de simulación.

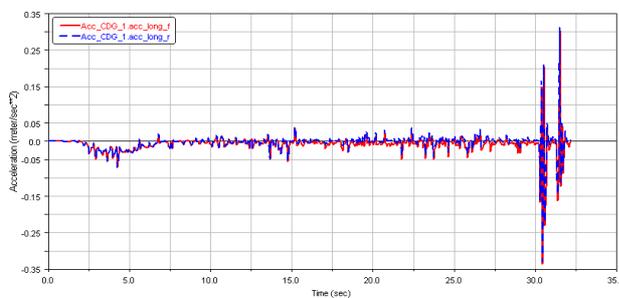


Figura 6.265. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 600 m; V = 15 m/s

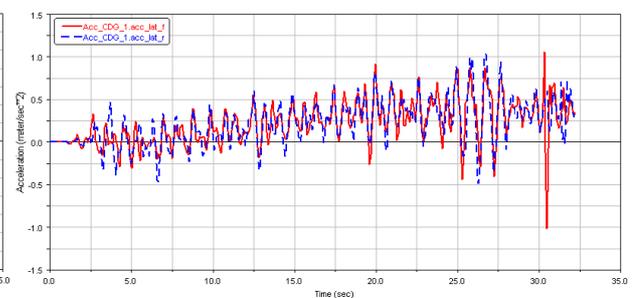


Figura 6.266. Aceleración lateral. Irreg . R = 600 m; V = 15 m/s

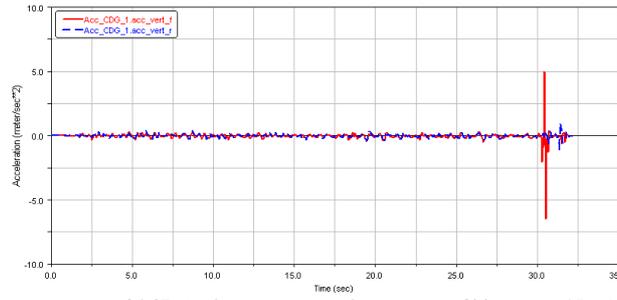


Figura 6.267. Aceleración vertical. Irreg. R = 600 m; V = 15 m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En las figuras 6.268, 6.269 y 6.270, el aumento de la velocidad en 5 m/s ha provocado la disminución de las oscilaciones aisladas de gran valor, este hecho permite obtener unos índices de confort acordes a lo esperado, ya que dichas oscilaciones pueden perturbar los valores calculados.

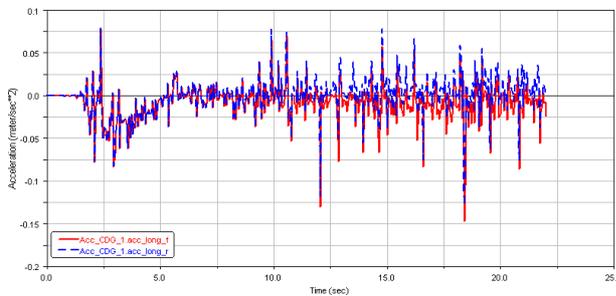


Figura 6.268. Aceleración longitudinal. Irreg. R = 600 m; V = 20 m/s

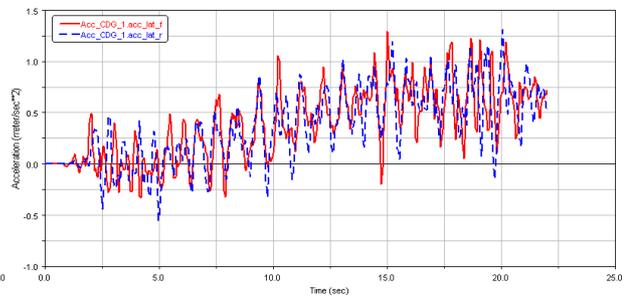


Figura 6.269. Aceleración lateral. Irreg. R = 600 m; V = 20 m/s

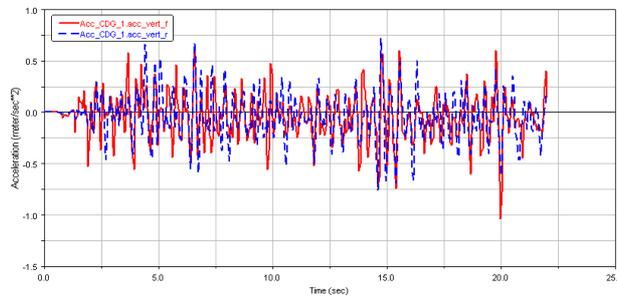


Figura 6.270. Aceleración vertical. Irreg. R = 600 m; V = 20 m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

Aunque el tramo durante el cual la aceleración es constante ha incrementado en menor medida su valor, respecto al estudio anterior; las grandes oscilaciones presentes, hacen que de manera puntual las aceleraciones se incrementen en mayor medida, tal como puede verse en las figuras 6.271, 6.272 y 6.273.

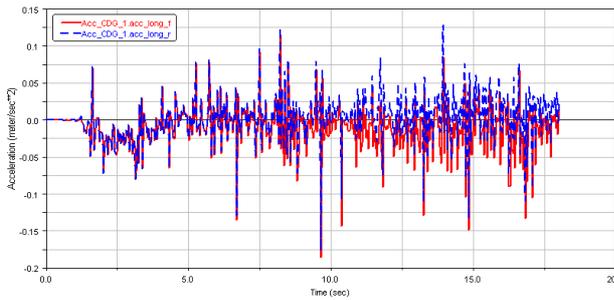


Figura 6.271. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 600 m; V = 25 m/s

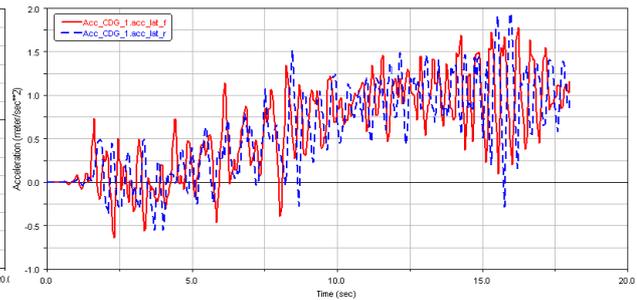


Figura 6.272. Aceleración lateral. Irreg . R = 600 m; V = 25 m/s

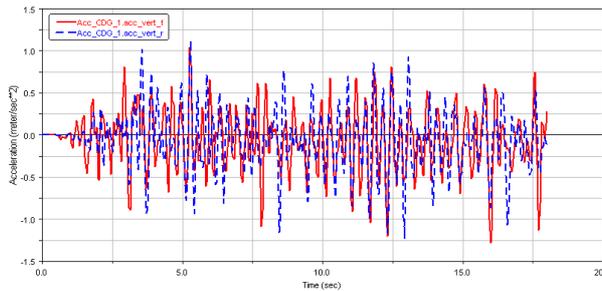


Figura 6.273. Aceleración vertical. Irreg. R = 600 m; V = 25 m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

El aumento de la velocidad en 5 m/s ha proporcionado un aumento considerable en las aceleraciones, principalmente en la lateral, como puede verse en las figuras 6.274, 6.275 y 6.276.

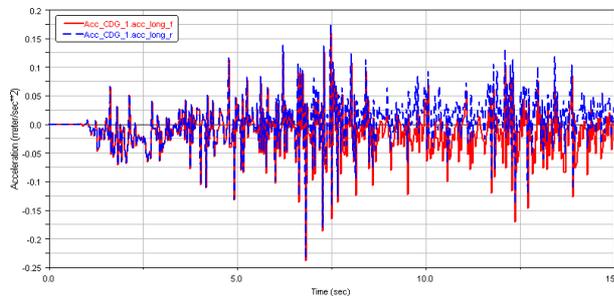


Figura 6.274. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 600 m; V = 30 m/s

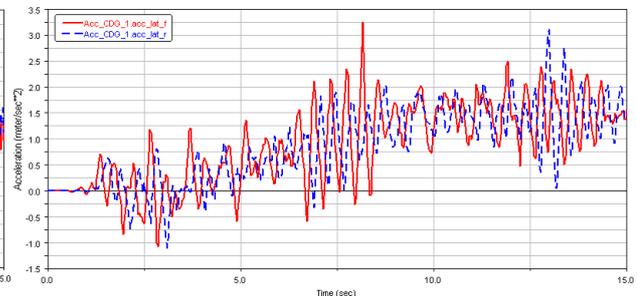


Figura 6.275. Aceleración lateral. Irreg . R = 600 m; V = 30 m/s

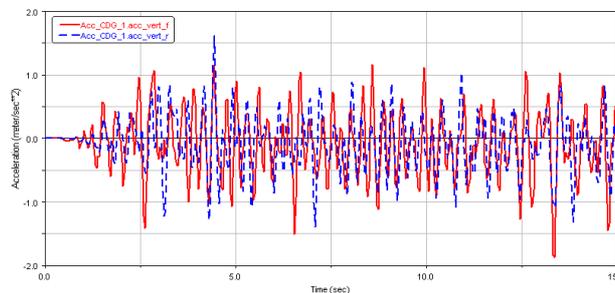


Figura 6.276. Aceleración vertical. Irreg. R = 600 m; V = 30 m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En las figuras 6.277, 6.278 y 6.279, se aprecia como para un tiempo de simulación de aproximadamente 6 segundos, existe un incremento de las oscilaciones, presentes principalmente en las aceleraciones longitudinales y

laterales, pudiendo provocar que los índices de confort obtenidos posteriormente sean erróneos.

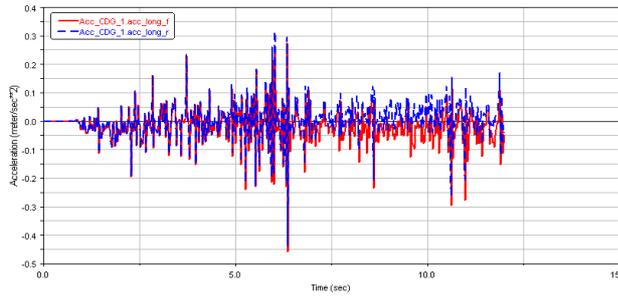


Figura 6.277. Aceleración longitudinal. Irreg . R = 600 m; V = 35 m/s

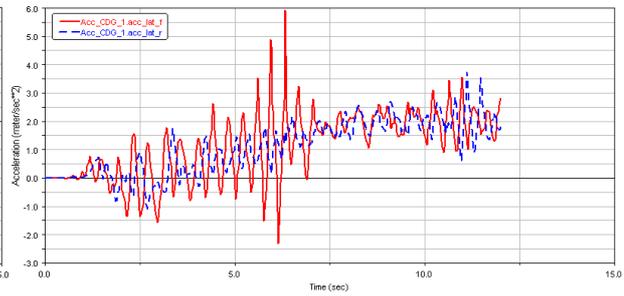


Figura 6.278. Aceleración lateral. Irreg . R = 600 m; V = 35 m/s

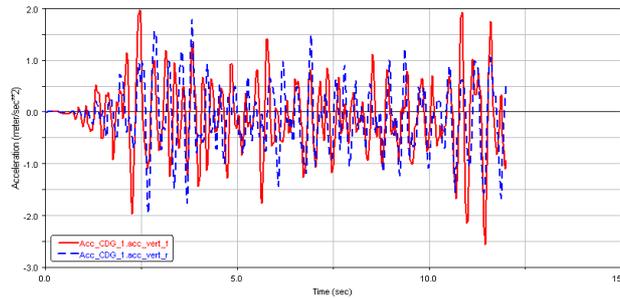


Figura 6.279. Aceleración vertical. Irreg. R = 600 m; V = 35 m/s

6.7 Estudio del confort según UIC 513

Calculadas las aceleraciones longitudinales, laterales y verticales en los diferentes casos, Adams/Rail te permite realizar un estudio del confort del modelo.

En las siguientes graficas se representan los percentiles 95 de las aceleraciones para los valores r.m.s tomados en intervalos de 5 segundos. Como los trayectos a estudio tienen la misma longitud, según se vaya aumentando la velocidad, el número de intervalos para obtener el índice de confort va disminuyendo, pudiendo disminuir la fiabilidad de los datos obtenidos.

6.7.1 En ausencia de irregularidades

A continuación se calculan los índices de confort sin tener en cuenta la presencia de las irregularidades, es decir, se considera el carril como ideal.

6.7.1.1 Radio de curvatura de 200 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto ideal consta de una curva de 200 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,411$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.280.

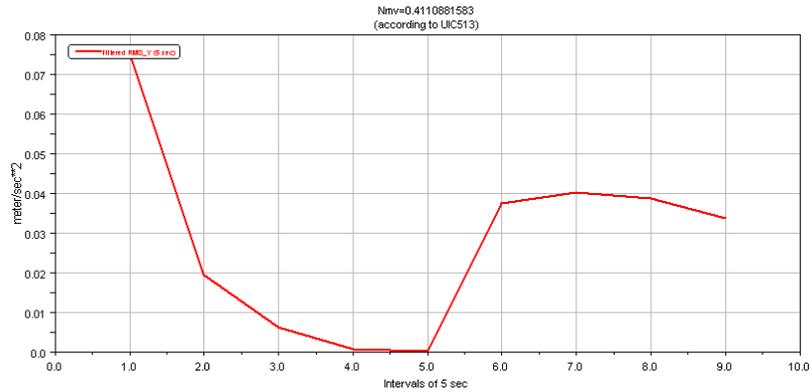


Figura 6.280. $N_{MVfront}$. $R = 200\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,432$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.281.

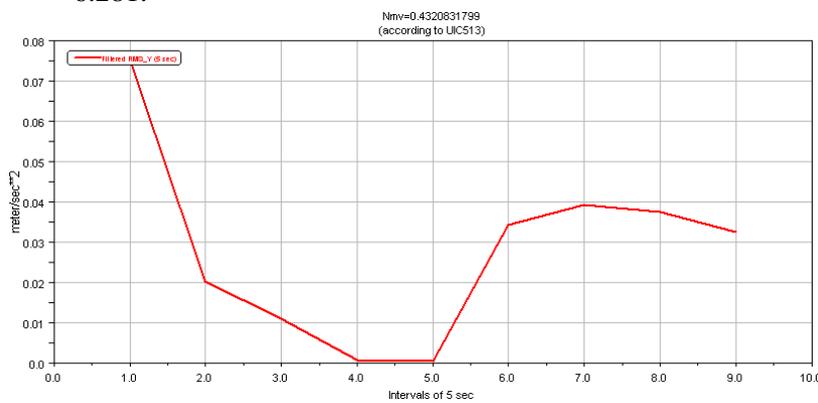


Figura 6.281. N_{MVrear} . $R = 200\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,823$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.282.

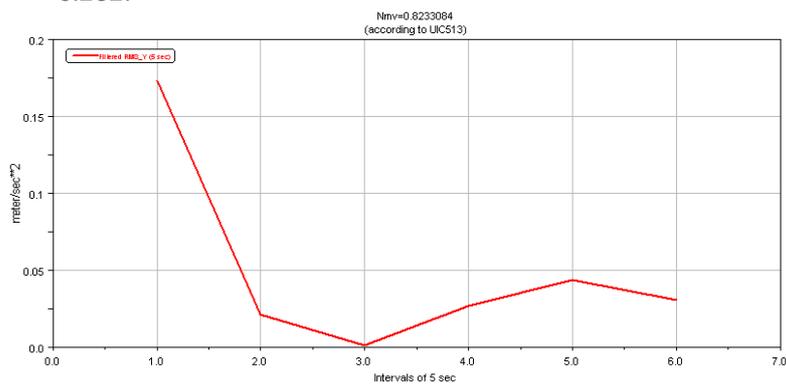


Figura 6.282. $N_{MVfront}$. $R = 200\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,828$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.283. Cabe destacar la diferencia en el índice de confort dependiendo del modulo del vagón a ensayar.

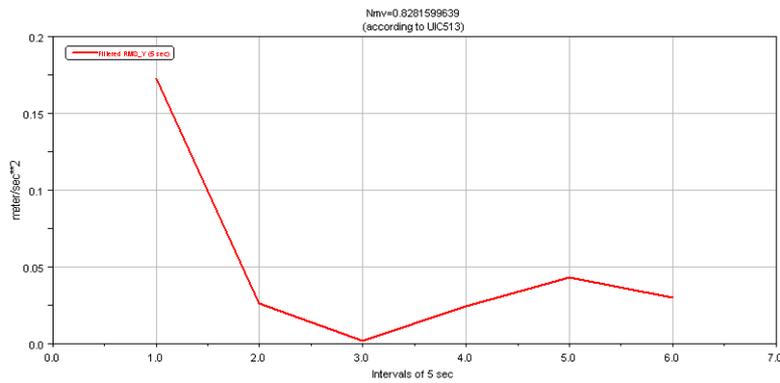


Figura 6.283. N_{MVrear} . $R = 200$ m; $V = 15$ m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 1,632$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.284. Destacando el aumento considerable del índice de confort respecto a la velocidad anterior.

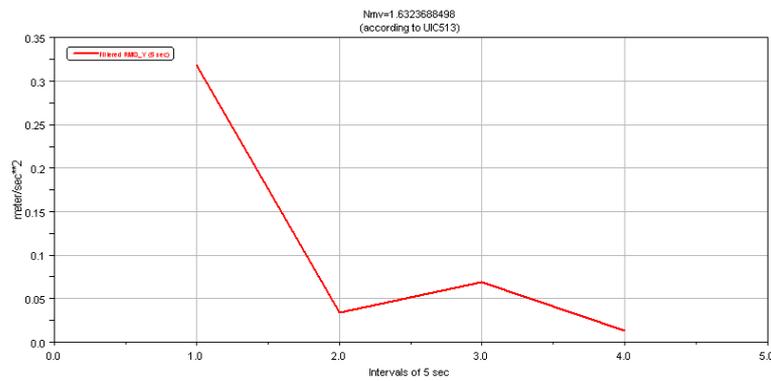


Figura 6.284. $N_{MVfront}$. $R = 200$ m; $V = 20$ m/s

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 1,63$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.285.

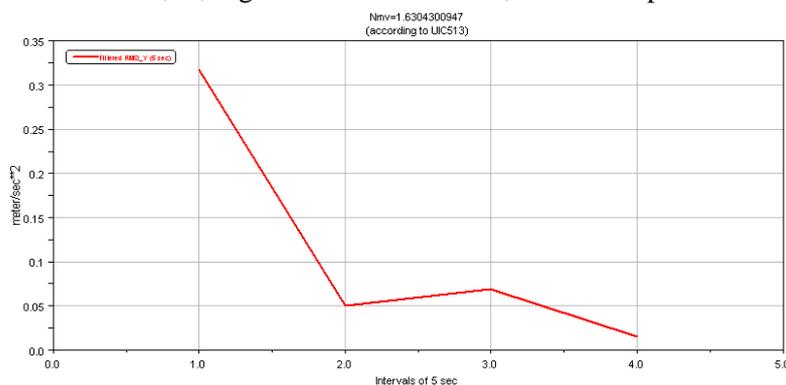


Figura 6.285. N_{MVrear} . $R = 200$ m; $V = 20$ m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 2,675$, alterando el nivel de confort del vehículo, como se representa en la figura 6.286.

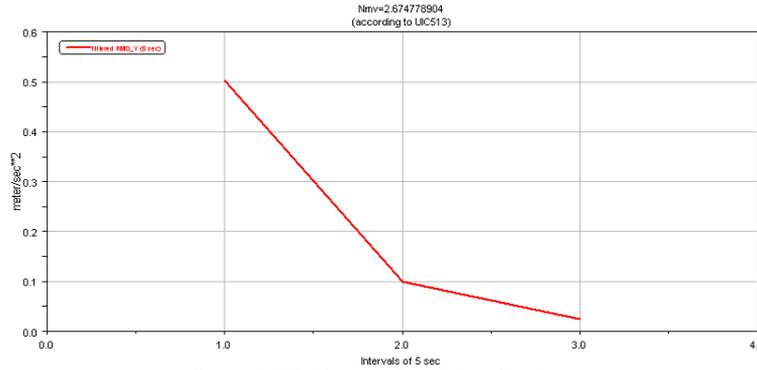


Figura 6.286. NMV_{front} . $R = 200\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 2,694$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.287.

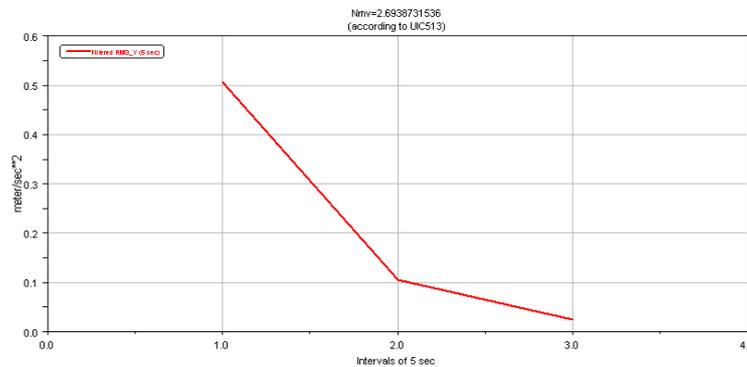


Figura 6.287. NMV_{rear} . $R = 200\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 3,879$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.288.

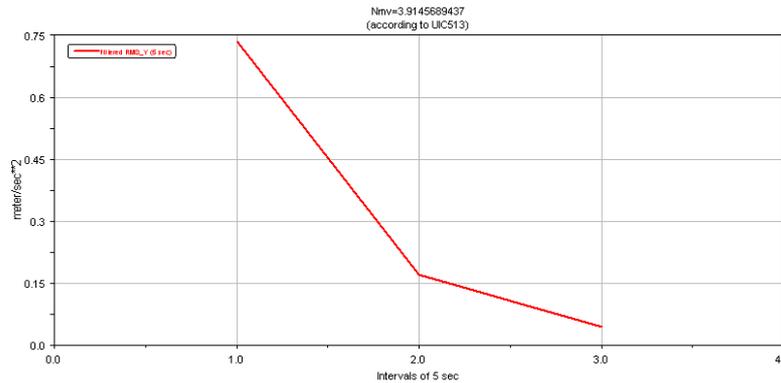


Figura 6.288. NMV_{front} . $R = 200\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 3,915$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.289.

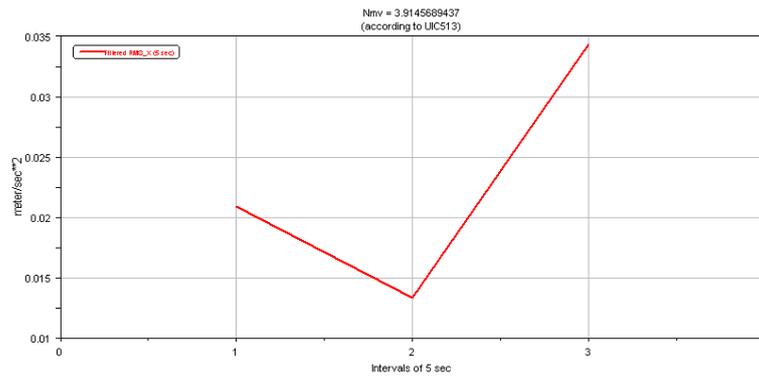


Figura 6.289. NMV_{rear} . $R = 200\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Debido a los resultados obtenidos en las aceleraciones, es innecesario calcular el índice de confort en este caso. Como en este caso se produce el descarrilamiento del vehículo, los valores obtenidos están influenciados por las grandes aceleraciones ocasionadas durante el descarrilamiento del mismo.

6.7.1.2 Radio de curvatura de 300 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto ideal consta de una curva de 300 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,226$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.290. Puede comprobarse la disminución del índice según va aumentando el radio de la curva, debido a la disminución de las aceleraciones.

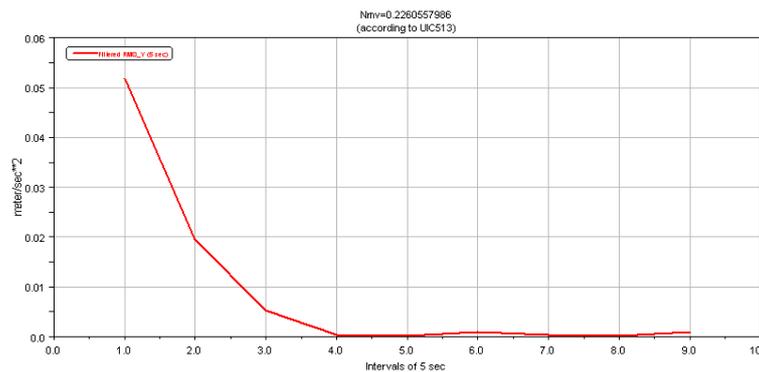


Figura 6.290. NMV_{front} . $R = 300\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,228$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.291.

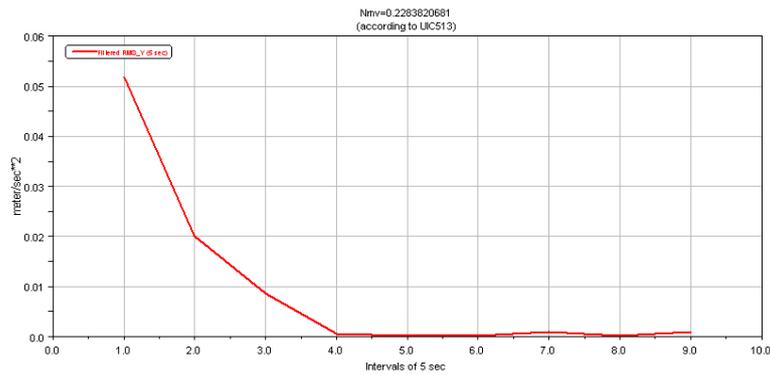


Figura 6.291. NMVrear. R = 300 m; V = 10 m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de Nm_v = 0,527, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.292.

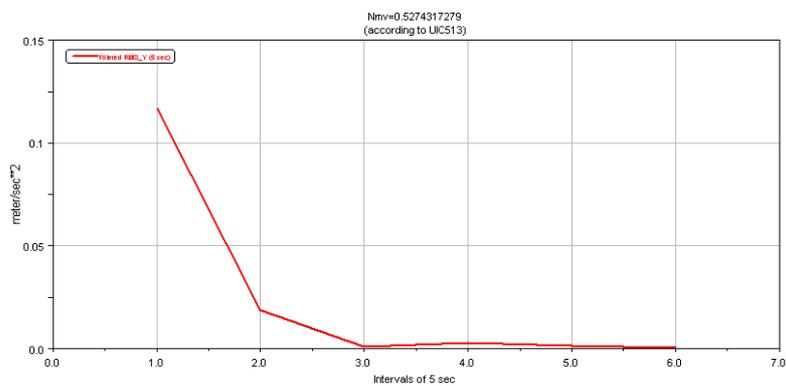


Figura 6.292. NMVfront. R = 300 m; V = 15 m/s

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de Nm_v = 0,531, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.293.

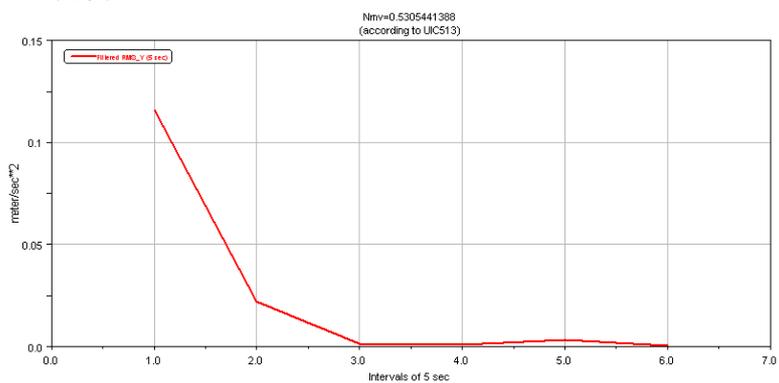


Figura 6.293. NMVrear. R = 300 m; V = 15 m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de Nm_v = 1,155, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.294.

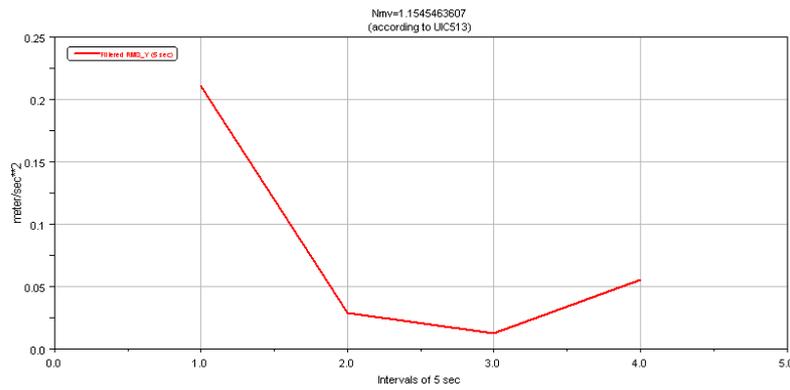


Figura 6.294. NMV_{front} . $R = 300\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,166$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.295.

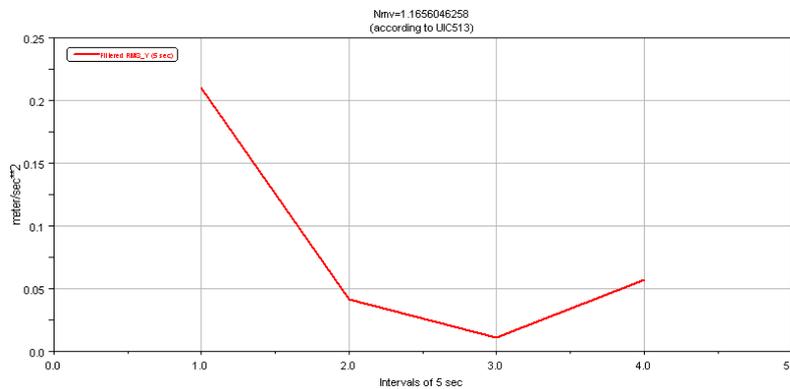


Figura 6.295. NMV_{rear} . $R = 300\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,829$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.296.

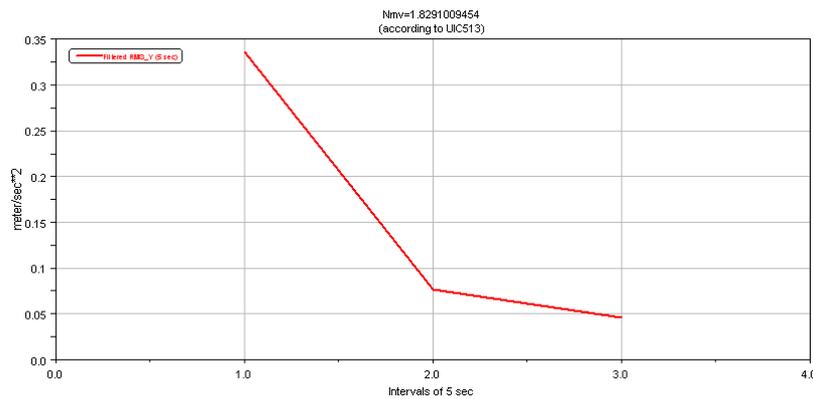


Figura 6.296. NMV_{front} . $R = 300\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,864$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.297.

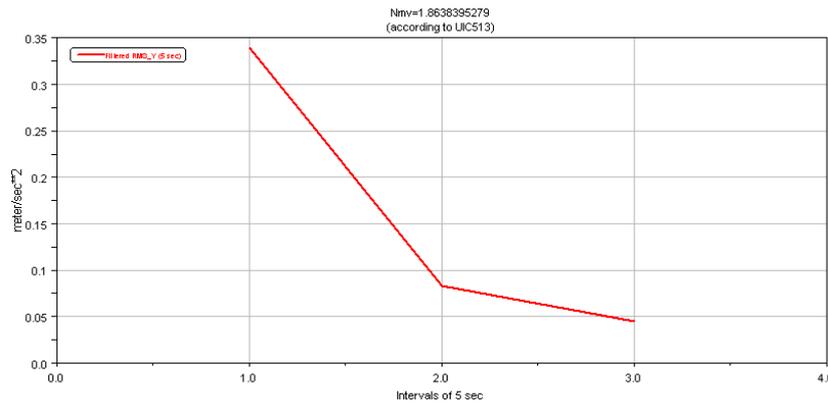


Figura 6.297. NMVrear. R = 300 m; V = 25 m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de Nm_v = 2,636, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.298. Destacando el aumento en más de un punto respecto a la velocidad anterior.

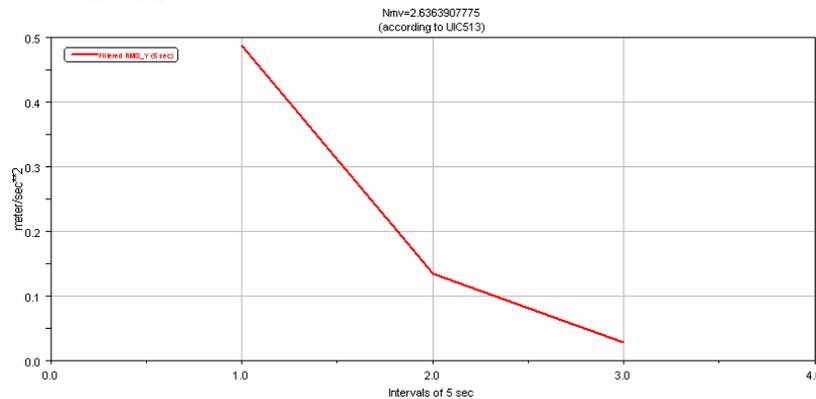


Figura 6.298. NMVfront. R = 300 m; V = 30 m/s

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de Nm_v = 2,673, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.299.

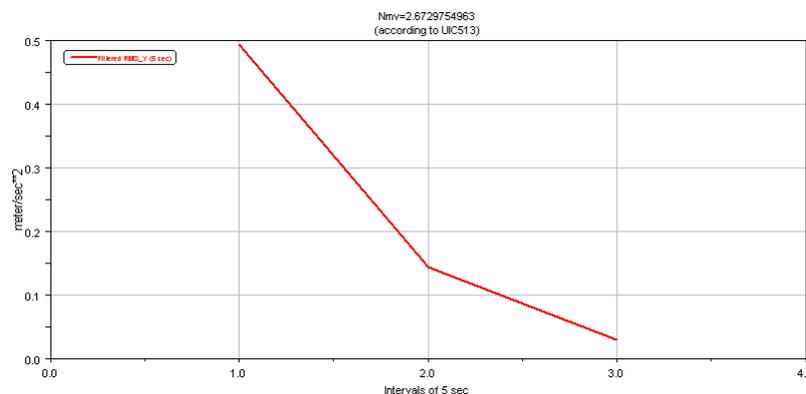


Figura 6.299. NMVrear. R = 300 m; V = 30 m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de Nm_v = 3,753, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.300.

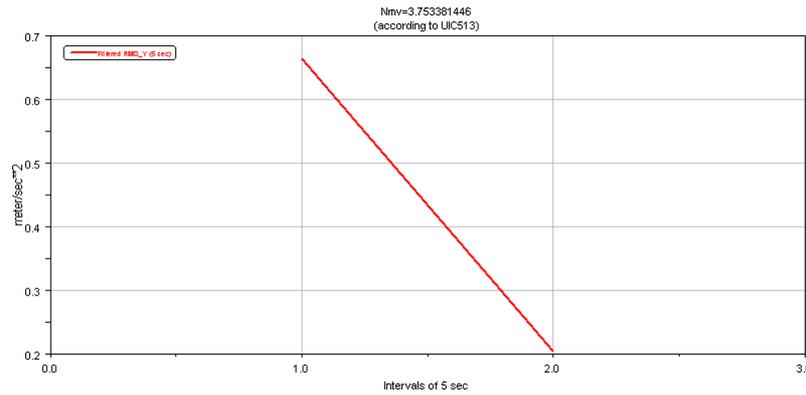


Figura 6.300. NMV_{front} . $R = 300\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 3.806$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 5.295.

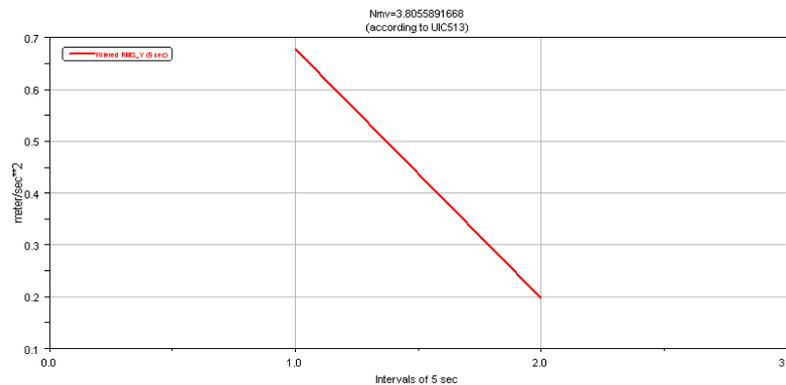


Figura 6.301. NMV_{rear} . $R = 300\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

6.7.1.3 Radio de curvatura de 400 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto ideal consta de una curva de 400 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,189$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.302. Pudiendo destacar la disminución del mismo a medida que vamos aumentado el radio de curvatura.

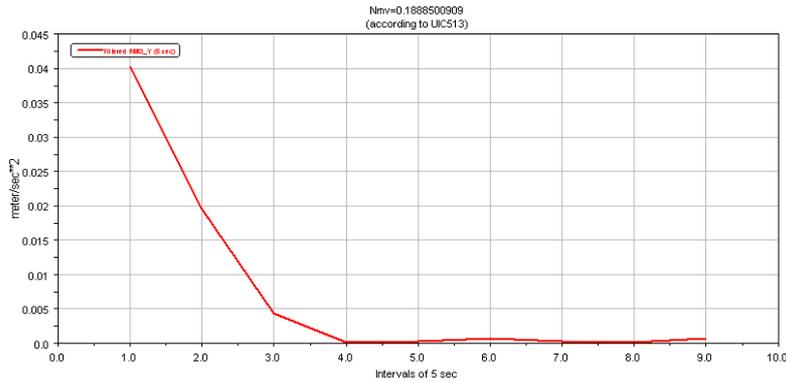


Figura 6.302. NMV_{front} . $R = 400\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,191$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.303.

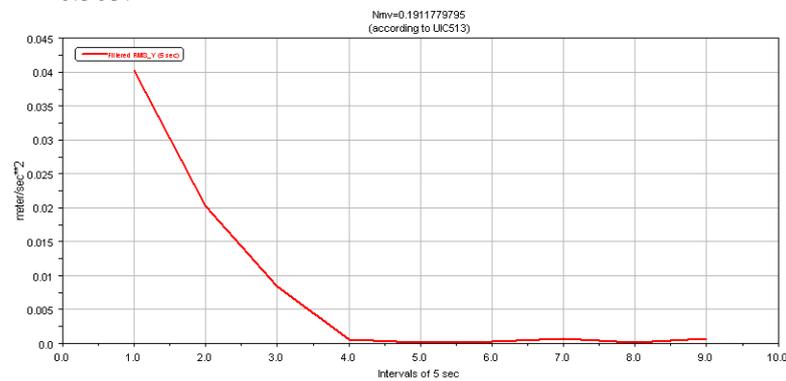


Figura 6.303. NMV_{rear} . $R = 400\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,417$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.304.

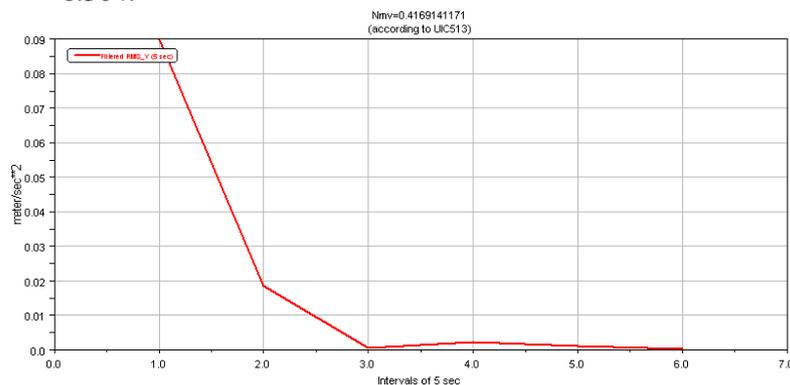


Figura 6.304. NMV_{front} . $R = 400\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,414$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.305.

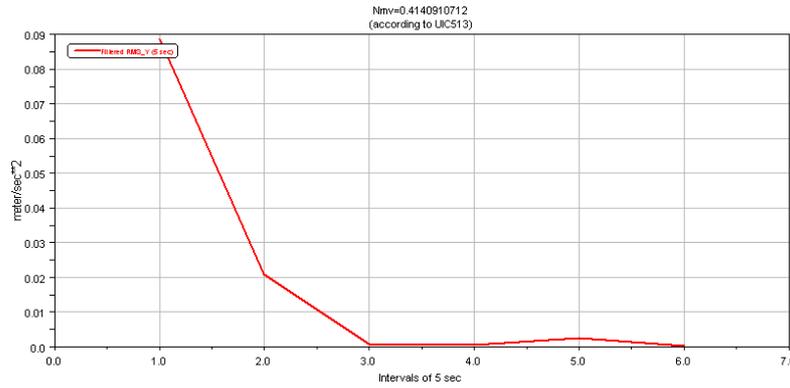


Figura 6.305. NMV_{rear} . $R = 400\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,861$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.306.

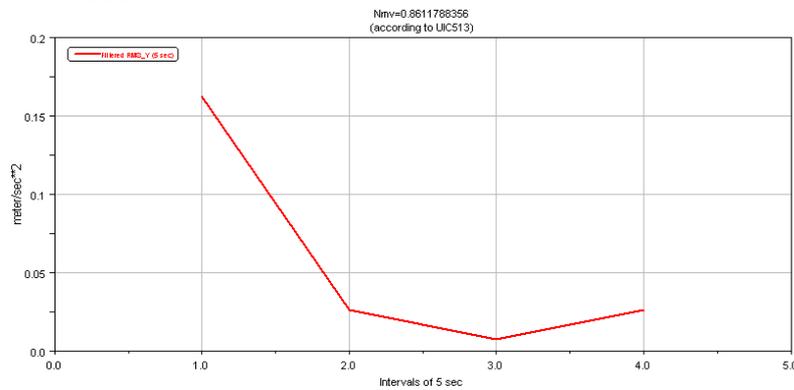


Figura 6.306. NMV_{front} . $R = 400\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,866$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.307.

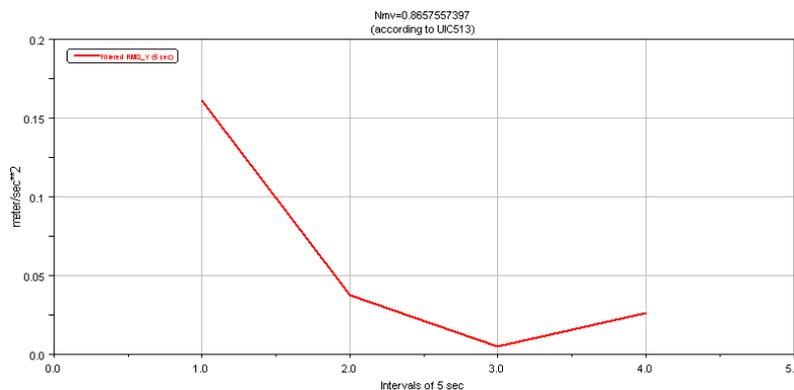


Figura 6.307. NMV_{rear} . $R = 400\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,477$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.308. Este aumento en el índice de confort supone un cambio en la descripción del comportamiento del vehículo.

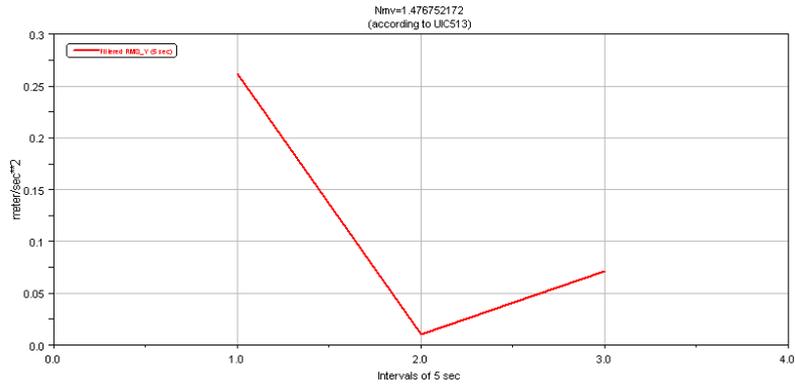


Figura 6.308. NMV_{front} . $R = 400\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,494$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.309.

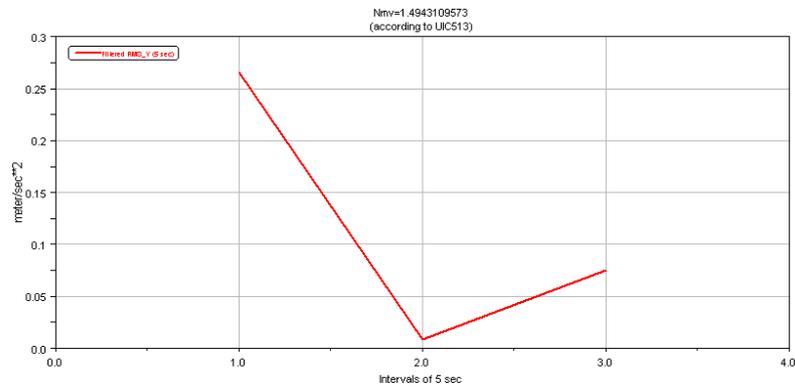


Figura 6.309. NMV_{rear} . $R = 400\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 2,055$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.310.

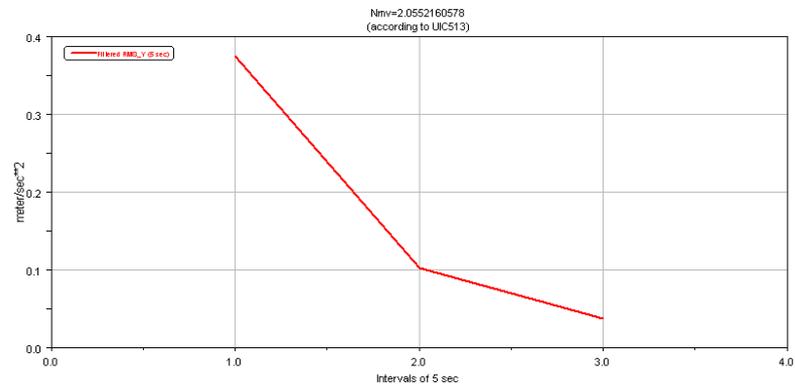


Figura 6.310. NMV_{front} . $R = 400\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 2,117$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.311.

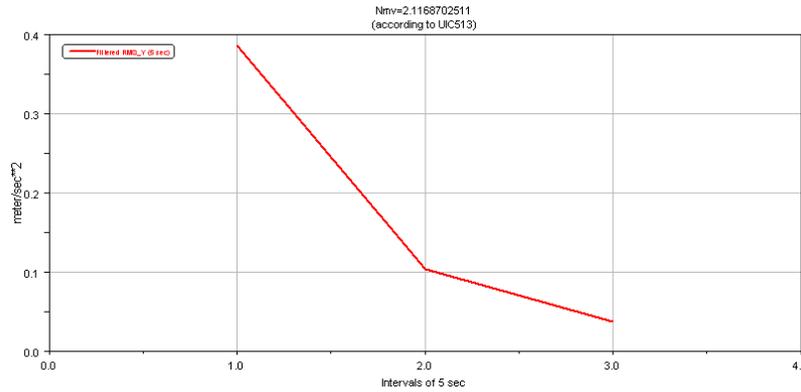


Figura 6.311. NMVrear. R = 400 m; V = 30 m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de Nm_v = 2,911, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.312.

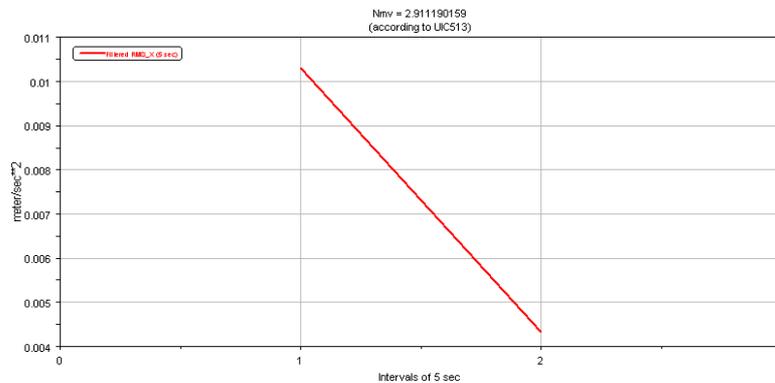


Figura 6.312. NMVfront. R = 400 m; V = 35 m/s

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de Nm_v = 2,981, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.313.

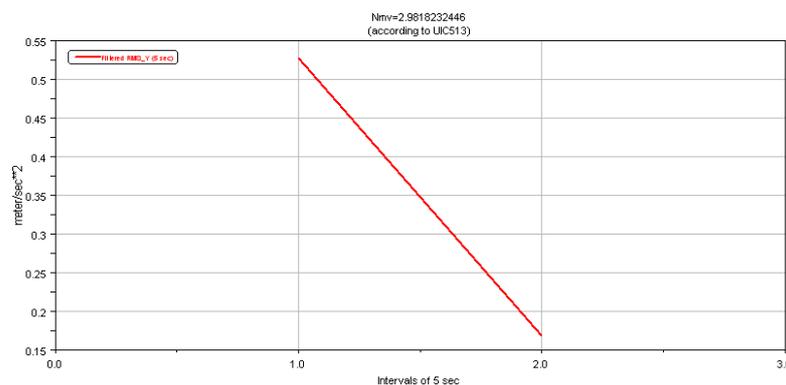


Figura 6.313. NMVrear. R = 400 m; V = 35 m/s

6.7.1.4 Radio de curvatura de 500 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto ideal consta de una curva de 500 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,167$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.314.

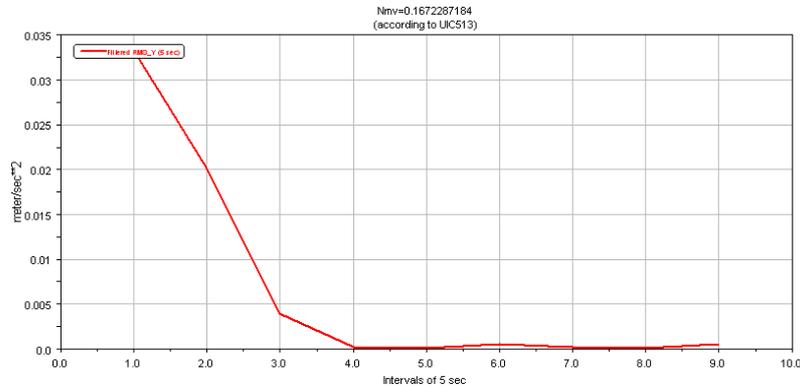


Figura 6.314. $N_{MVfront}$. $R = 500\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,169$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.315.

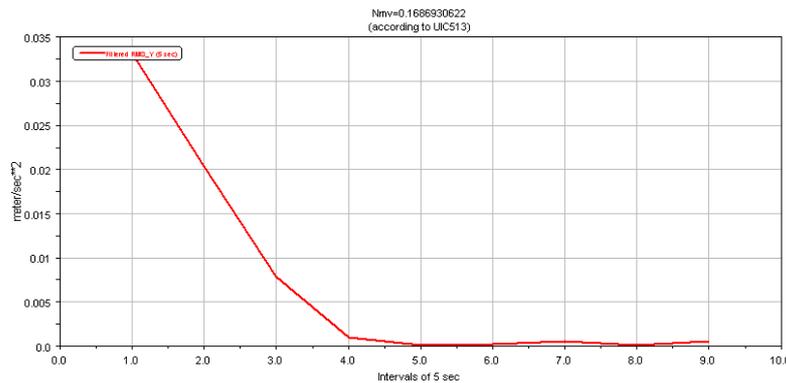


Figura 6.315. N_{MVrear} . $R = 500\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,347$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.316.

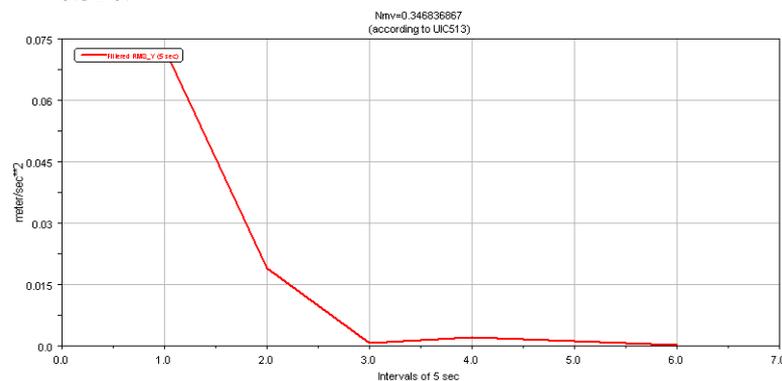


Figura 6.316. $N_{MVfront}$. $R = 500\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,341$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.317.

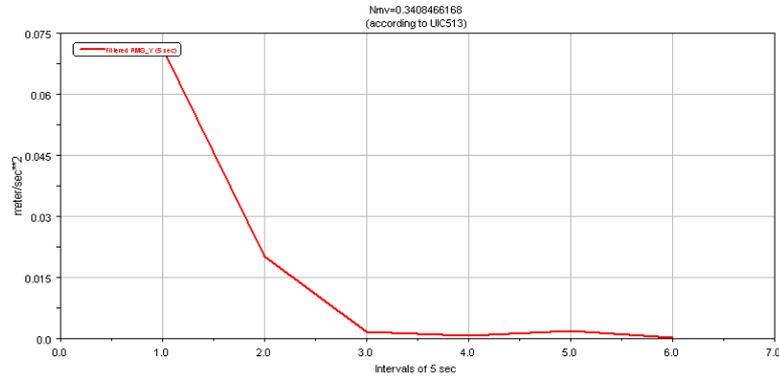


Figura 6.317. N_{MVrear} . $R = 500$ m; $V = 15$ m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,674$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.318.

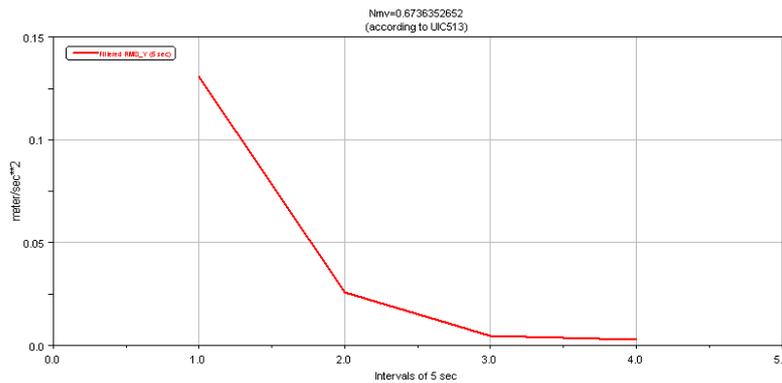


Figura 6.318. $N_{MVfront}$. $R = 500$ m; $V = 20$ m/s

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,676$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.319.

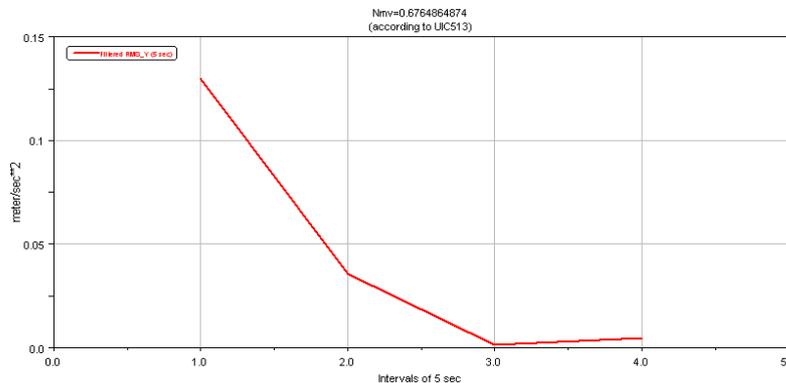


Figura 6.319. N_{MVrear} . $R = 500$ m; $V = 20$ m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

Para el módulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 1,161$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.320.

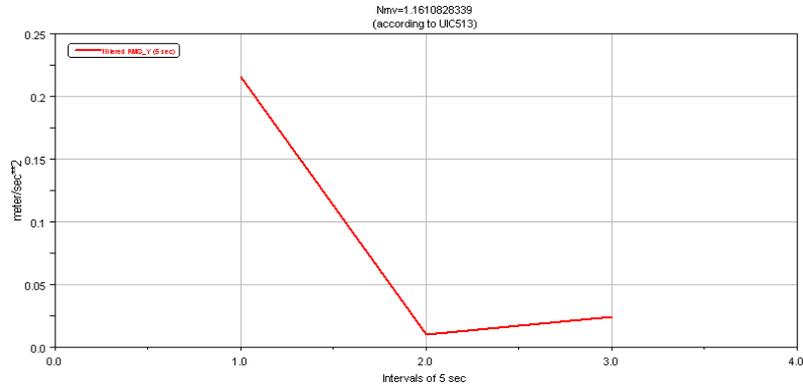


Figura 6.320. $N_{MVfront}$. $R = 500$ m; $V = 25$ m/s

Para el módulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 1,169$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.321.

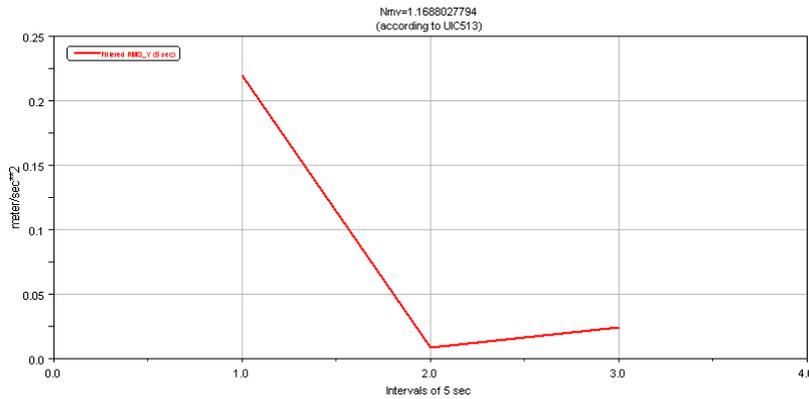


Figura 6.321. N_{MVrear} . $R = 500$ m; $V = 25$ m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

Para el módulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 1,709$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.322.

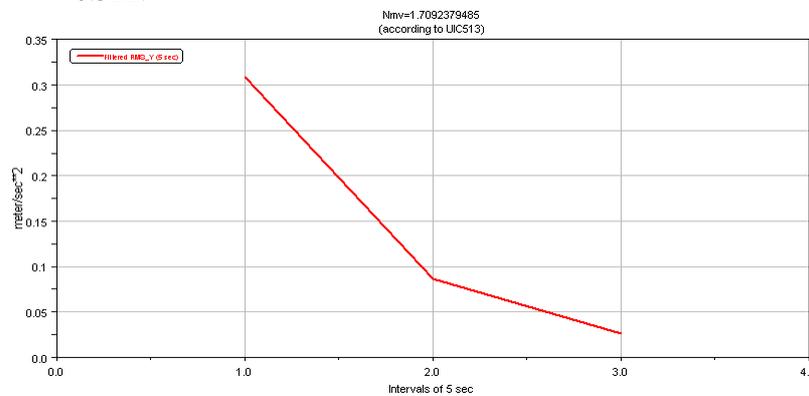


Figura 6.322. $N_{MVfront}$. $R = 500$ m; $V = 30$ m/s

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 1,761$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.323.

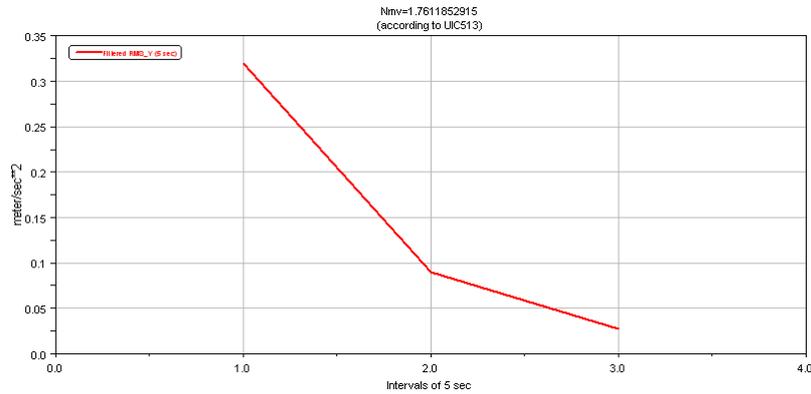


Figura 6.323. N_{MVrear} . $R = 500$ m; $V = 30$ m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 2,420$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.324.

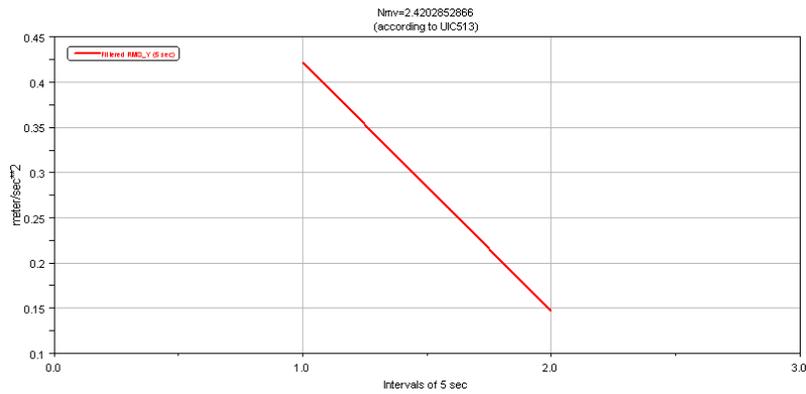


Figura 6.324. $N_{MVfront}$. $R = 500$ m; $V = 35$ m/s

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 2,502$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.325.

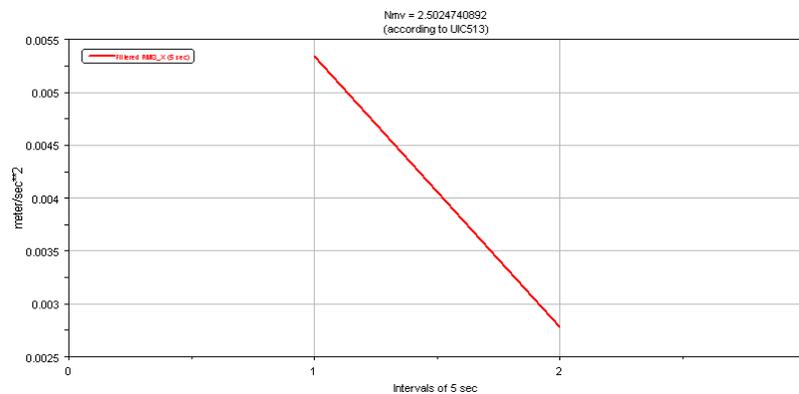


Figura 6.325. N_{MVrear} . $R = 500$ m; $V = 35$ m/s

6.7.1.5 Radio de curvatura de 600 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto ideal consta de una curva de 600 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,161$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.326.

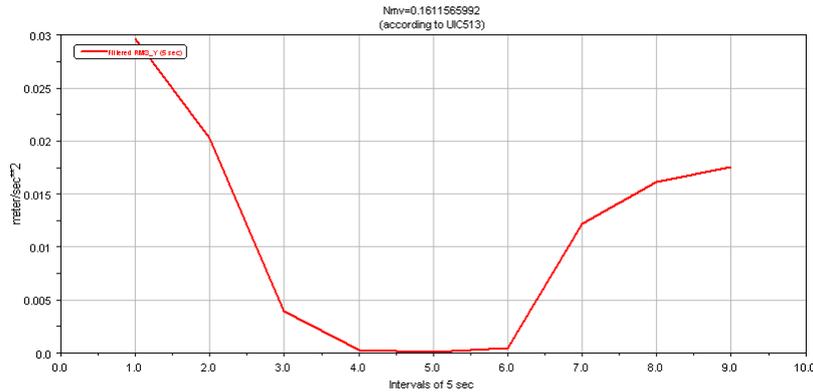


Figura 6.326. $N_{MVfront}$. $R = 600$ m; $V = 10$ m/s

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,161$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.327.

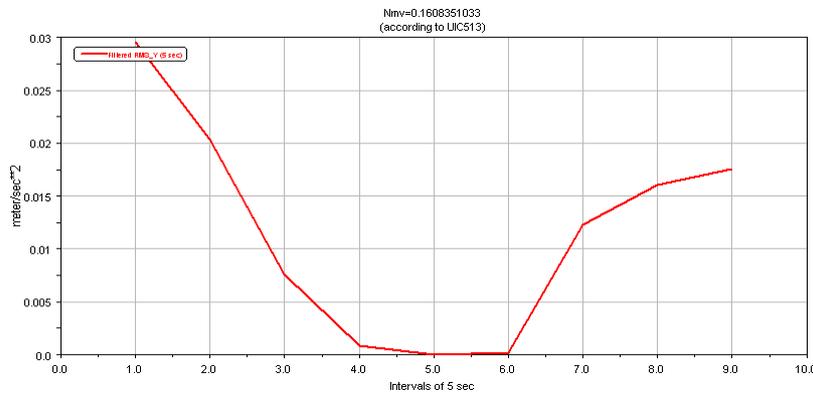


Figura 6.327. N_{MVrear} . $R = 600$ m; $V = 10$ m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,293$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.328.

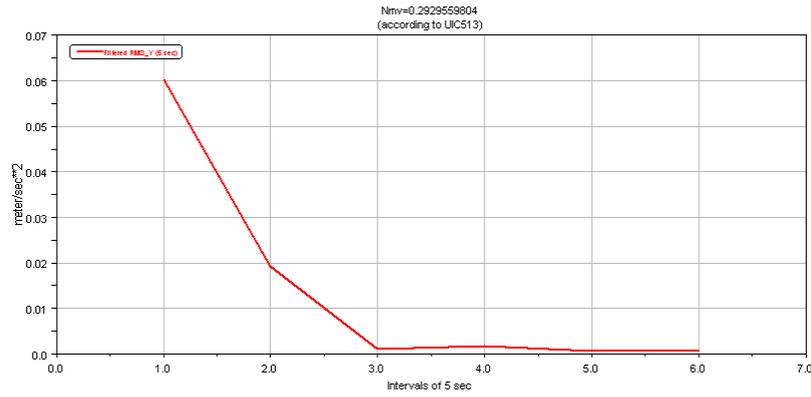


Figura 6.328. NMV_{front} . $R = 600\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,287$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.329.

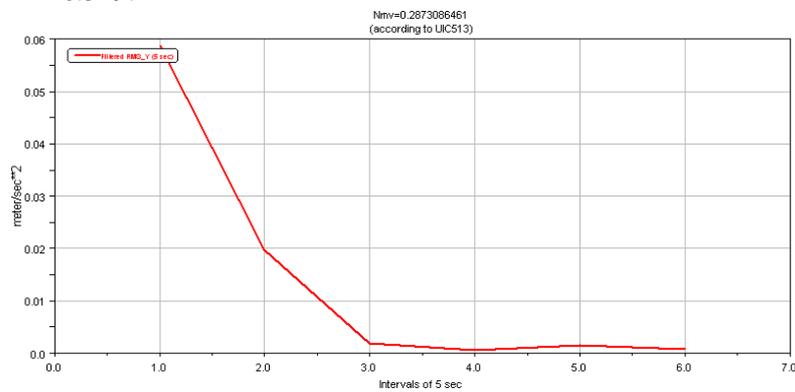


Figura 6.329. NMV_{rear} . $R = 600\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,579$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.330.

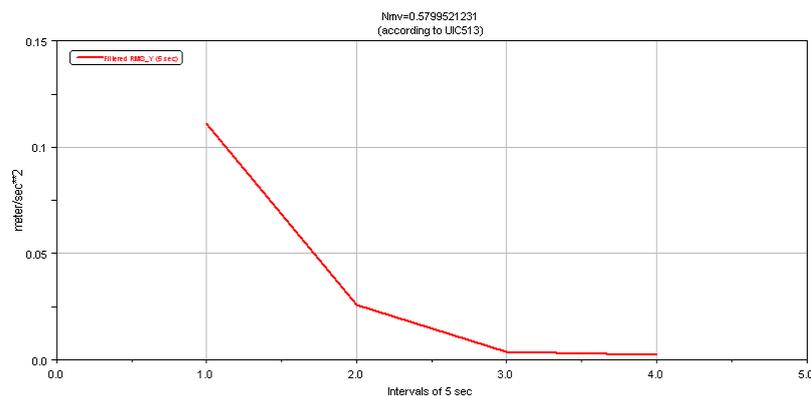


Figura 6.330. NMV_{front} . $R = 600\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,579$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.331.

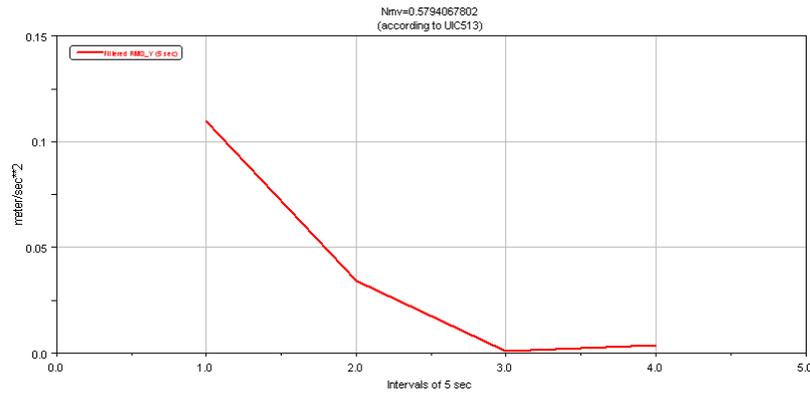


Figura 6.331. NMV_{rear} . $R = 600\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,968$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.332.

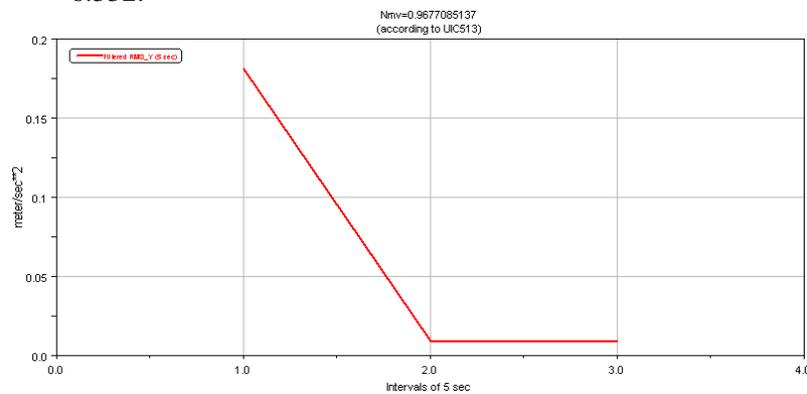


Figura 6.332. NMV_{front} . $R = 600\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,979$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.333.

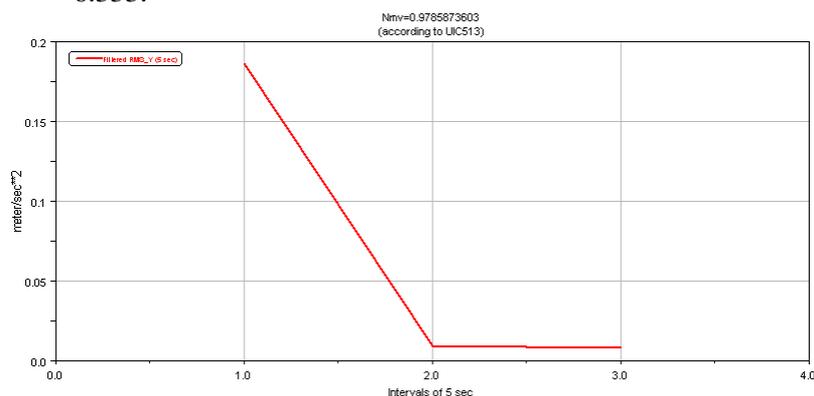


Figura 6.333. NMV_{rear} . $R = 600\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,502$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.334.

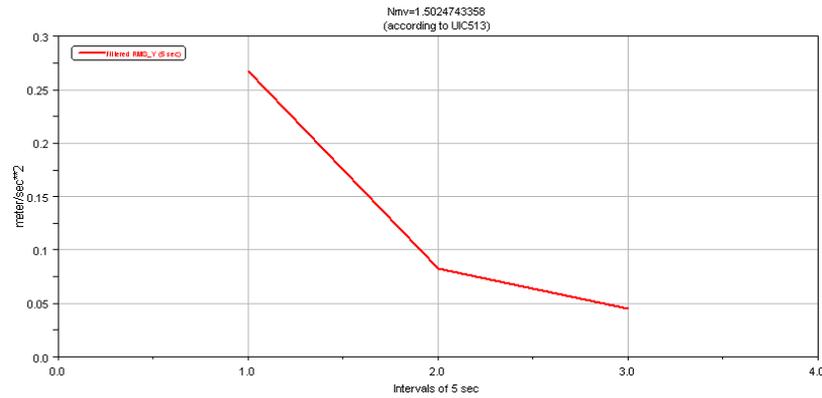


Figura 6.334. NMV_{front} . $R = 600\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,559$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.335.

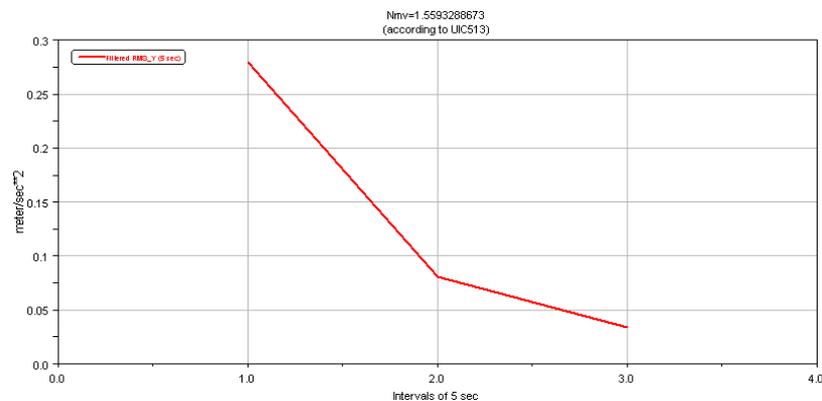


Figura 6.335. NMV_{rear} . $R = 600\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 2,097$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.336.

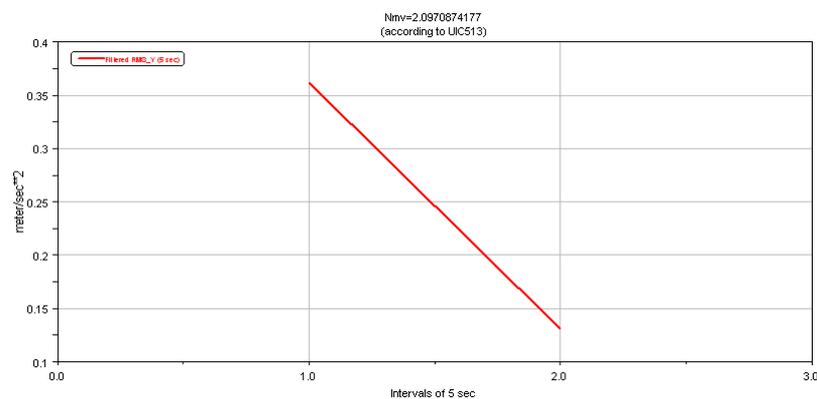


Figura 6.336. NMV_{front} . $R = 600\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

Para el modulo trasero del vagón se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 2,179$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.337.

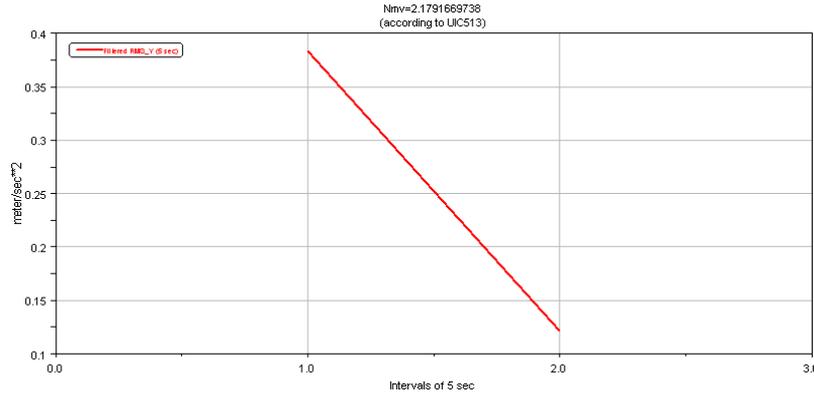


Figura 6.337. NMv_{rear} . $R = 600\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

6.7.2 En Presencia de irregularidades

Como se puede observar en el apartado anterior, las diferencias existente entre los módulos delanteros y traseros del tren, en cuanto al índice de confort, son ínfimas, por ese motivo, y con el objetivo de simplificar el estudio, se representan a continuación únicamente los índices de confort obtenidos para el modulo delantero, ante la presencia de irregularidades en la vía.

6.7.2.1 Radio de curvatura de 200 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto en presencia de irregularidades consta de una curva de 200 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,720$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.338.

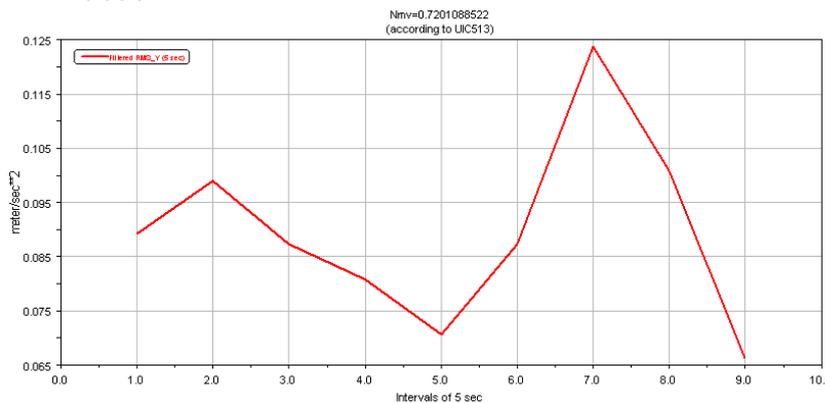


Figura 6.338. NMv_{Irreg} . $R = 200\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,215$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.339.

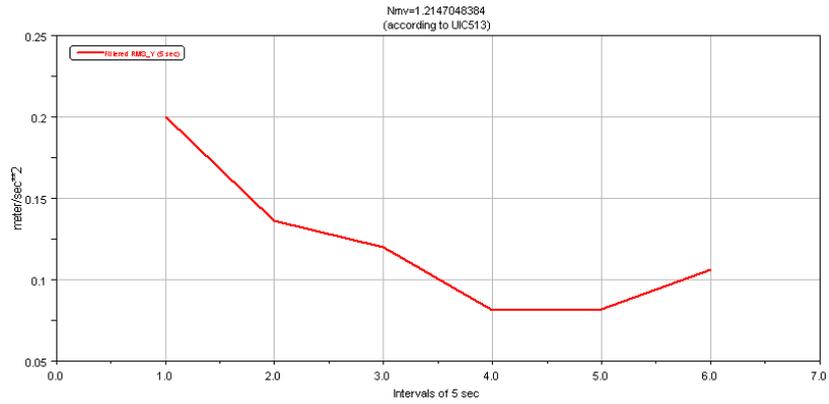


Figura 6.339. $NMVI_{reg}$. $R = 200$ m; $V = 15$ m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 2,169$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.340.

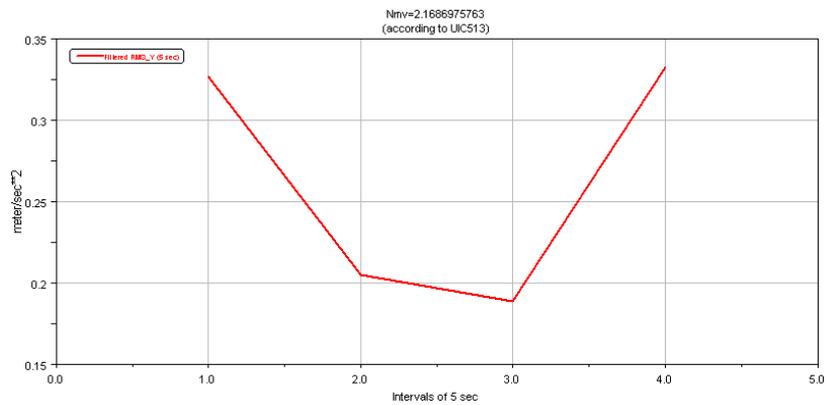


Figura 6.340. $NMVI_{reg}$. $R = 200$ m; $V = 20$ m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 3,443$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.341.

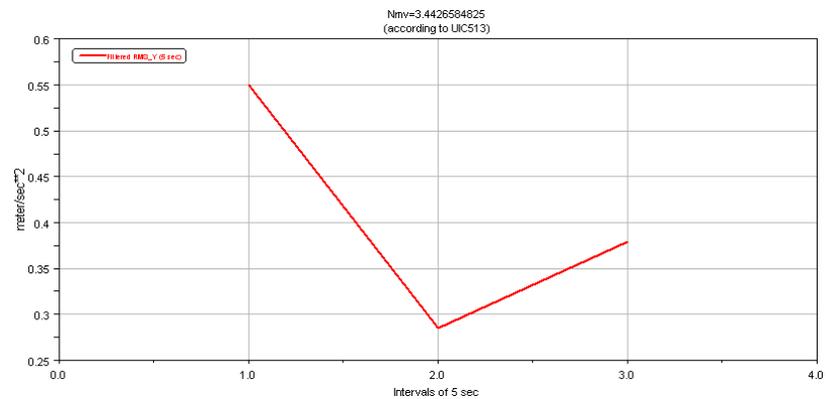


Figura 6.341. $NMVI_{reg}$. $R = 200$ m; $V = 25$ m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 4,953$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.342.

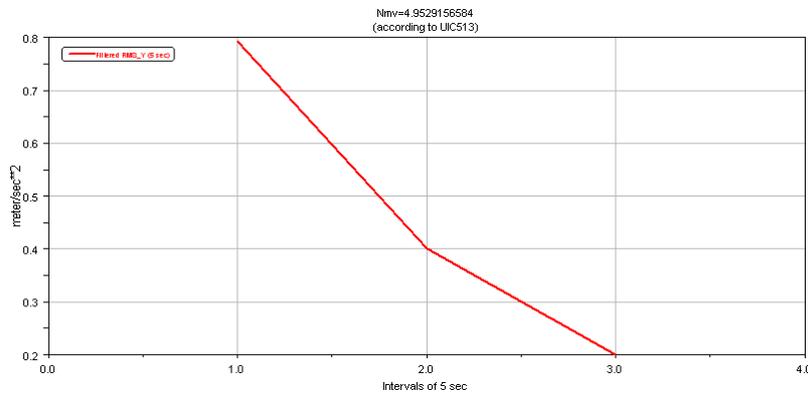


Figura 6.342. $N_{mv} Irreg. R = 200 m; V = 30 m/s$

6.7.2.2 Radio de curvatura de 300 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto en presencia de irregularidades consta de una curva de 300 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,754$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.343.

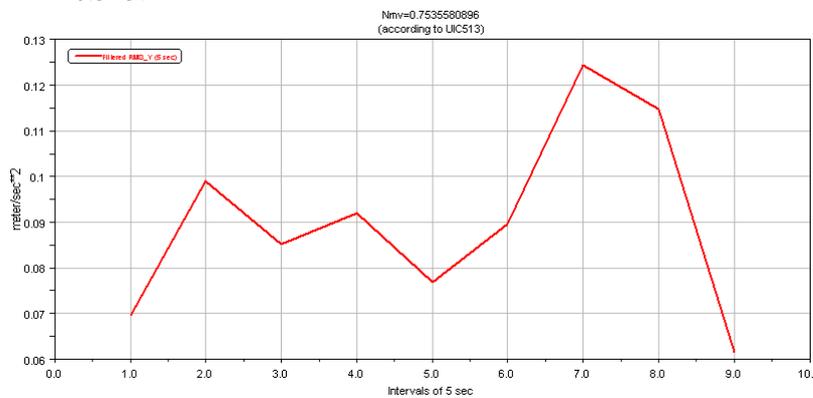


Figura 6.343. $N_{mv} Irreg. R = 300 m; V = 10 m/s$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 1,072$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.344.

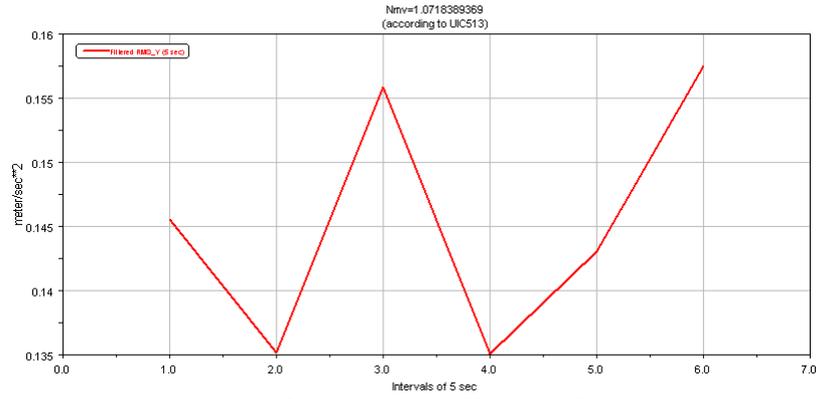


Figura 6.344. *NMVI*reg. $R = 300$ m; $V = 15$ m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,647$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.345.

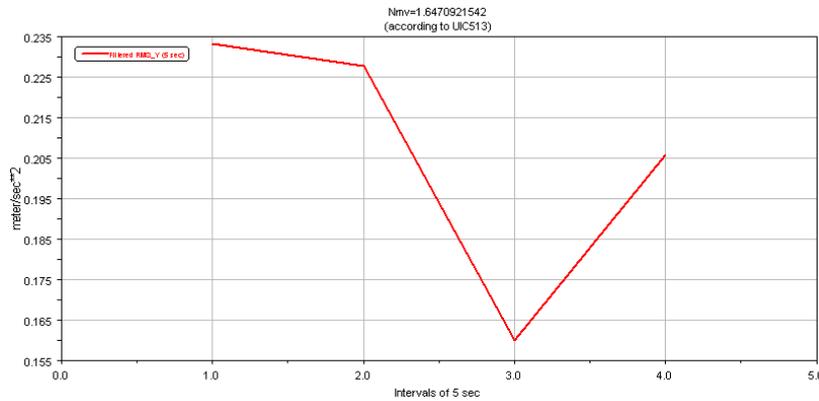


Figura 6.345. *NMVI*reg. $R = 300$ m; $V = 20$ m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 2,686$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.346.

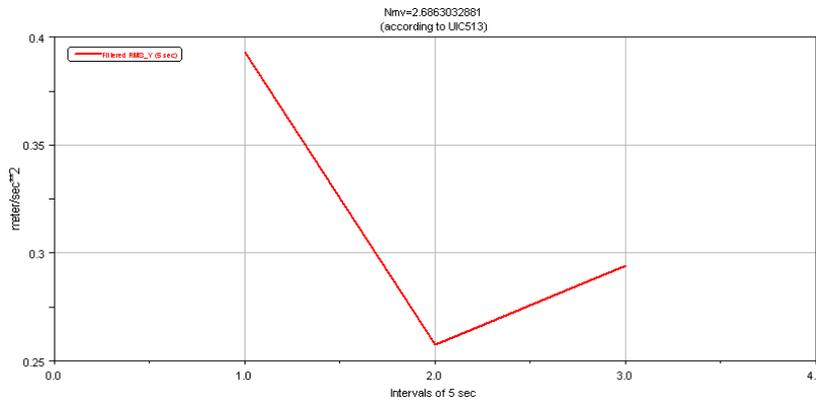


Figura 6.346. *NMVI*reg. $R = 300$ m; $V = 25$ m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 3,909$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.347.

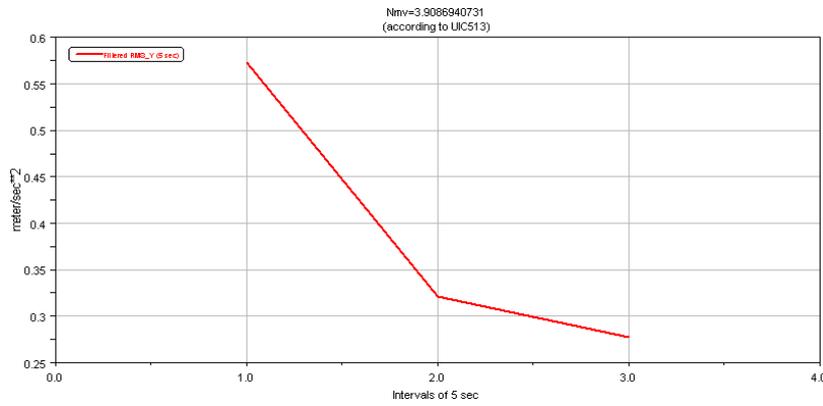


Figura 6.347. $N_{MV} Irreg. R = 300 \text{ m}; V = 30 \text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 5,516$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.348.

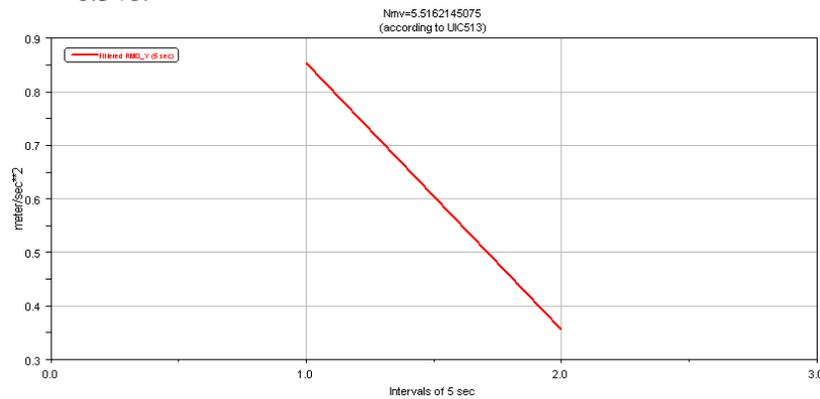


Figura 6.348. $N_{MV} Irreg. R = 300 \text{ m}; V = 35 \text{ m/s}$

6.7.2.3 Radio de curvatura de 400 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto en presencia de irregularidades consta de una curva de 400 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 1,285$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.349.

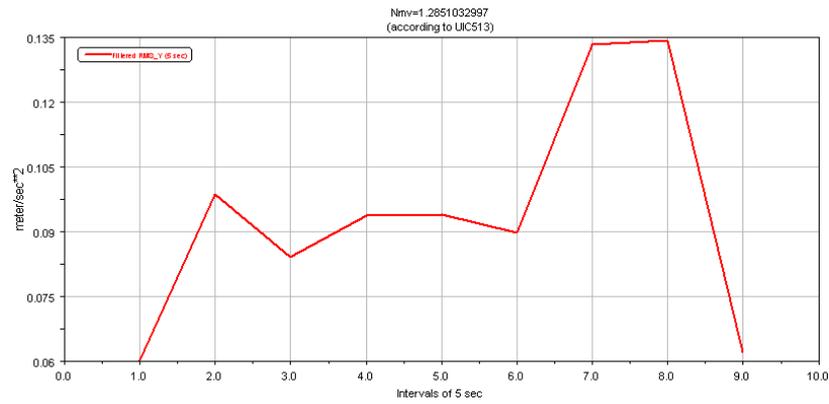


Figura 6.349. $NMVI_{reg}$. $R = 400$ m; $V = 10$ m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,367$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.350.

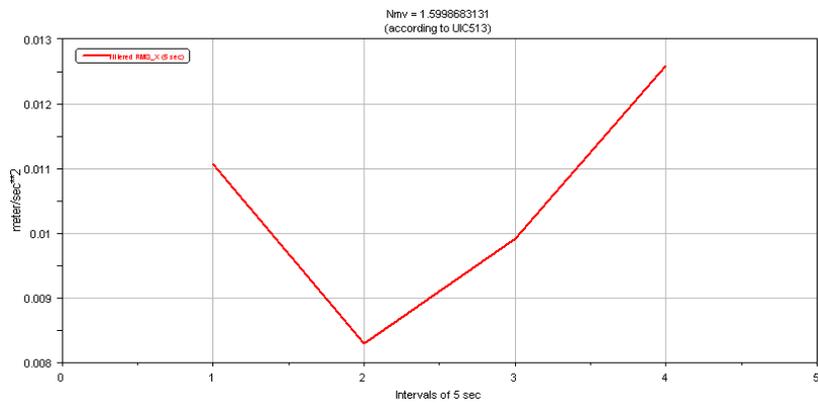


Figura 6.350. $NMVI_{reg}$. $R = 400$ m; $V = 15$ m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,600$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.351.

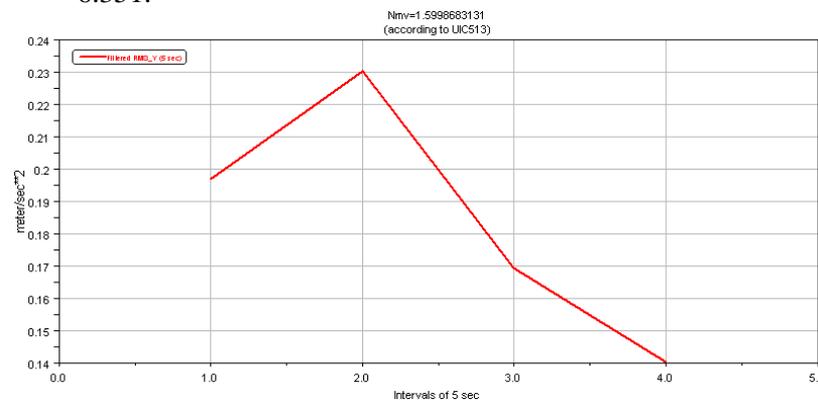


Figura 6.351. $NMVI_{reg}$. $R = 400$ m; $V = 20$ m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 2,383$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.352.

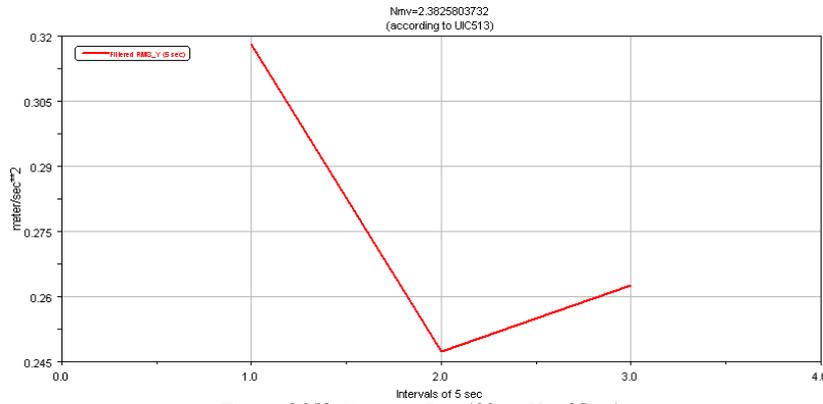


Figura 6.352. $N_{MV}Irreg$. $R = 400$ m; $V = 25$ m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 3,556$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.353.

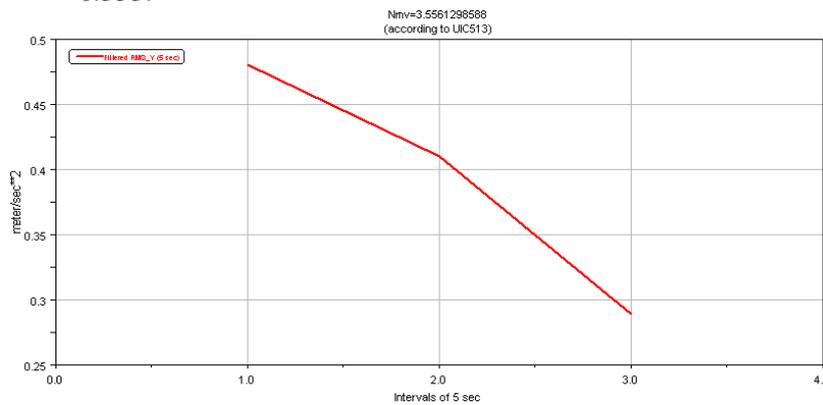


Figura 6.353. $N_{MV}Irreg$. $R = 400$ m; $V = 30$ m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 5,171$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.354.

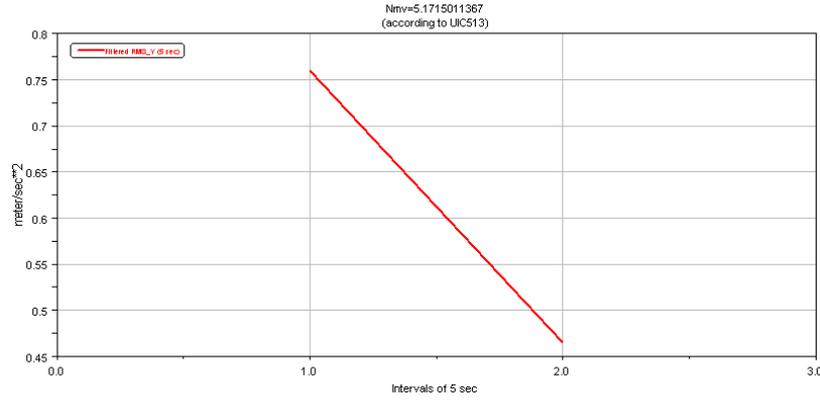


Figura 6.354. $NMVI_{reg}$. $R = 400\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

6.7.2.4 Radio de curvatura de 500 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto en presencia de irregularidades consta de una curva de 500 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 0,874$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.355.

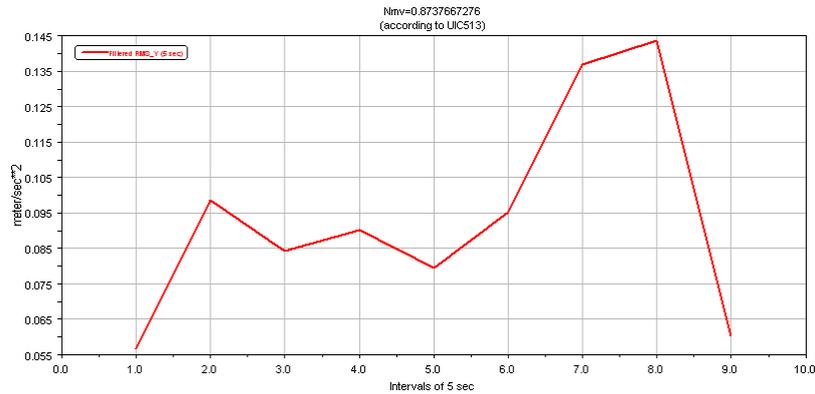


Figura 6.355. $NMVI_{reg}$. $R = 500\text{ m}$; $V = 10\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,544$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.356.

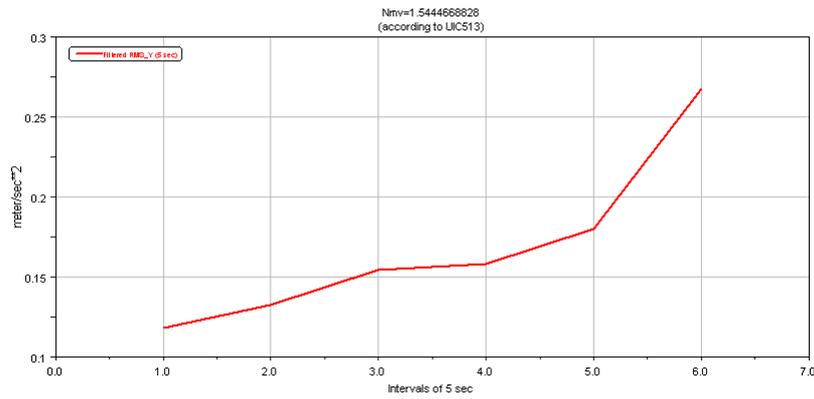


Figura 6.356. $NMVI_{reg}$. $R = 500\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,617$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.357.

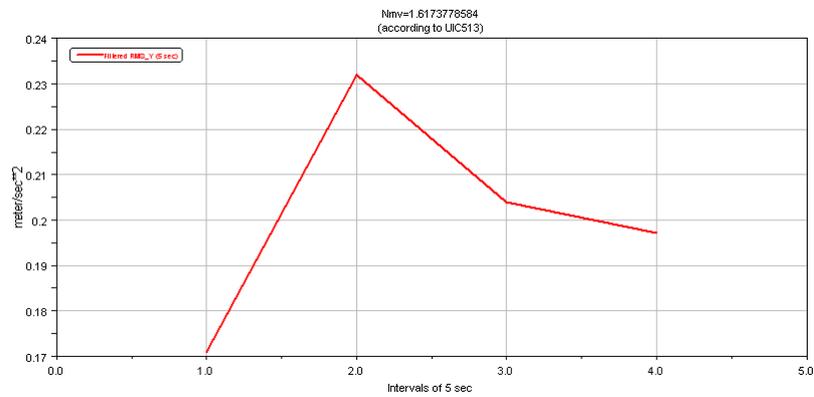


Figura 6.357. $NMVI_{reg}$. $R = 500\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 2,198$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.358.

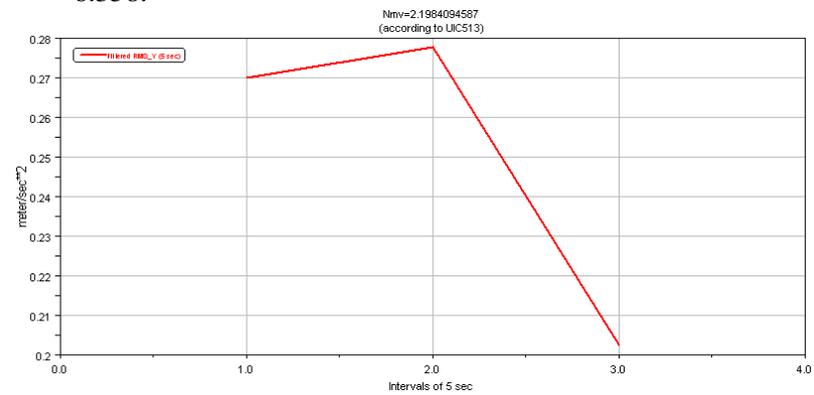


Figura 6.358. $NMVI_{reg}$. $R = 500\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 3,481$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.359.

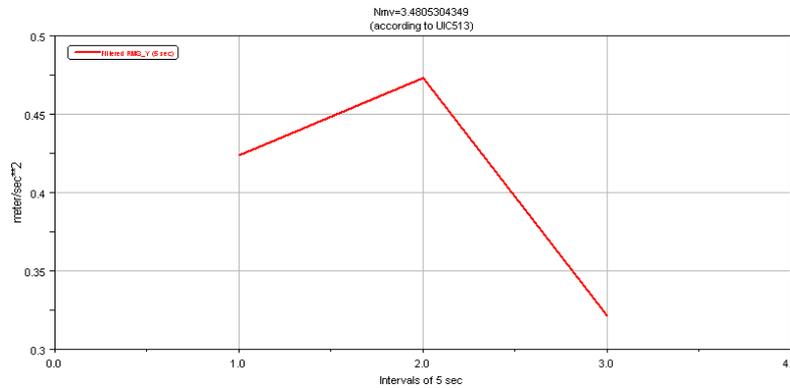


Figura 6.359. $N_{MV} Irreg. R = 500\text{ m}; V = 30\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 4,885$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.360.

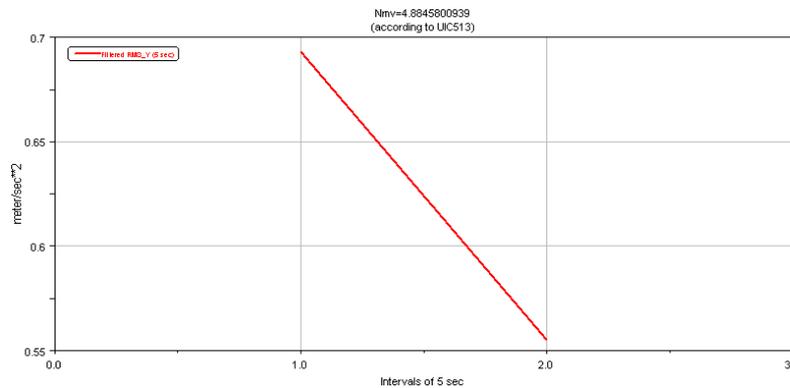


Figura 6.360. $N_{MV} Irreg. R = 500\text{ m}; V = 35\text{ m/s}$

6.7.2.5 Radio de curvatura de 600 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto en presencia de irregularidades consta de una curva de 600 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 0,910$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.361.

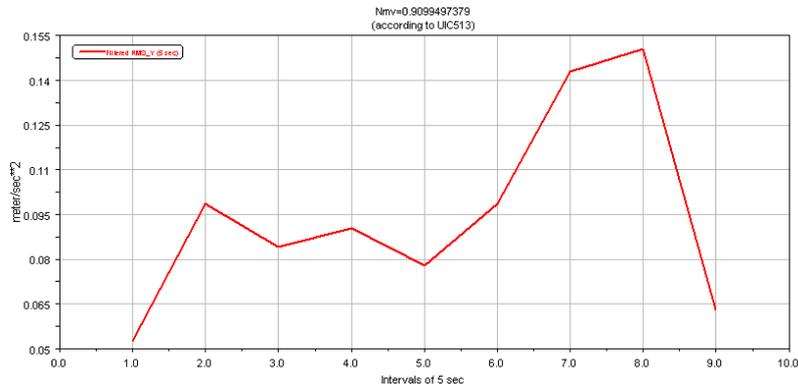


Figura 6.361. $NMVIrreg. R = 600\text{ m}; V = 10\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,668$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.362.

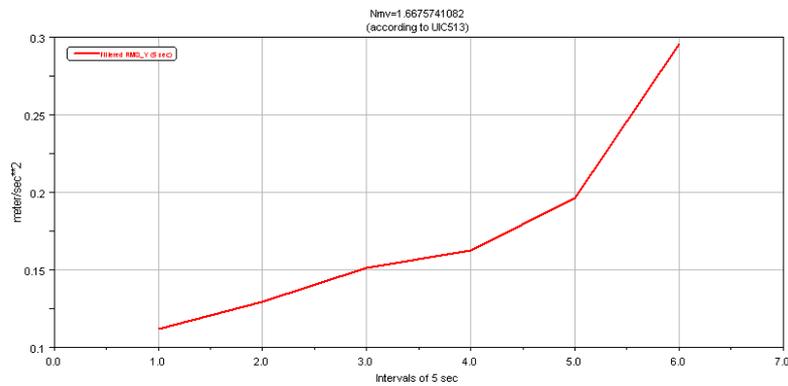


Figura 6.362. $NMVIrreg. R = 600\text{ m}; V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $Nmv = 1,751$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.363.

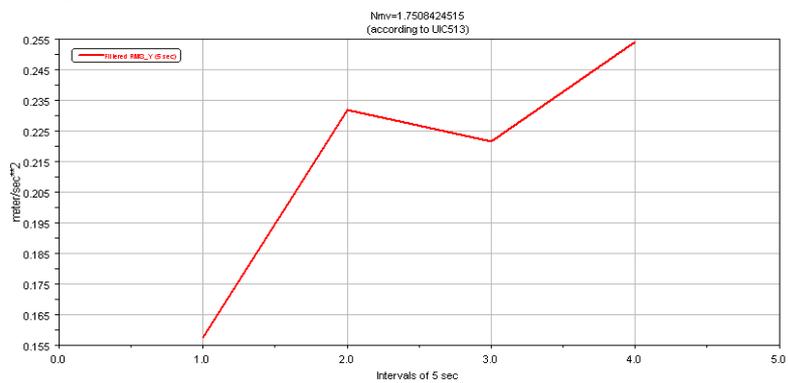


Figura 6.363. $NMVIrreg. R = 600\text{ m}; V = 20\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 2,350$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.364.

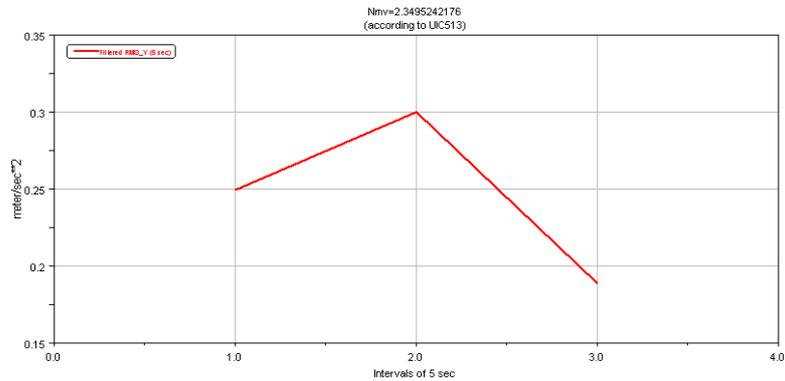


Figura 6.364. $N_{MVIrreg}$. $R = 600$ m; $V = 25$ m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 3,587$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.365.

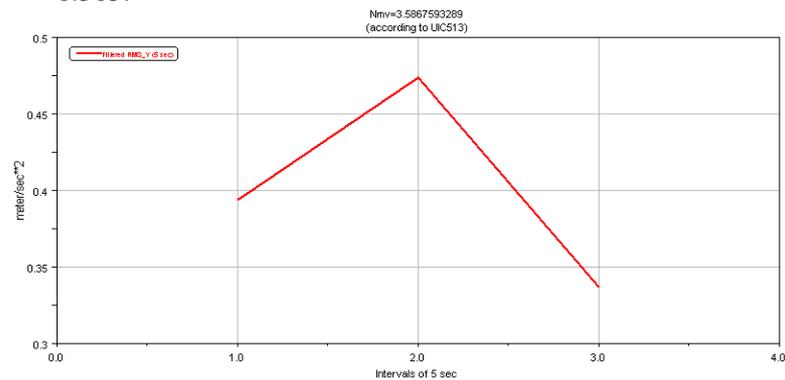


Figura 6.365. $N_{MVIrreg}$. $R = 600$ m; $V = 30$ m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En presencia de irregularidades se ha obtenido un índice de confort de $N_{mv} = 4,875$, según la norma UIC 513, como se representa en la figura 6.366.

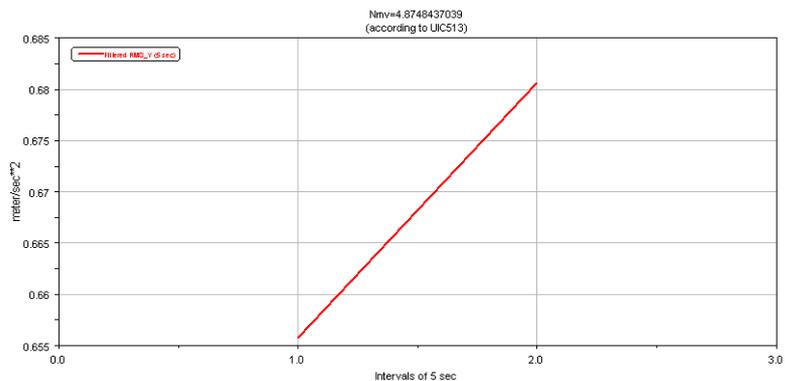


Figura 6.366. $N_{MVIrreg}$. $R = 600$ m; $V = 35$ m/s

6.8 Estudio del confort según Sperling

Una vez calculados los índices de confort, según la norma UIC 513, tanto en presencia como en ausencia de irregularidades. Se trata a continuación de contrastar los datos obtenidos anteriormente mediante el cálculo de los índices de confort según Sperling, obteniendo para cada figura, el índice de Sperling con respecto al eje Z (lado izquierdo) y con respecto al eje Y (lado derecho).

6.8.1 Radio de curvatura de 200 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos según Sperling, para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto consta de una curva de 200 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,223$ y $W_{zy} = 1,195$, según Sperling, como se representa en la figura 6.367.

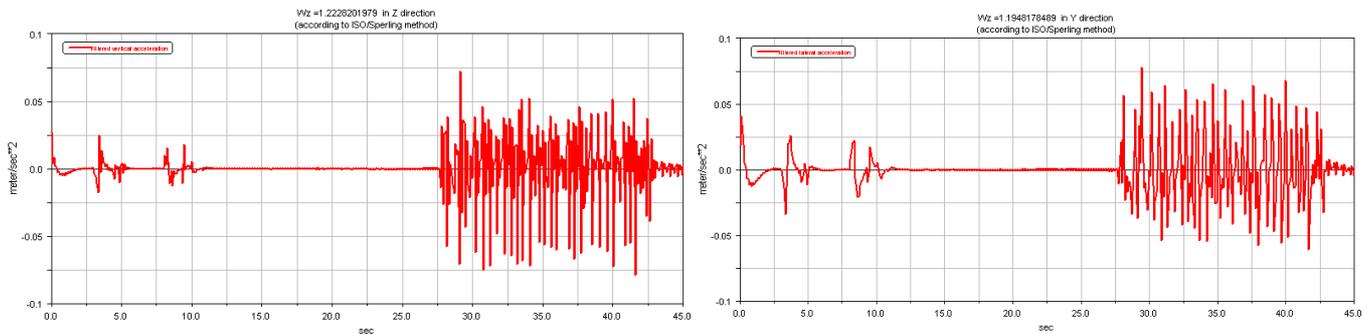


Figura 6.367. W_{zz} y W_{zy} . $R = 200$ m; $V = 10$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,391$ y $W_{zy} = 1,934$, según Sperling, como se representa en la figura 6.368. Destacando las similitudes con respecto al estudio sin irregularidades.

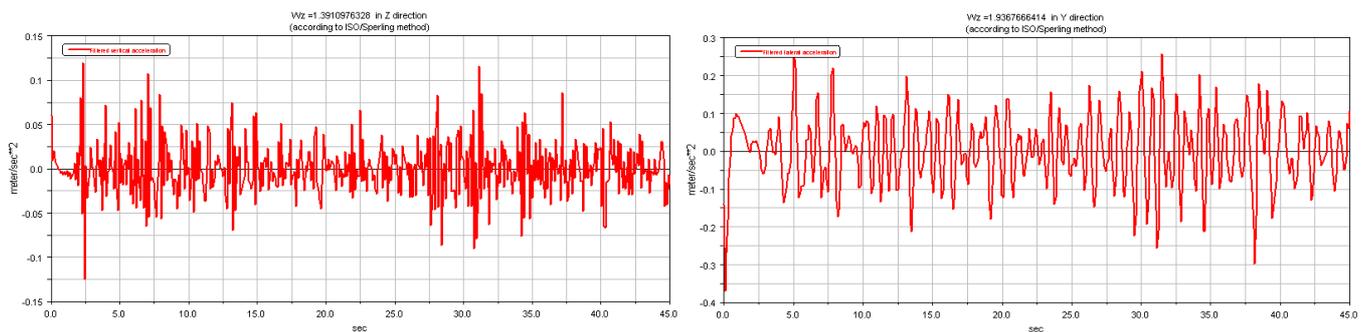


Figura 6.368. $W_{zz}Irreg$ y $W_{zy}Irreg$. $R = 200$ m; $V = 10$ m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,182$ y $W_{zy} = 1,815$, según Sperling, como se representa en la figura 6.369.

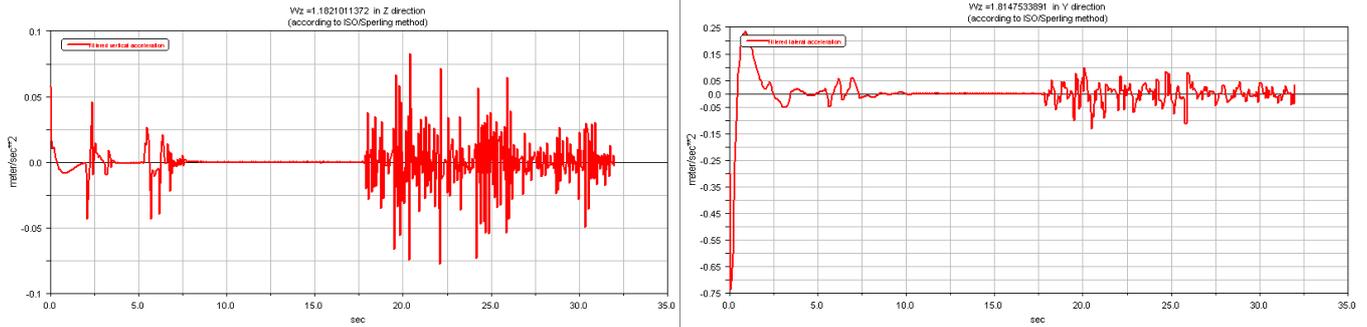


Figura 6.369. W_{zz} y W_{zy} . $R = 200\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,868$ y $W_{zy} = 2,129$, según Sperling, como se representa en la figura 6.370.

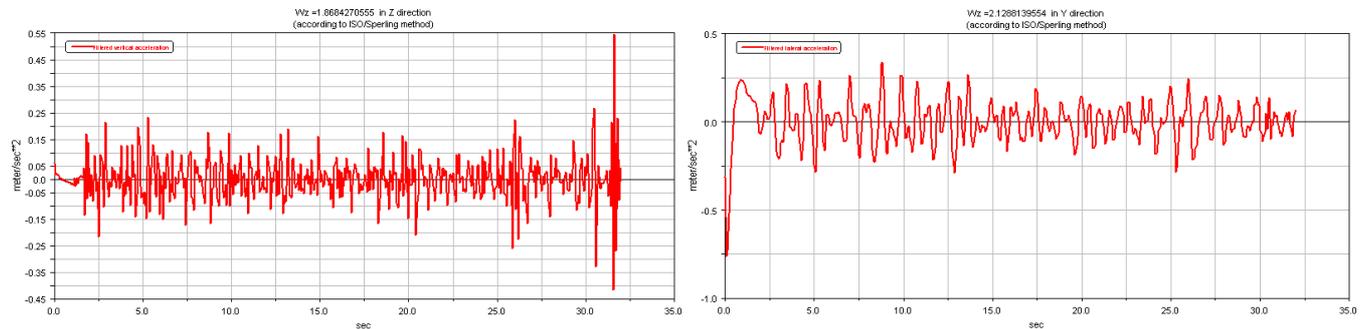


Figura 6.370. $W_{zzIrreg}$ y $W_{zyIrreg}$. $R = 200\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,354$ y $W_{zy} = 2,278$, según Sperling, como se representa en la figura 6.371.

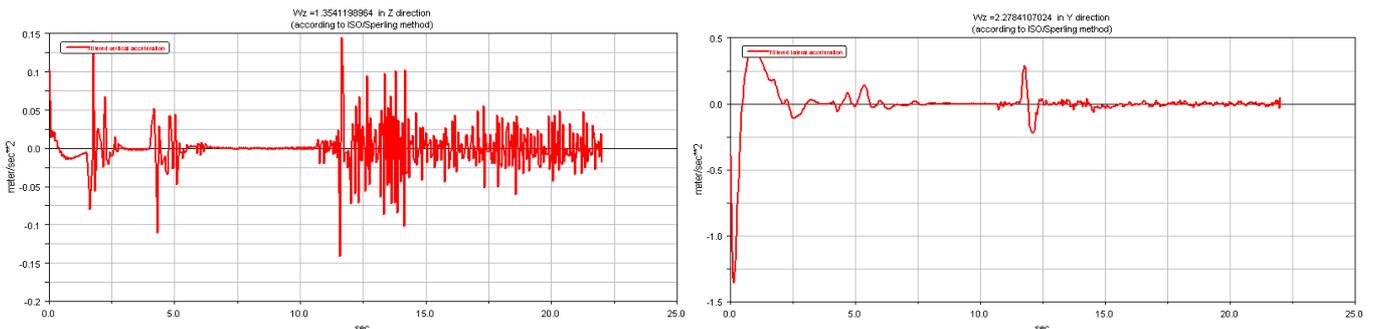


Figura 6.371. W_{zz} y W_{zy} . $R = 200\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,174$ y $W_{zy} = 2,729$, según Sperling, como se representa en la figura 6.372. Como se puede observar a medida que aumenta la velocidad la diferencia entre los índices obtenidos van aumentando.

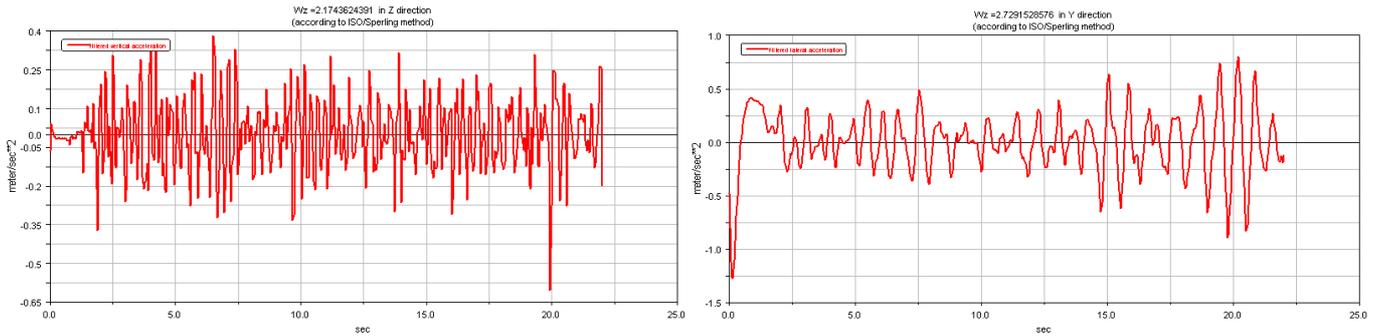


Figura 6.372. $W_{zz}Irreg$ y $W_{zy}Irreg$. $R = 200$ m; $V = 20$ m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,413$ y $W_{zy} = 2,868$, según Sperling, como se representa en la figura 6.373.

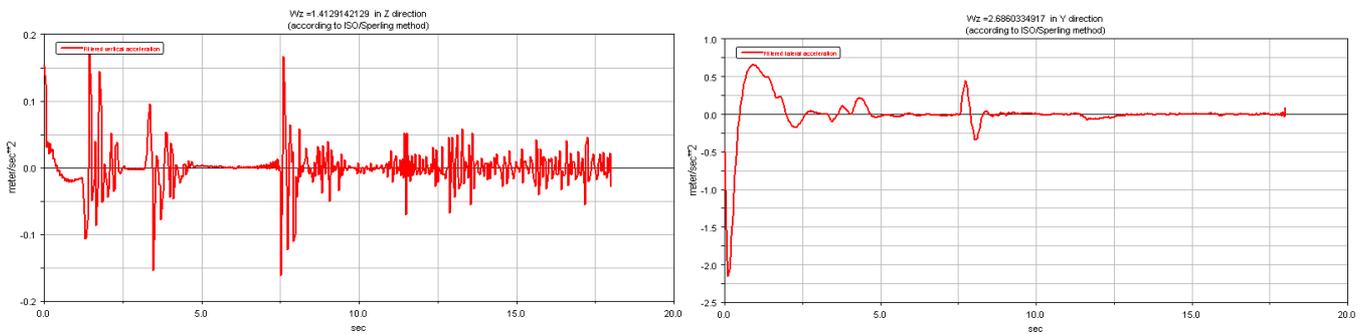


Figura 6.373. W_{zz} y W_{zy} . $R = 200$ m; $V = 25$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,529$ y $W_{zy} = 3,066$, según Sperling, como se representa en la figura 6.374.

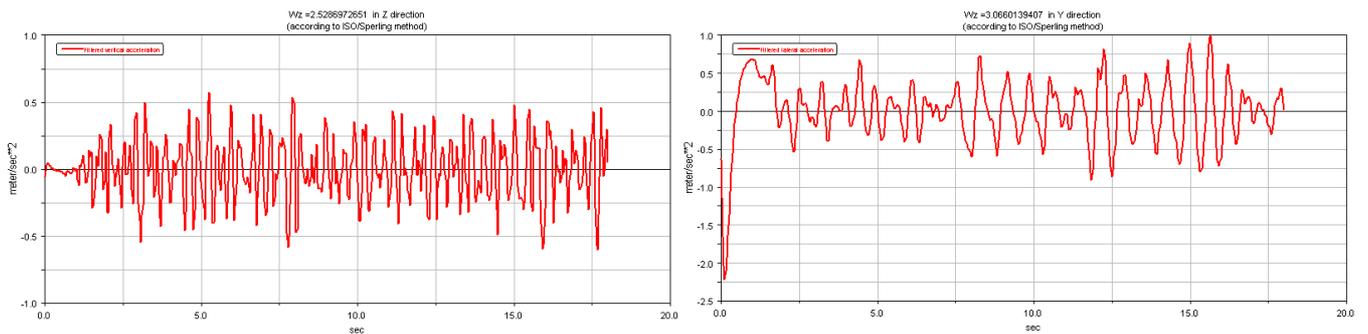


Figura 6.374. $W_{zz}Irreg$ y $W_{zy}Irreg$. $R = 200$ m; $V = 25$ m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,595$ y $W_{zy} = 3,087$, según Sperling, como se representa en la figura 6.375.

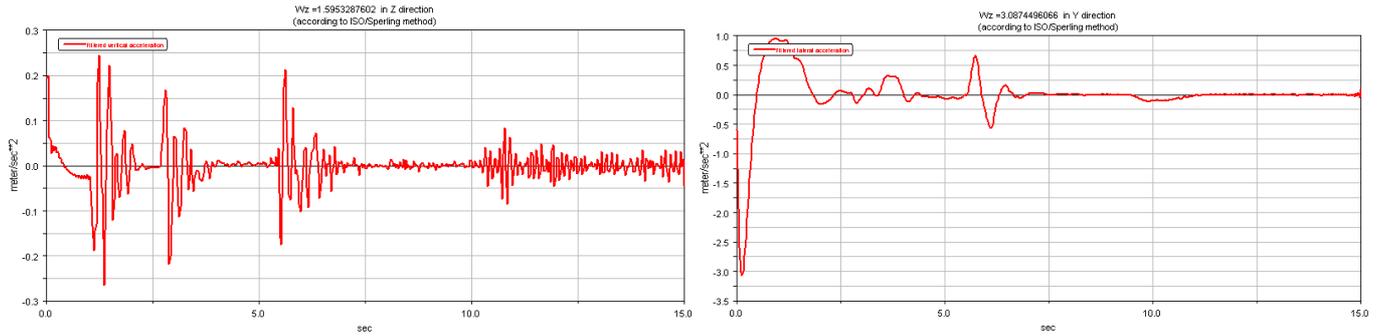


Figura 6.375. W_{zz} y W_{zy} . $R = 200$ m; $V = 30$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,912$ y $W_{zy} = 3,278$, según Sperling, como se representa en la figura 6.376.

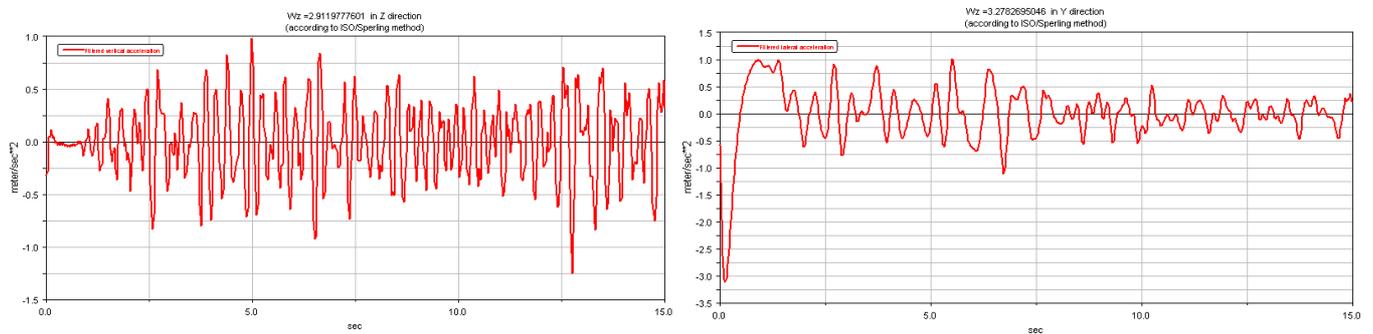


Figura 6.376. $W_{zzIrreg}$ y $W_{zyIrreg}$. $R = 200$ m; $V = 30$ m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

Al igual que lo ocurrido en el estudio del confort del apartado anterior, el índice obtenido en este caso, no se puede considerar aceptable teniendo en cuenta el descarrilamiento del vagón en un determinado momento de la curva.

6.8.2 Radio de curvatura de 300 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos según Sperling, para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto consta de una curva de 300 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En ausencia de irregularidades vagón se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 0,657$ y $W_{zy} = 1,201$, según Sperling, como se representa en la figura 6.377.

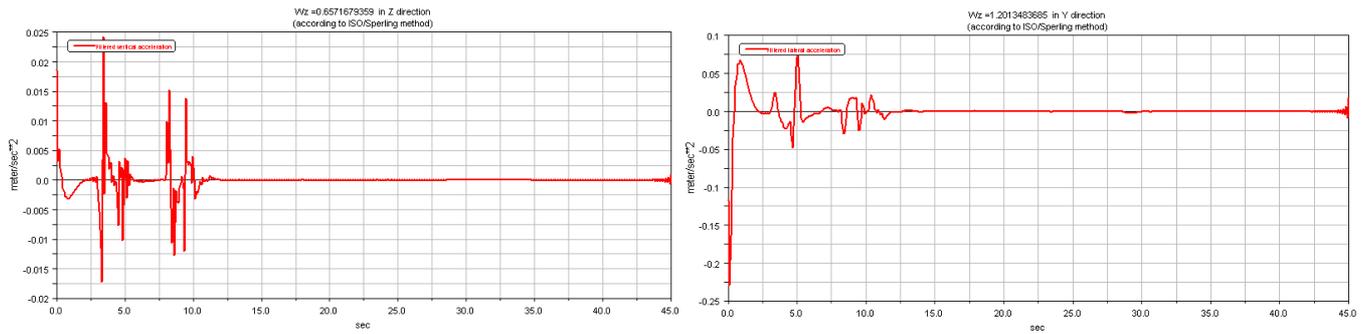


Figura 6.377. W_{zz} y W_{zy} . $R = 300$ m; $V = 10$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,375$ y $W_{zy} = 1,956$, según Sperling, como se representa en la figura 6.378.

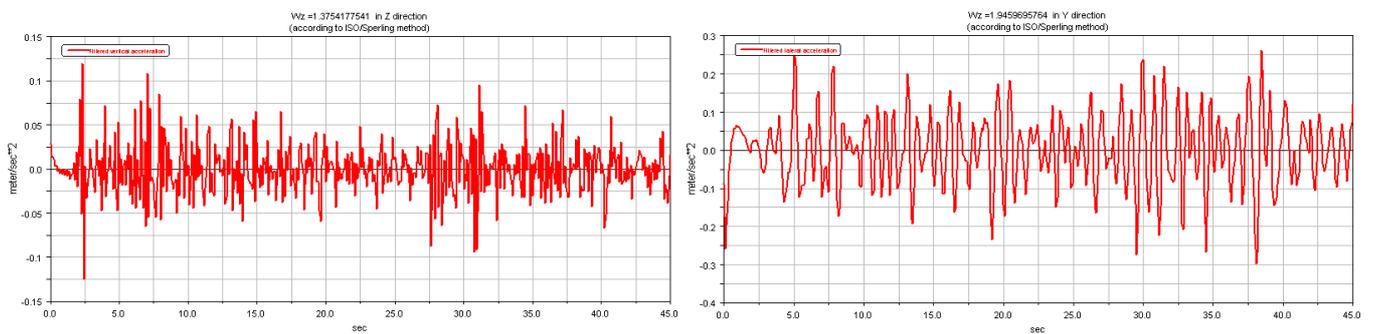


Figura 6.378. $W_{zz}lreg$ y $W_{zy}lreg$. $R = 300$ m; $V = 10$ m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

Para el modulo delantero del vagón se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 0,833$ y $W_{zy} = 1,587$, según Sperling, como se representa en la figura 6.379.

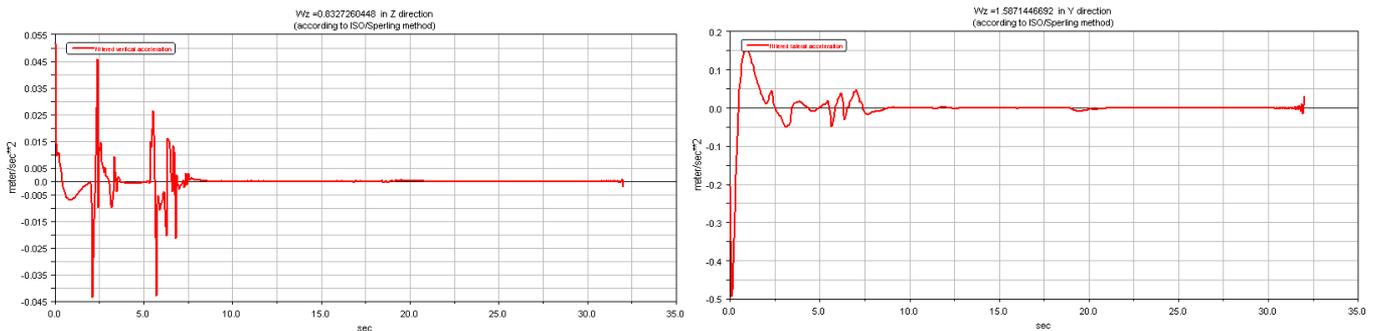


Figura 6.379. W_{zz} y W_{zy} . $R = 300$ m; $V = 15$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,992$ y $W_{zy} = 2,220$, según Sperling, como se representa en la figura 6.380.

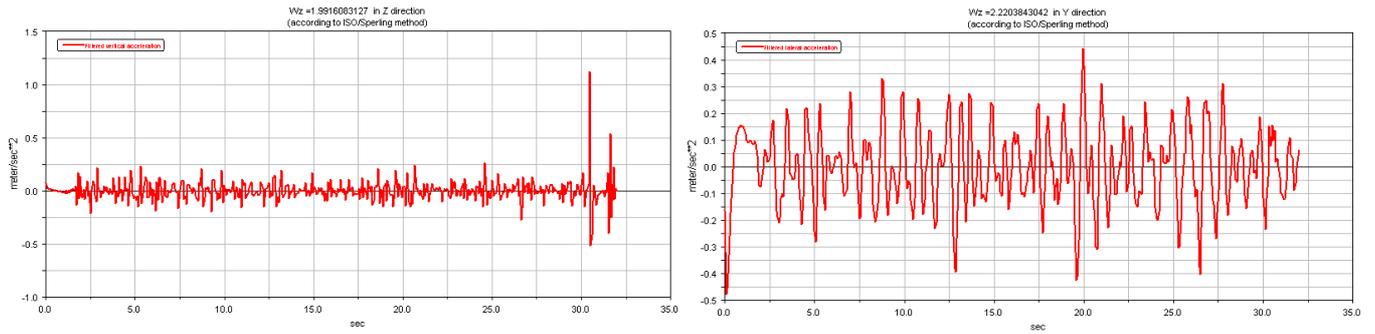


Figura 6.380. $W_{zz}Irreg$ y $W_{zy}Irreg$. $R = 300\text{ m}$; $V = 15\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,609$ y $W_{zy} = 2,030$, según Sperling, como se representa en la figura 6.381.

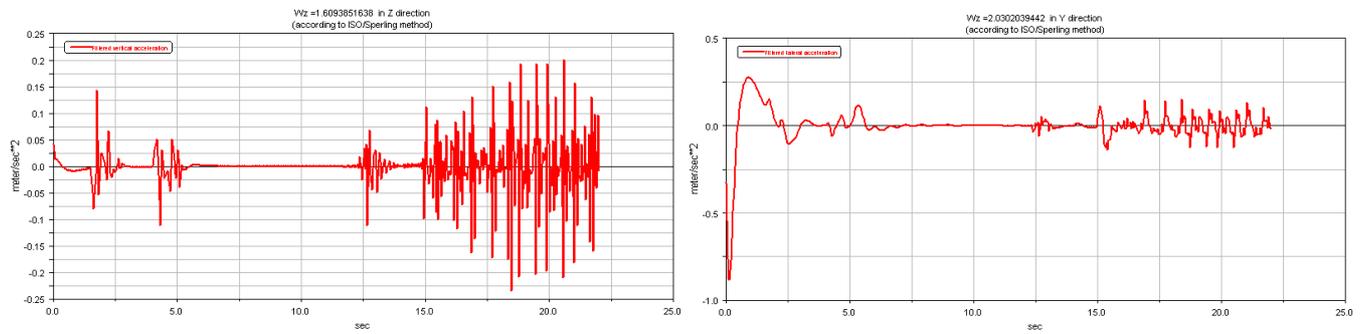


Figura 6.381. W_{zz} y W_{zy} . $R = 300\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,194$ y $W_{zy} = 2,469$, según Sperling, como se representa en la figura 6.382.

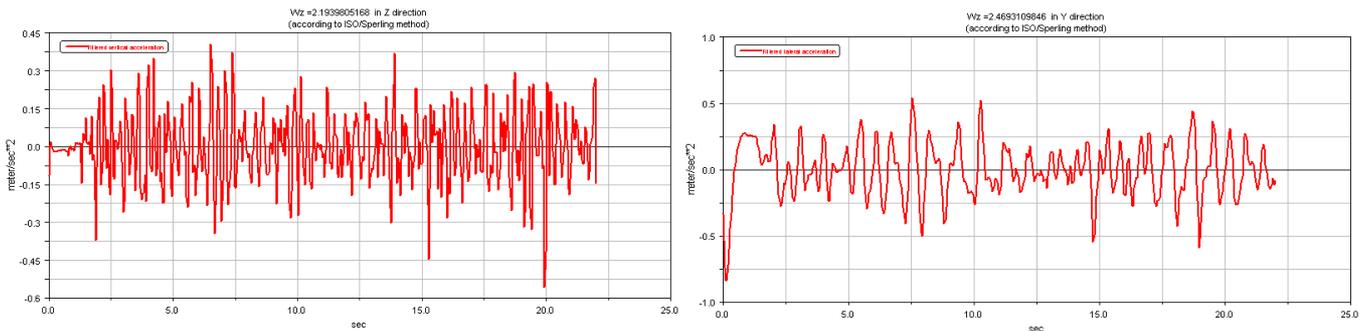


Figura 6.382. $W_{zz}Irreg$ y $W_{zy}Irreg$. $R = 300\text{ m}$; $V = 20\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,640$ y $W_{zy} = 2,391$, según Sperling, como se representa en la figura 6.383.

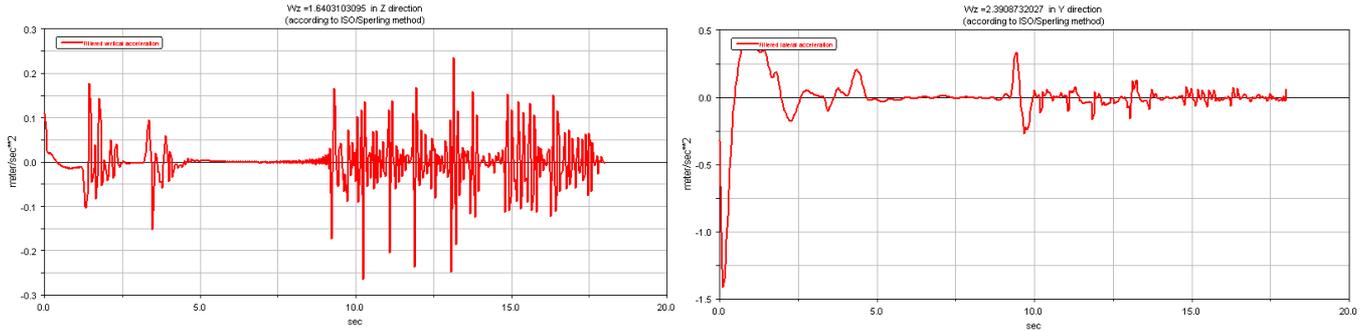


Figura 6.383. W_{zz} y W_{zy} . $R = 300\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,511$ y $W_{zy} = 2,822$, según Sperling, como se representa en la figura 6.384.

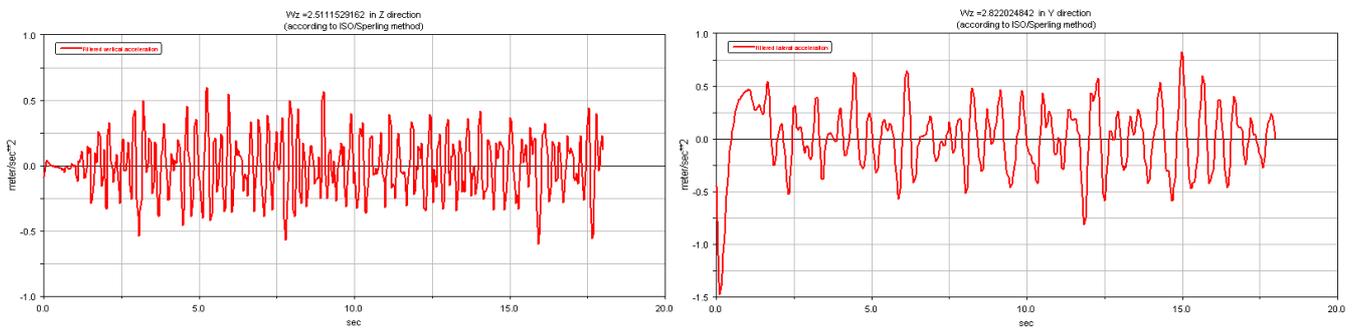


Figura 6.384. $W_{zzIrreg}$ y $W_{zyIrreg}$. $R = 300\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,623$ y $W_{zy} = 2,749$, según Sperling, como se representa en la figura 6.385.

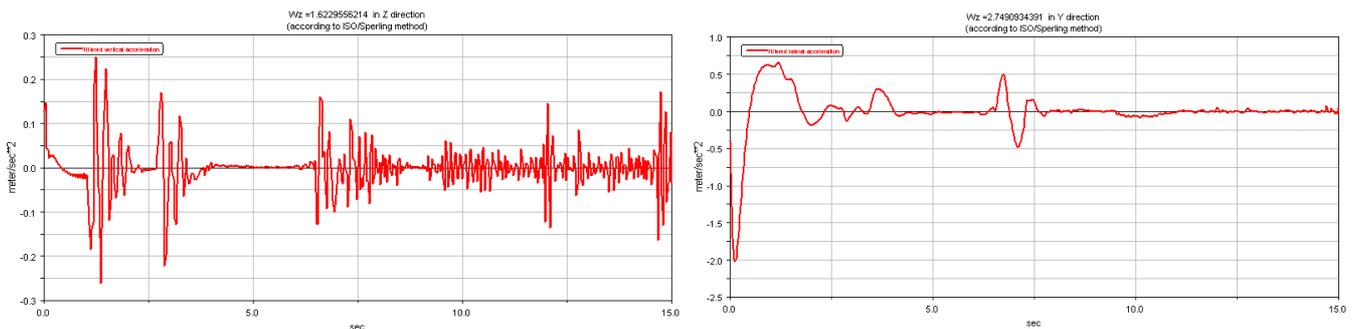


Figura 6.385. W_{zz} y W_{zy} . $R = 300\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,902$ y $W_{zy} = 3,047$, según Sperling, como se representa en la figura 6.386.

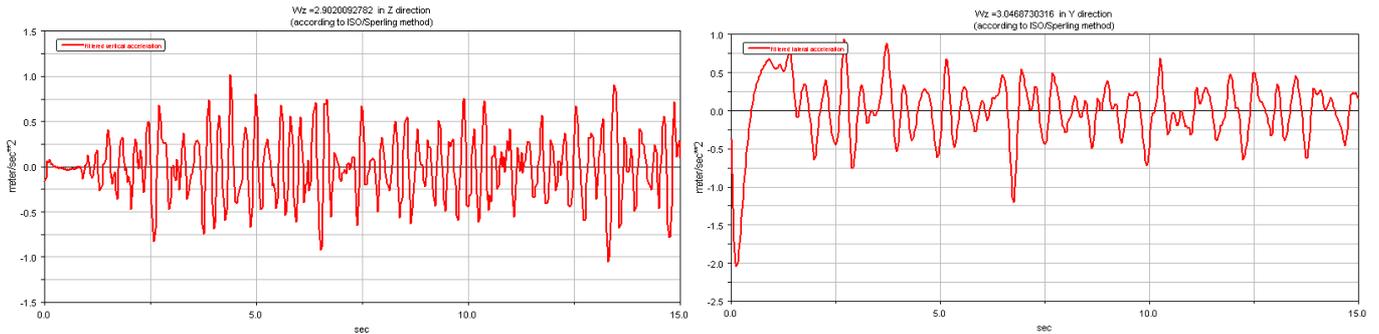


Figura 6.386. $W_{zz}lreg$ y $W_{zy}lreg$. $R = 300$ m; $V = 30$ m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_z = 1,805$ y $W_{zy} = 3,128$, según Sperling, como se representa en la figura 6.387.

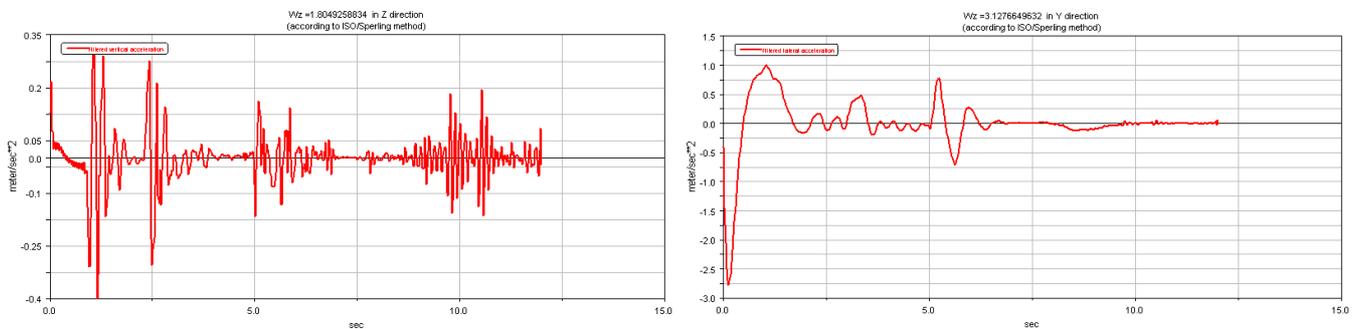


Figura 6.387. W_{zz} y W_{zy} . $R = 300$ m; $V = 35$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 3,201$ y $W_{zy} = 3,422$, según Sperling, como se representa en la figura 6.388.

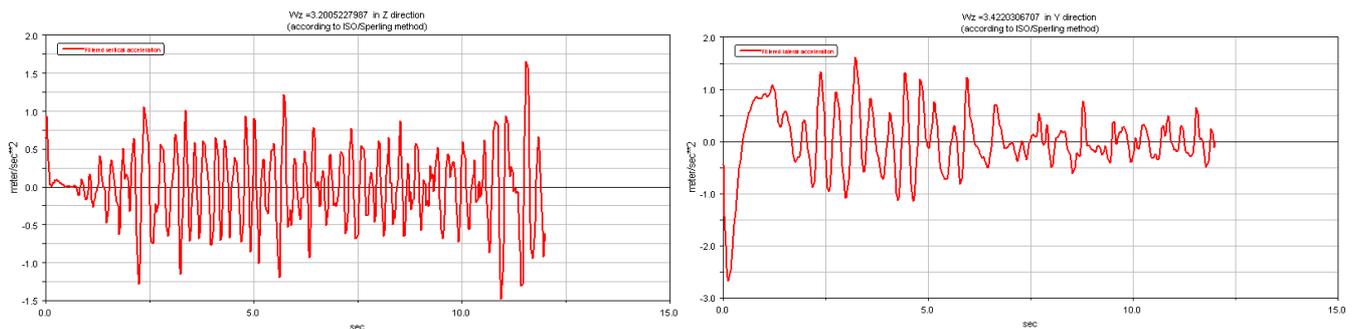


Figura 6.388. $W_{zz}lreg$ y $W_{zy}lreg$. $R = 300$ m; $V = 35$ m/s

6.8.3 Radio de curvatura de 400 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos según Sperling, para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto consta de una curva de 400 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 0,648$ y $W_{zy} = 1,278$, según Sperling, como se representa en la figura 6.389.

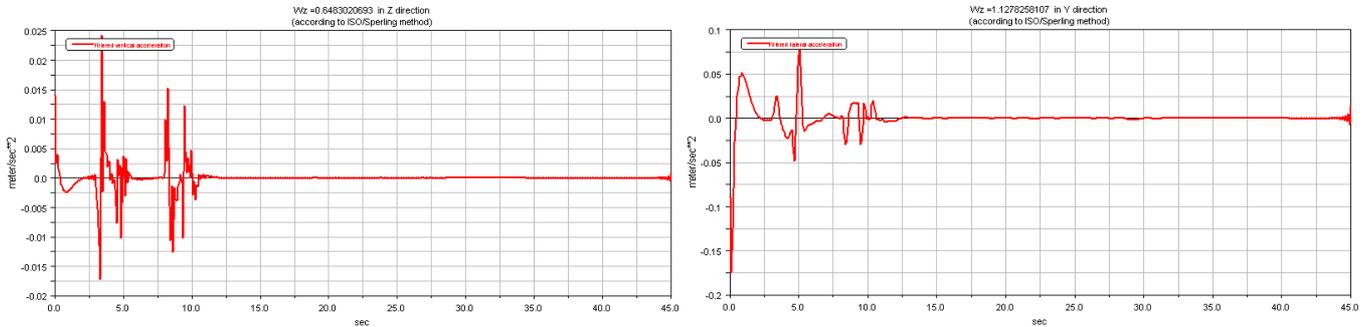


Figura 6.389. W_{zz} y W_{zy} . $R = 400$ m; $V = 10$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,433$ y $W_{zy} = 1,978$, según Sperling, como se representa en la figura 6.390.

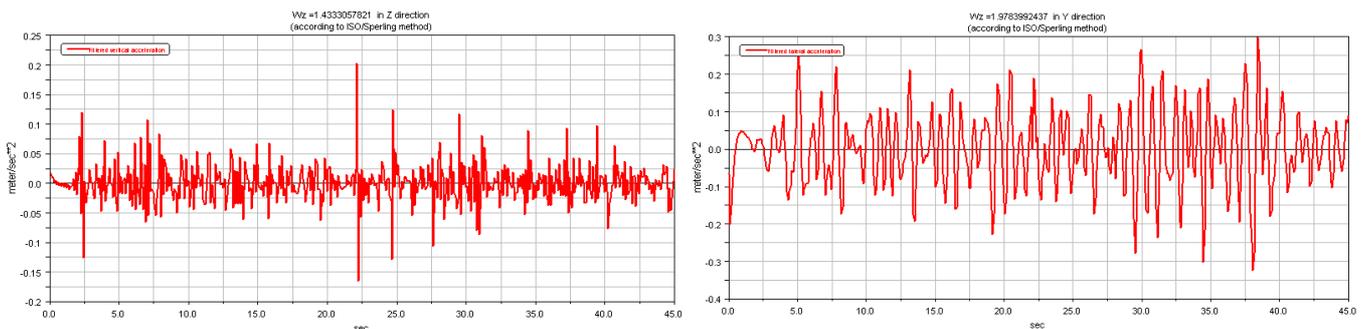


Figura 6.390. $W_{zz} Irreg$ y $W_{zy} Irreg$. $R = 400$ m; $V = 10$ m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 0,870$ y $W_{zy} = 1,468$, según Sperling, como se representa en la figura 6.391.

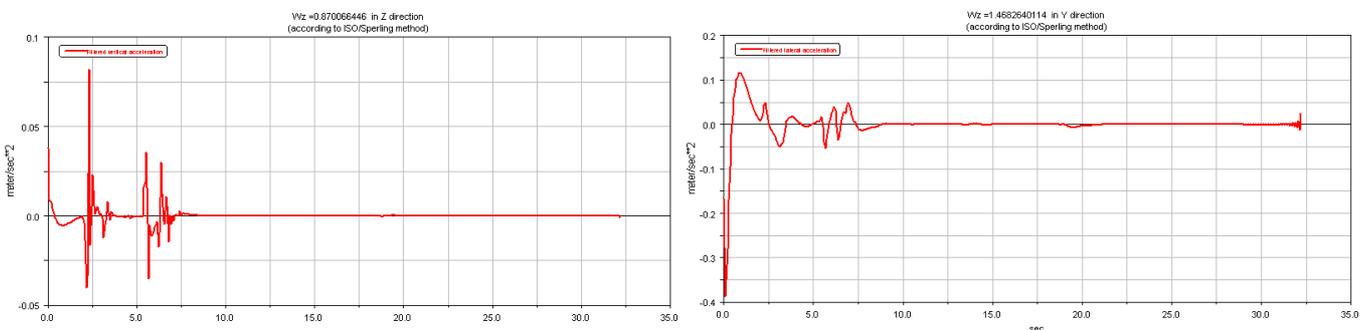


Figura 6.391. W_{zz} y W_{zy} . $R = 400$ m; $V = 15$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_z = 2,142$ y $W_{zy} = 2,306$, según Sperling, como se representa en la figura

6.392. En cual se caracteriza por un índice bastante alto debido a las oscilaciones presentes al final del grafico.

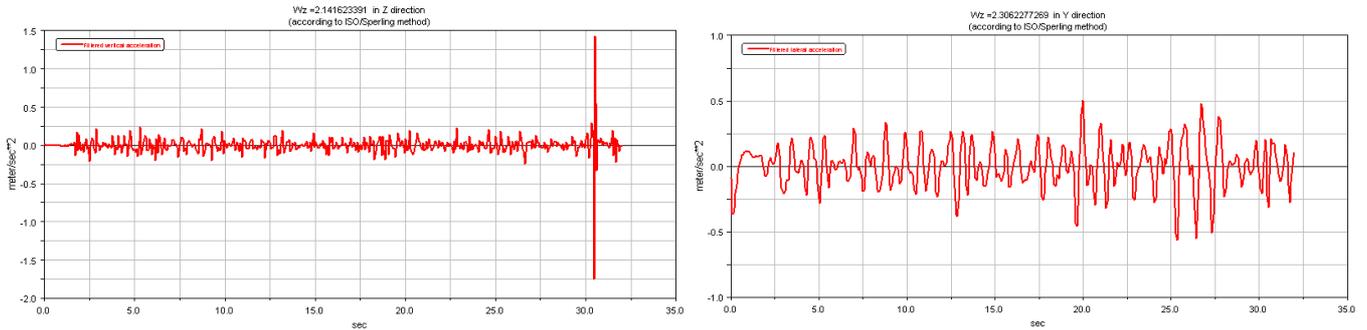


Figura 6.392. $W_{zz}lreg$ y $W_{zy}lreg$. $R = 400$ m; $V = 15$ m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,434$ y $W_{zy} = 1,864$, según Sperling, como se representa en la figura 6.393.

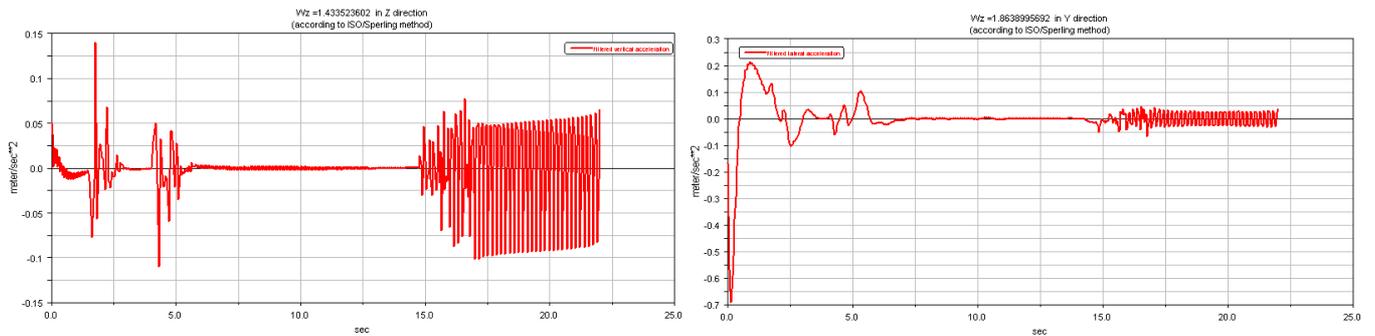


Figura 6.393. W_{zz} y W_{zy} . $R = 400$ m; $V = 20$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,169$ y $W_{zy} = 2,378$, según Sperling, como se representa en la figura 6.394.

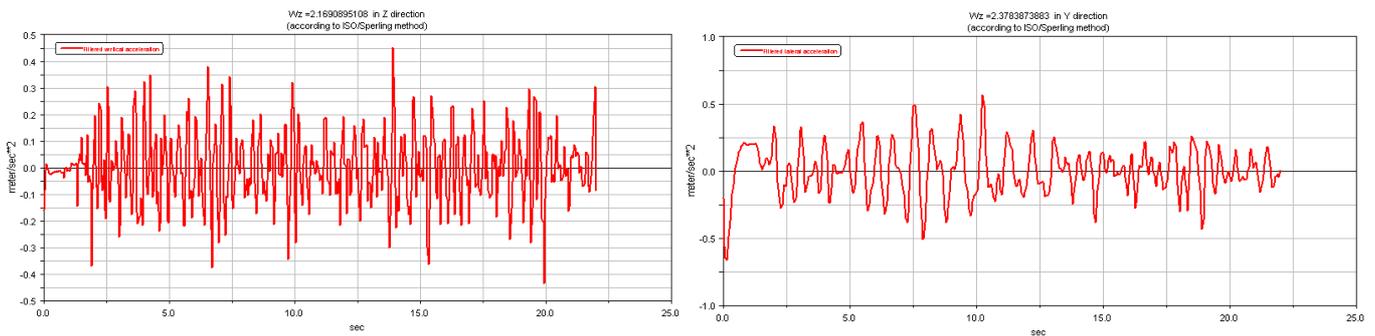


Figura 6.394. $W_{zz}lreg$ y $W_{zy}lreg$. $R = 400$ m; $V = 20$ m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,678$ $W_{zy} = 2,282$, según Sperling, como se representa en la figura 6.395.

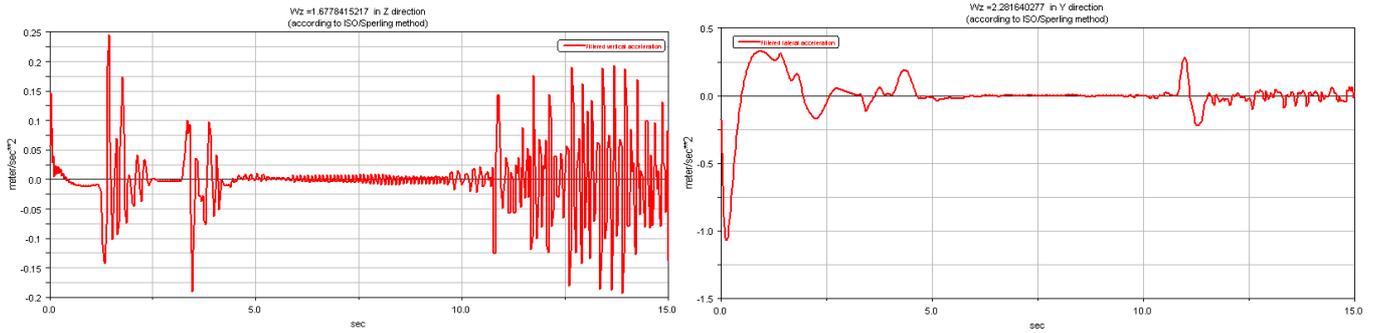


Figura 6.395. W_{zz} y W_{zy} . $R = 400\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,551$ y $W_{zy} = 2,687$, según Sperling, como se representa en la figura 6.396.

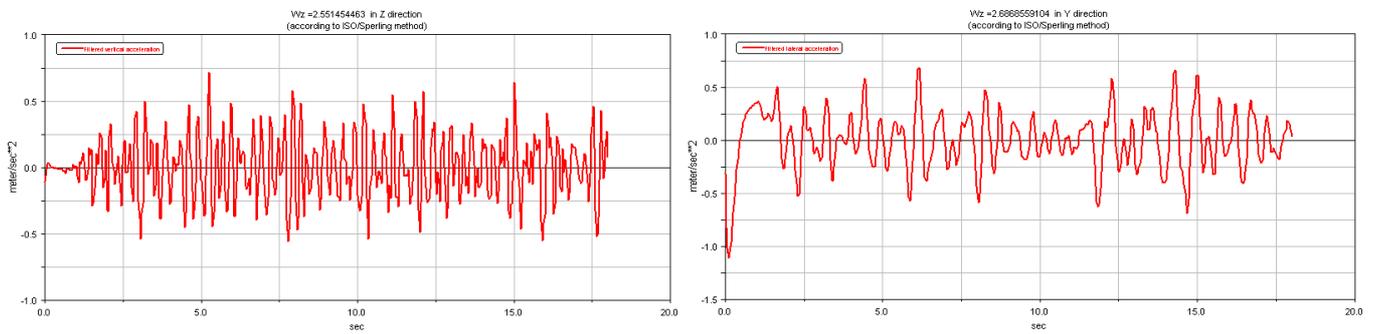


Figura 6.396. $W_{zzIrreg}$ y $W_{zyIrreg}$. $R = 400\text{ m}$; $V = 25\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,708$ y $W_{zy} = 2,525$, según Sperling, como se representa en la figura 6.397.

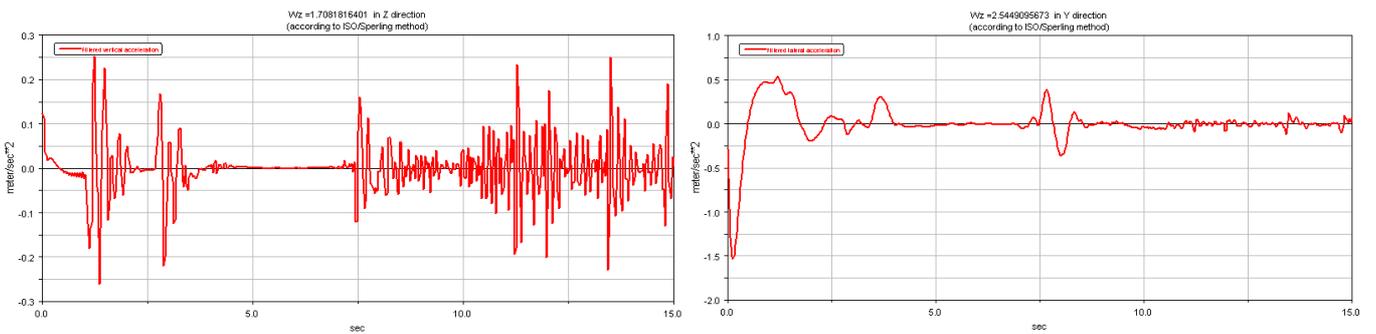


Figura 6.397. W_{zz} y W_{zy} . $R = 400\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,878$ y $W_{zy} = 3,023$, según Sperling, como se representa en la figura 6.398.

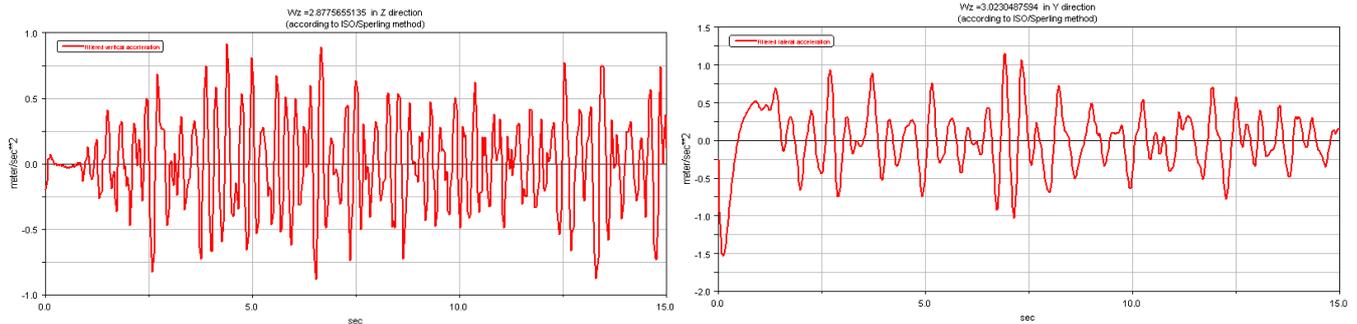


Figura 6.398. $W_{z1}rreg$ y $W_{z2}lreg$. $R = 400$ m; $V = 30$ m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,848$ y $W_{zy} = 2,897$, según Sperling, como se representa en la figura 6.399.

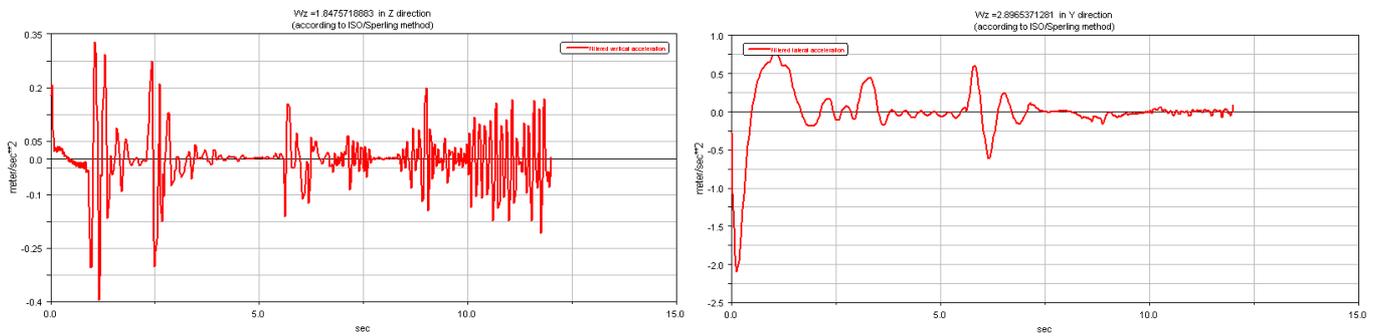


Figura 6.399. W_{zz} y W_{zy} . $R = 400$ m; $V = 35$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 3,176$ y $W_{zy} = 3,390$, según Sperling, como se representa en la figura 6.400.

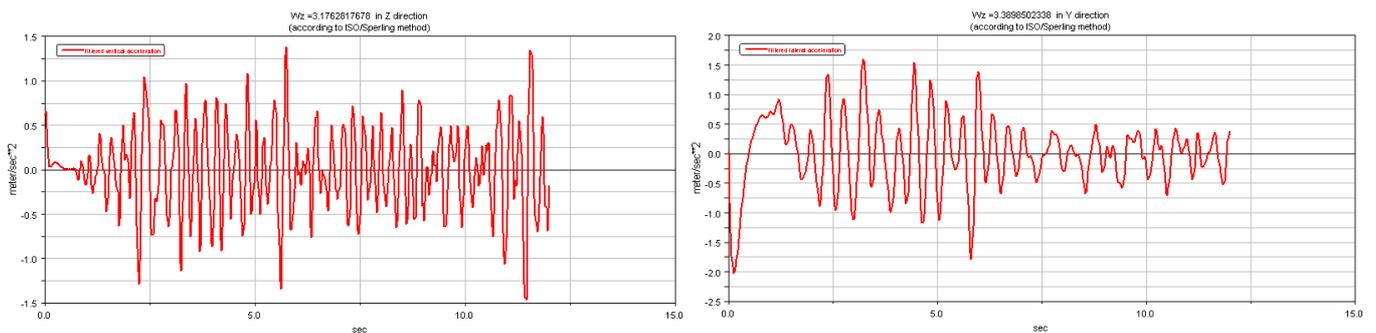


Figura 6.400. $W_{z1}rreg$ y $W_{z2}lreg$. $R = 400$ m; $V = 35$ m/s

6.8.4 Radio de curvatura de 500 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos según Sperling, para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto consta de una curva de 500 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 0,643$ y $W_{zy} = 1,081$, según Sperling, como se representa en la figura 6.401.

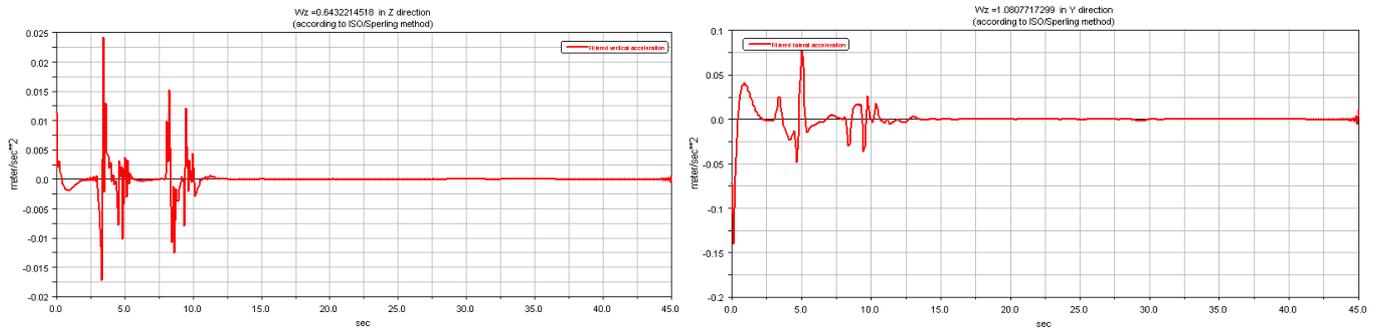


Figura 6.401. W_{zz} y W_{zy} . $R = 500$ m; $V = 10$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,385$ y $W_{zy} = 1,981$, según Sperling, como se representa en la figura 6.402.

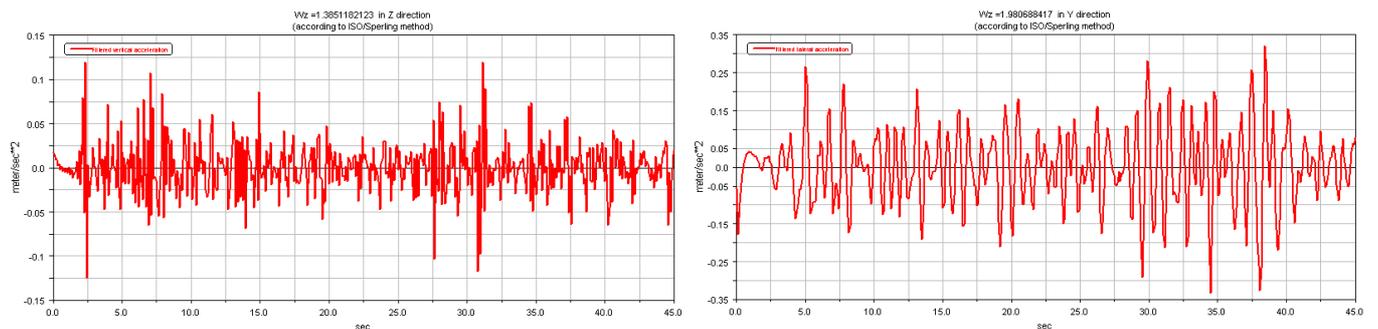


Figura 6.402. $W_{zz} Irreg$ y $W_{zy} Irreg$. $R = 500$ m; $V = 10$ m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 0,864$ y $W_{zy} = 1,383$, según Sperling, como se representa en la figura 6.403.

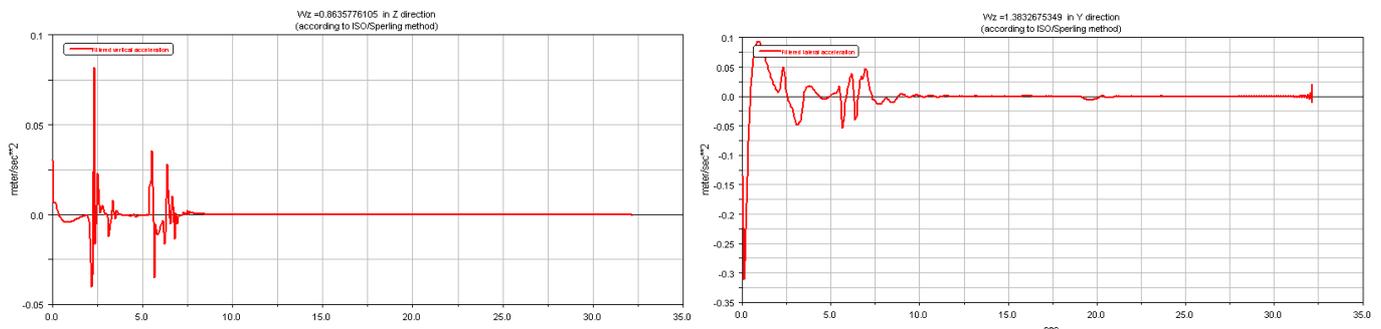


Figura 6.403. W_{zz} y W_{zy} . $R = 500$ m; $V = 15$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,907$ y $W_{zy} = 2,364$, según Sperling, como se representa en la figura 6.404.

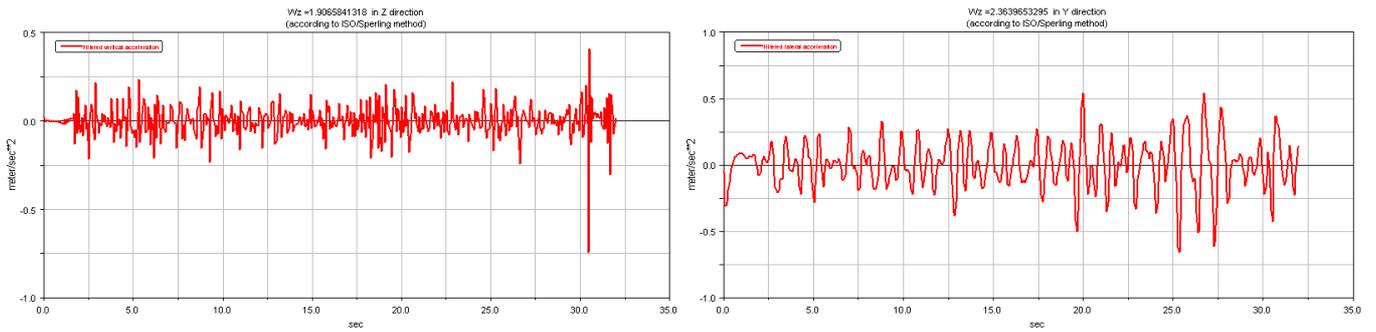


Figura 6.404. $W_{zz}Irreg$ y $W_{zy}Irreg$. $R = 500$ m; $V = 15$ m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,058$ y $W_{zy} = 1,719$, según Sperling, como se representa en la figura 6.405.

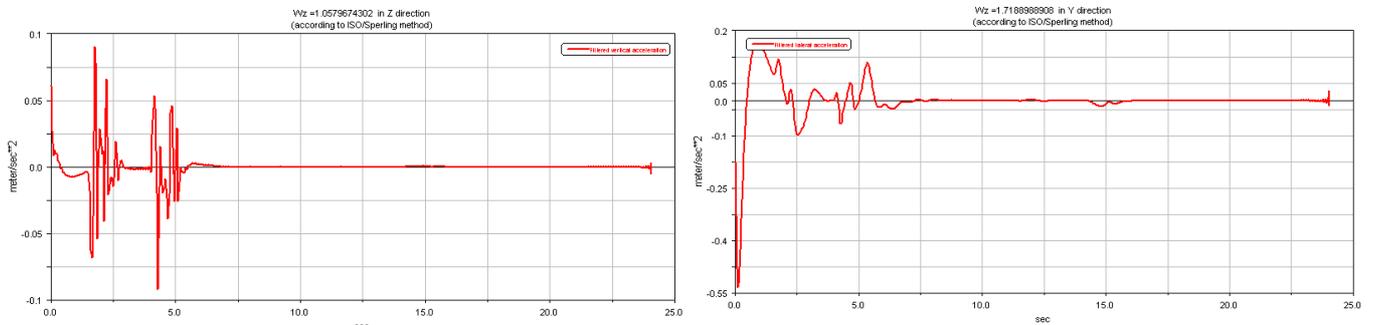


Figura 6.405. W_{zz} y W_{zy} . $R = 500$ m; $V = 20$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,179$ y $W_{zy} = 2,452$, según Sperling, como se representa en la figura 6.406.

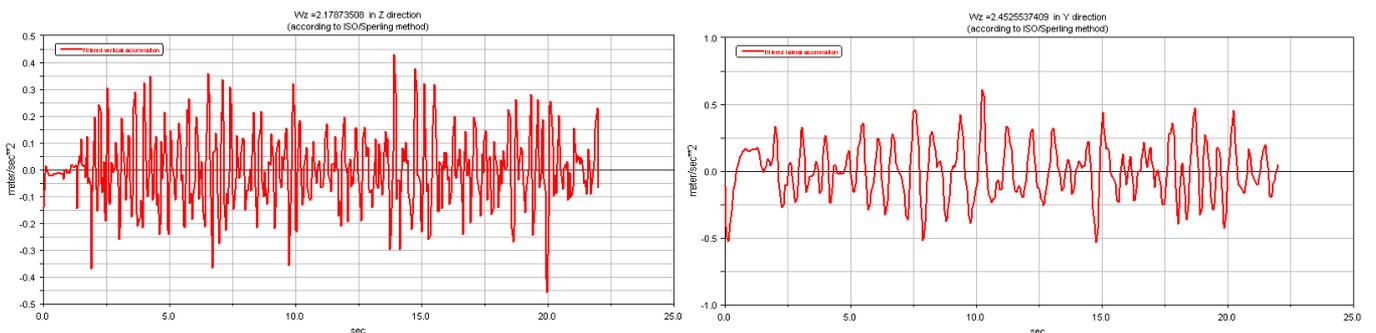


Figura 6.406. $W_{zz}Irreg$ y $W_{zy}Irreg$. $R = 500$ m; $V = 20$ m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,485$ y $W_{zy} = 2,134$, según Sperling, como se representa en la figura 6.407.

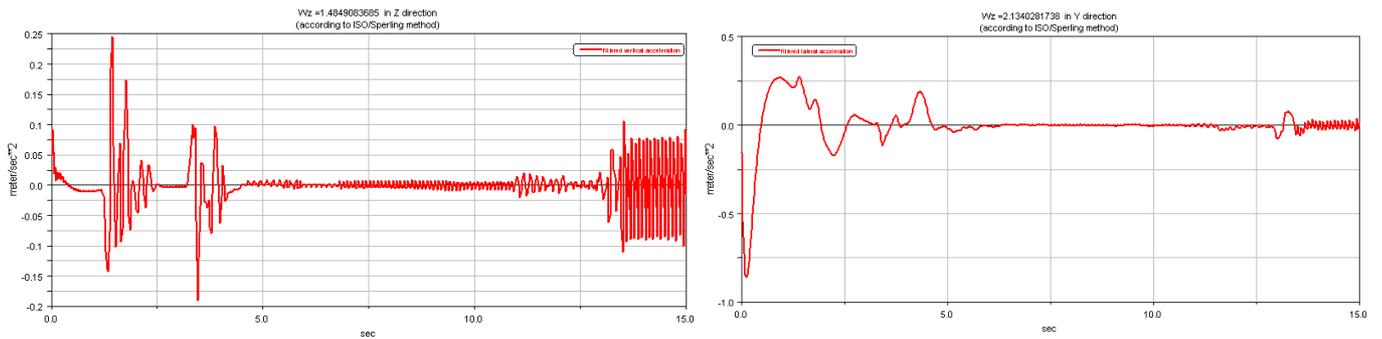


Figura 6.407. W_{zz} y W_{zy} . $R = 500$ m; $V = 25$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2.546$ y $W_{zy} = 2.624$, según Sperling, como se representa en la figura 6.408.

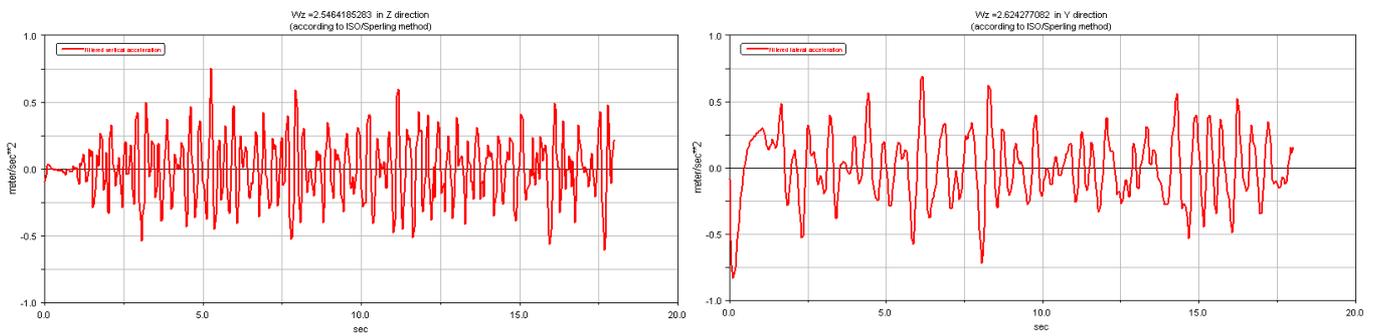


Figura 6.408. $W_{zz}Irreg$ y $W_{zy}Irreg$. $R = 500$ m; $V = 25$ m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,727$ y $W_{zy} = 2,400$, según Sperling, como se representa en la figura 6.409.

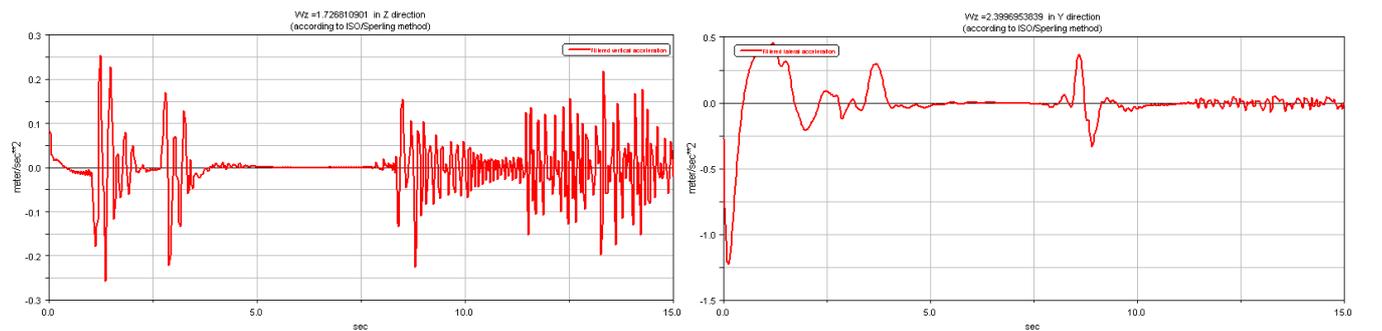


Figura 6.409. W_{zz} y W_{zy} . $R = 500$ m; $V = 30$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,860$ y $W_{zy} = 3,044$, según Sperling, como se representa en la figura 6.410.

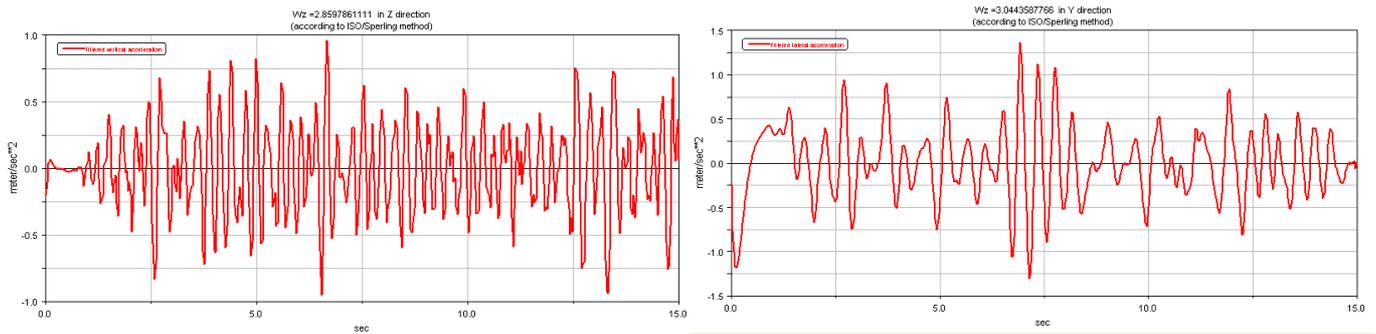


Figura 6.410. $W_{zz}lreg$ y $W_{zy}lreg$. $R = 500$ m; $V = 30$ m/s

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,769$ y $W_{zy} = 2,739$, según Sperling, como se representa en la figura 6.411.

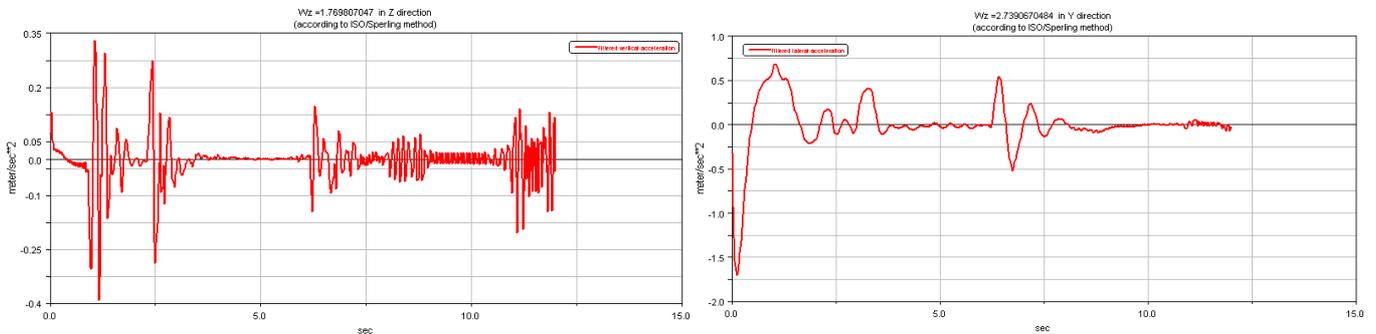


Figura 6.411. W_{zz} y W_{zy} . $R = 500$ m; $V = 35$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 3,162$ y $W_{zy} = 3,394$, según Sperling, como se representa en la figura 6.412.

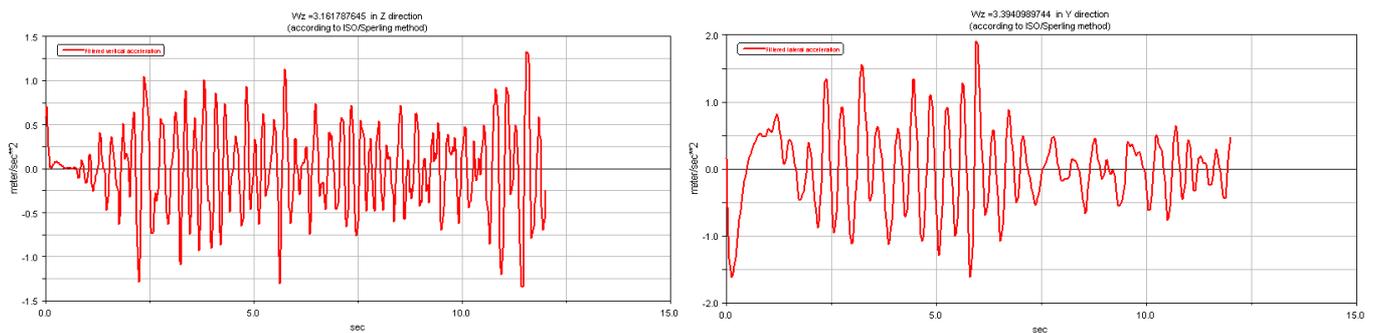


Figura 6.412. $W_{zz}lreg$ y $W_{zy}lreg$. $R = 500$ m; $V = 35$ m/s

6.8.5 Radio de curvatura de 600 m

A continuación se exponen los índices de confort obtenidos según Sperling, para los diferentes casos a estudio, teniendo en cuenta que el trayecto consta de una curva de 600 metros de radio:

- **Velocidad de circulación 10 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 0,798$ y $W_{zy} = 1,136$, según Sperling, como se representa en la figura 6.413.

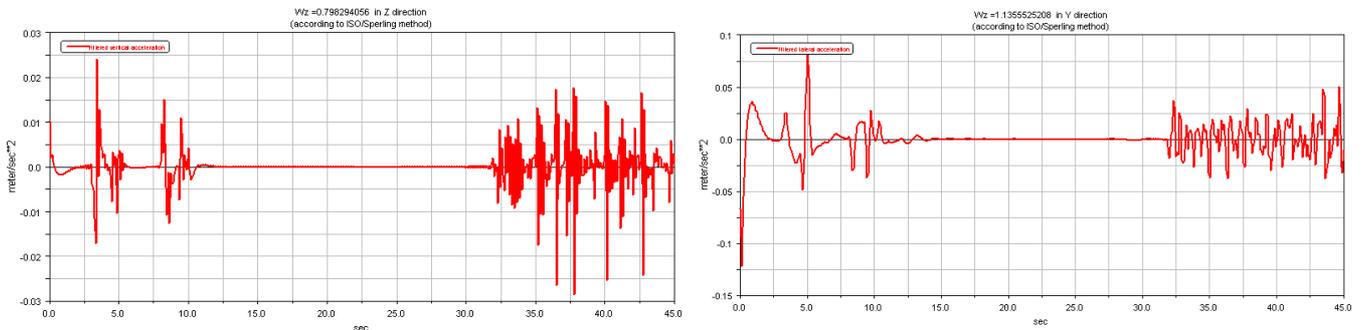


Figura 6.413. W_{zz} y W_{zy} . $R = 600$ m; $V = 10$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,394$ y $W_{zy} = 1,994$, según Sperling, como se representa en la figura 6.414.

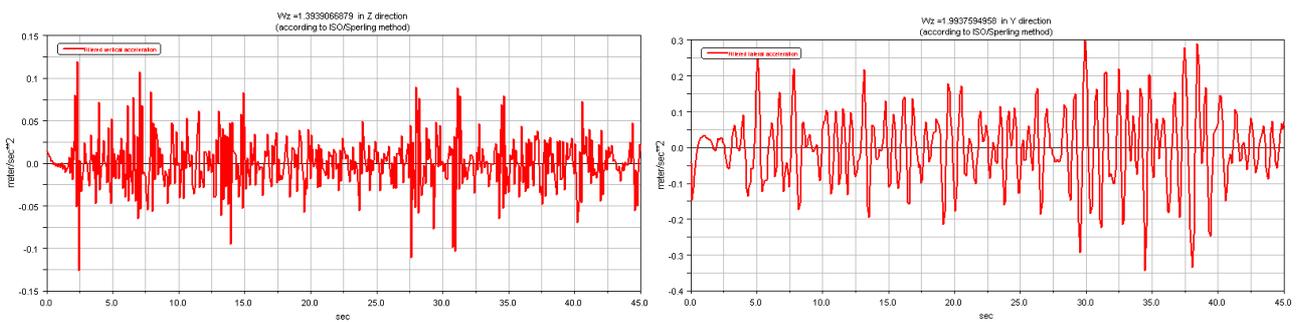


Figura 6.414. $W_{zz} Irreg$ y $W_{zy} Irreg$. $R = 600$ m; $V = 10$ m/s

- **Velocidad de circulación 15 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 0,859$ y $W_{zy} = 1,322$, según Sperling, como se representa en la figura 6.415.

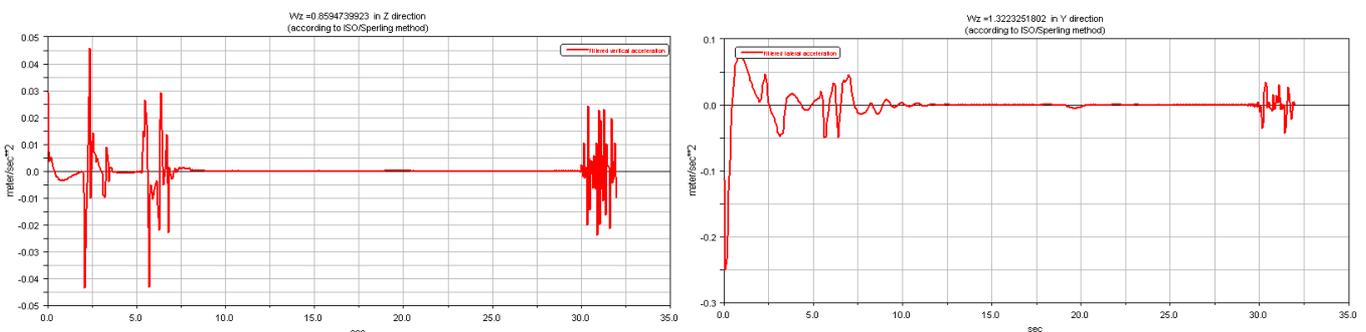


Figura 6.415. W_{zz} y W_{zy} . $R = 600$ m; $V = 15$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,504$ y $W_{zy} = 2,433$, según Sperling, como se representa en la figura 6.416. Como en casos anteriores, unas grandes perturbaciones al final del

estudio, han repercutido negativamente en su valor, destacando un mayor valor con respecto al eje Z.

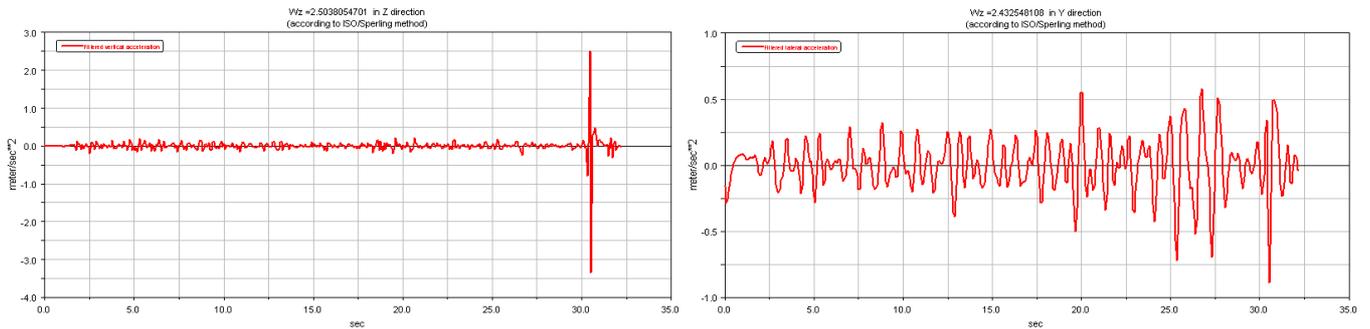


Figura 6.416. $W_{zz}Irreg$ y $W_{zy}Irreg$. $R = 600$ m; $V = 15$ m/s

- **Velocidad de circulación 20 m/s**

En ausencia de irregularidades vagón se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,055$ y $W_{zy} = 1,640$, según Sperling, como se representa en la figura 6.417.

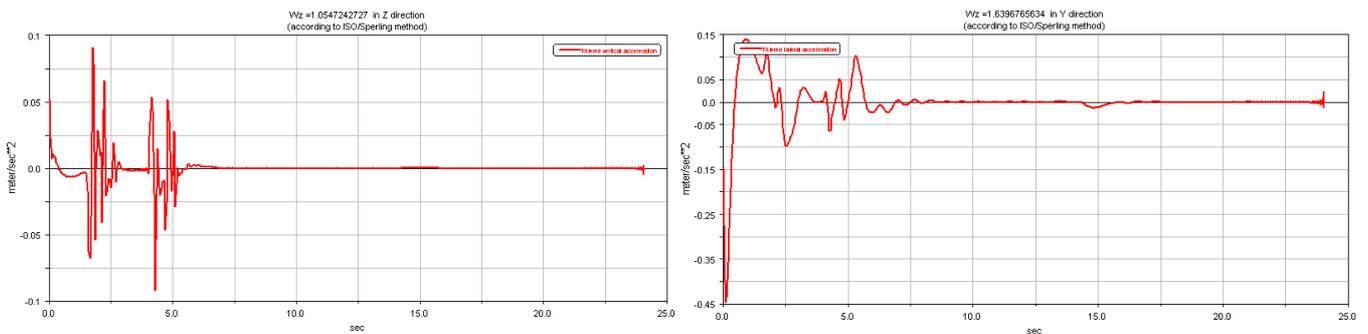


Figura 6.417. W_{zz} y W_{zy} . $R = 600$ m; $V = 20$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,208$ y $W_{zy} = 2,515$, según Sperling, como se representa en la figura 6.418.

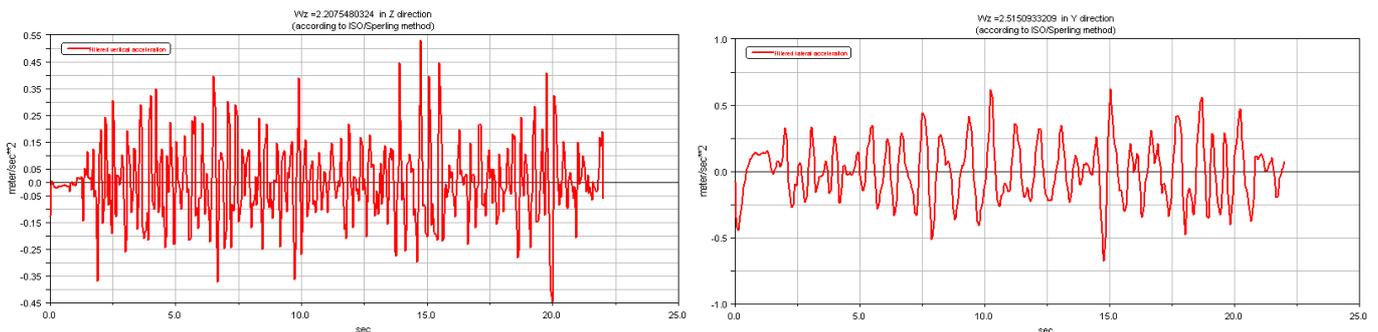


Figura 6.418. $W_{zz}Irreg$ y $W_{zy}Irreg$. $R = 600$ m; $V = 20$ m/s

- **Velocidad de circulación 25 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,309$ y $W_{zy} = 1,950$, según Sperling, como se representa en la figura 6.419.

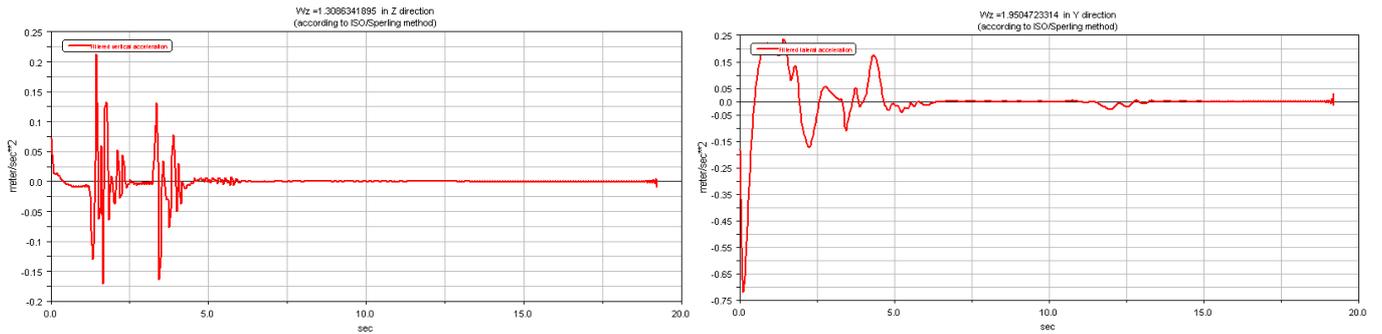


Figura 6.419. W_{zz} y W_{zy} . $R = 600$ m; $V = 25$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,568$ y $W_{zy} = 2,680$, según Sperling, como se representa en la figura 6.420.

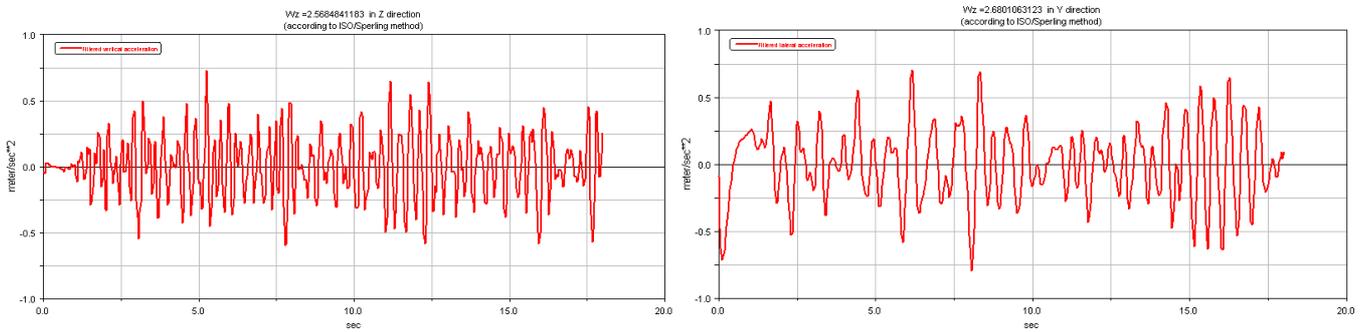


Figura 6.420. $W_{zz}lreg$ y $W_{zy}lreg$. $R = 600$ m; $V = 25$ m/s

- **Velocidad de circulación 30 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,702$ y $W_{zy} = 2,310$, según Sperling, como se representa en la figura 6.421.

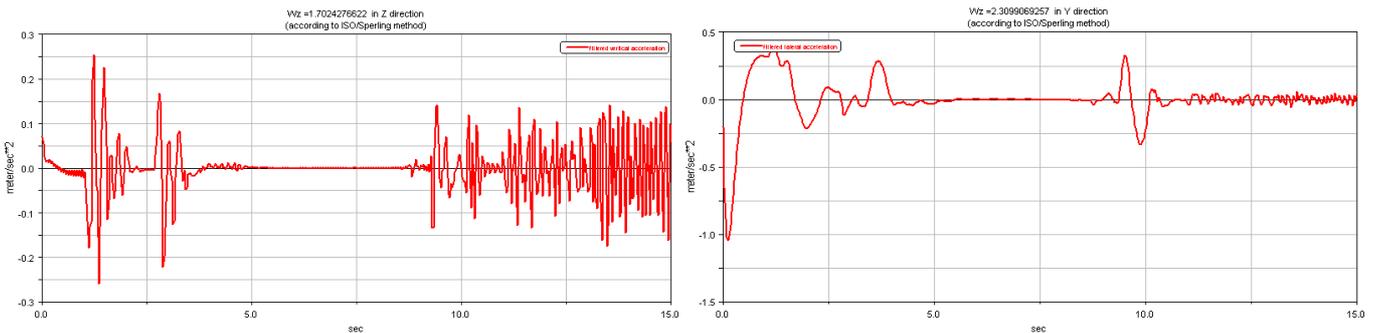


Figura 6.421. W_{zz} y W_{zy} . $R = 600$ m; $V = 30$ m/s

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 2,907$ y $W_{zy} = 3,032$, según Sperling, como se representa en la figura 6.422.

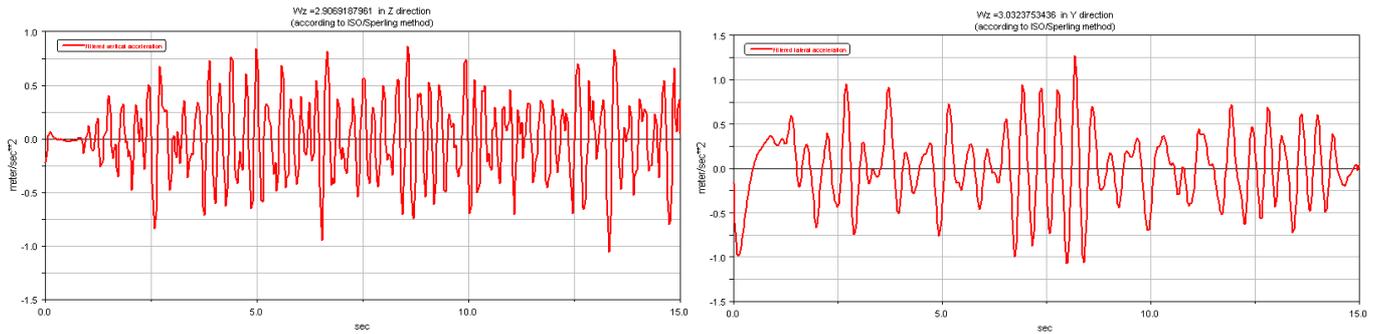


Figura 6.422. $W_{zz}Irreg$ y $W_{zy}Irreg$. $R = 600\text{ m}$; $V = 30\text{ m/s}$

- **Velocidad de circulación 35 m/s**

En ausencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 1,755$ y $W_{zy} = 2,620$, según Sperling, como se representa en la figura 6.423.

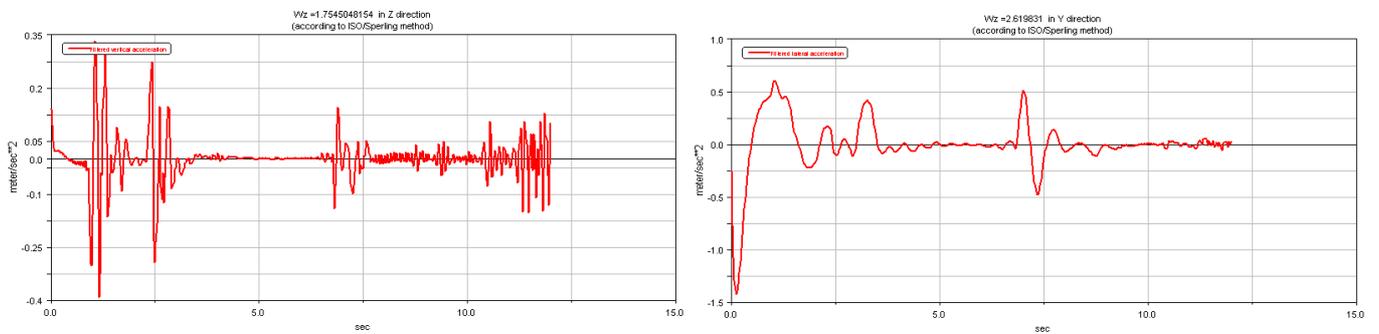


Figura 6.423. W_{zz} y W_{zy} . $R = 600\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

En presencia de irregularidades se ha obtenido unos índices de confort de $W_{zz} = 3,164$ y $W_{zy} = 3,467$, según Sperling, como se representa en la figura 6.424.

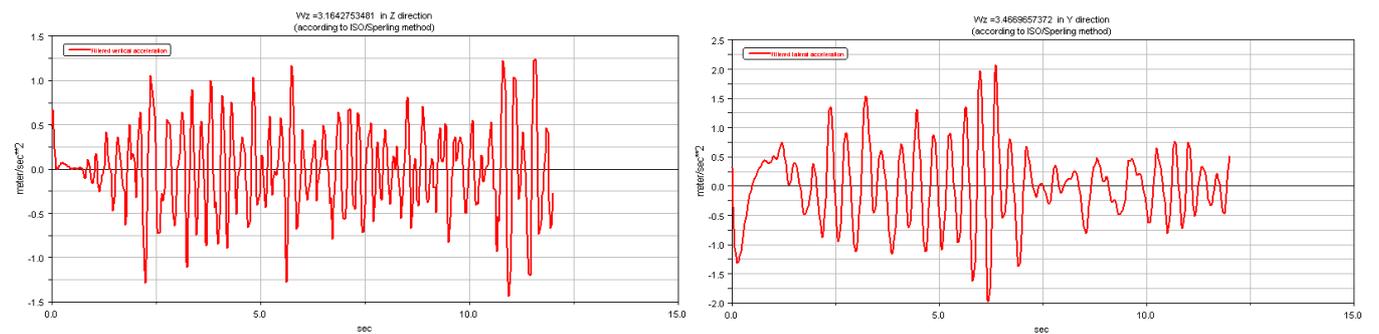


Figura 6.424. $W_{zz}Irreg$ y $W_{zy}Irreg$. $R = 600\text{ m}$; $V = 35\text{ m/s}$

6.9 Comparativa

A partir de los índices de confort anteriormente obtenidos, se pueden comparar los resultados calculados en los apartados anteriores, según la norma UIC 513 y Sperling, teniendo en cuenta que ha sido tomado el mayor valor de los índices de confort obtenidos mediante Sperling, generalmente W_{zy} , para cada uno de los casos a estudio. Por lo tanto, para facilitar la comprensión de los resultados, se ha construido la tabla 12.

Tabla 12. Comparación resultados. Índices de confort

Radio de curvatura (m)	Velocidad (m/s)	Presencia de irregularidades	N_{MV}	Calificación	Wz_{max}	Calificación	
200	10	NO	0,411	Muy confortable	1,223	Notoria	
		SI	0,720	Muy confortable	1,934	Claramente visible	
	15	NO	0,823	Muy confortable	1,815	Claramente visible	
		SI	1,215	Confortable	2,129	Claramente visible	
	20	NO	1,632	Confortable	2,278	Más pronunciada, pero no desagradable	
		SI	2,169	Medio	2,729	Más pronunciada, pero no desagradable	
	25	NO	2,675	Medio	2,868	Fuerte, irregular, pero tolerable	
		SI	3,443	Medio	3,066	Fuerte, irregular, pero tolerable	
	30	NO	3,879	Medio	3,087	Fuerte, irregular, pero tolerable	
		SI	4,953	Inconfortable	3,276	Muy irregular	
	300	10	NO	0,226	Muy confortable	1,201	Notoria
			SI	0,754	Muy confortable	1,956	Claramente visible
15		NO	0,531	Muy confortable	1,587	Claramente visible	
		SI	1,072	Confortable	2,220	Claramente visible	
20		NO	1,155	Confortable	2,030	Claramente visible	
		SI	1,647	Confortable	2,469	Más pronunciada, pero no desagradable	
25		NO	1,829	Confortable	2,391	Más pronunciada, pero no desagradable	
		SI	2,686	Medio	2,822	Fuerte, irregular, pero tolerable	
30		NO	2,636	Medio	2,749	Más pronunciada, pero no desagradable	
		SI	3,909	Medio	3,047	Fuerte, irregular, pero tolerable	
35		NO	3,753	Medio	3,128	Muy irregular	
		SI	5,516	Muy inconfortable	3,422	Extremadamente irregular	
400	10	NO	0,189	Muy confortable	1,278	Notoria	
		SI	1,285	Confortable	1,978	Claramente visible	

		NO	0,417	Muy confortable	1,468	Notoria	
	15	SI	1,367	Confortable	2,306	Más pronunciada, pero no desagradable	
		NO	0,861	Muy confortable	1,864	Claramente visible	
	20	SI	1,600	Confortable	2,378	Más pronunciada, pero no desagradable	
		NO	1,477	Confortable	2,282	Más pronunciada, pero no desagradable	
	25	SI	2,383	Medio	2,687	Más pronunciada, pero no desagradable	
		NO	2,055	Medio	2,525	Más pronunciada, pero no desagradable	
	30	SI	3,556	Medio	3,023	Fuerte, irregular, pero tolerable	
		NO	2,911	Medio	2,897	Fuerte, irregular, pero tolerable	
	35	SI	5,171	Muy inconfortable	3,390	Extremadamente irregular	
500		NO	0,167	Muy confortable	1,081	Notoria	
	10	SI	0,874	Muy confortable	1,981	Claramente visible	
		NO	0,347	Muy confortable	1,383	Notoria	
	15	SI	1,544	Confortable	2,364	Más pronunciada, pero no desagradable	
		NO	0,674	Muy confortable	1,719	Claramente visible	
	20	SI	1,617	Confortable	2,452	Más pronunciada, pero no desagradable	
		NO	1,161	Confortable	2,134	Claramente visible	
	25	SI	2,198	Medio	2,624	Más pronunciada, pero no desagradable	
		NO	1,709	Confortable	2,400	Más pronunciada, pero no desagradable	
	30	SI	3,481	Medio	3,044	Fuerte, irregular, pero tolerable	
		NO	2,420	Medio	2,739	Fuerte, irregular, pero tolerable	
	35	SI	4,885	Inconfortable	3,394	Extremadamente irregular	
	600	10	NO	0,161	Muy	1,136	Notoria

		confortable			
15	SI	0,910	Muy confortable	1,994	Claramente visible
	NO	0,293	Muy confortable	1,322	Notoria
20	SI	1,668	Confortable	2,504	Más pronunciada, pero no desagradable
	NO	0,579	Muy confortable	1,640	Claramente visible
25	SI	1,751	Confortable	2,515	Más pronunciada, pero no desagradable
	NO	0,968	Muy confortable	1,950	Claramente visible
30	SI	2,350	Medio	2,680	Más pronunciada, pero no desagradable
	NO	1,502	Confortable	2,320	Más pronunciada, pero no desagradable
35	SI	3,587	Medio	3,032	Fuerte, irregular, pero tolerable
	NO	2,097	Medio	2,620	Más pronunciada, pero no desagradable
	SI	4,875	Inconfortable	3,467	Extremadamente irregular

Según la norma UIC 513, podemos comprobar que para el rango de velocidades estudiado, así como para los diferentes radios de curvatura, el modelo simulado, en ausencia de irregularidades, no llega a alcanzar un estado de inconfortabilidad que pudiera perturbar el tránsito del vehículo ferroviario; a excepción del caso estudiado para una velocidad de 35 m/s y un curva de 200 metros de radio, en el cual, el vehículo descarrila debido a las altas aceleraciones centrífugas presentes en esas condiciones de marcha.

En el caso de la presencia de irregularidades, las aceleraciones aumentan su valor, así como las oscilaciones de las mismas, obteniendo por tanto unos índices de confort peores que en ausencia de las irregularidades, en este caso se llega incluso al estado de mayor inconfortabilidad, obtenido para unas curvas de 300 y 400 metros de radio, para una velocidad de 35 m/s.

Como se puede observar en la tabla 12, los índices obtenidos por Sperling, nos informan de la cuantía de las perturbaciones durante la simulación, en el caso de la ausencia de las irregularidades, este valor pasa por los diferentes casos desde una notoria presencia de las vibraciones del vagón, pero no visibles, a aquellas perturbaciones que son muy irregulares, mientras que en presencia de irregularidades el modelo llega a alcanzar estados de extrema irregularidad.

Comparando los dos índices, se puede ver que generalmente para los estados muy confortable y confortable según la norma UIC 513, se corresponde con una presencia notoria o claramente visible de las vibraciones según Sperling; con respecto a un estado medio de confort, según la norma UIC 513, se corresponden normalmente según Sperling a

la existencia de perturbaciones más pronunciadas pero no desagradables, así como, a oscilaciones fuertes, irregulares pero aun tolerables. Por último los estados incómodos y muy incómodos, están relacionados con los índices muy irregular y fuertemente irregular dados por Sperling.

Por lo tanto una vez comparado los resultados obtenidos por los dos índices de confort utilizados, se puede considerar aceptable una velocidad de hasta unos 30 m/s, debido a que valores mayores provocan grandes vibraciones en el vagón estudiado.

7. Conclusiones

7.1 Conclusiones

De manera general y tras el estudio de los índices de confort, se puede afirmar que:

- La presencia de irregularidades repercute significativamente en el modelo obteniendo, a medida que aumenta la velocidad, una mayor diferencia en los índices de confort, así como una disminución de los respectivos incrementos porcentuales. Según la norma UIC 513, la mayor variación en los índices de confort se produce para un radio de curvatura de 600 metros y una velocidad de 35 m/s, obteniendo una diferencia de 2,778, ocasionando un incremento del 138,81 %; destacando que, los mayores incrementos porcentuales tienen lugar para bajas velocidades, debido a los pequeños valores que toman los índices de confort en estas circunstancias. Con respecto a los índices obtenidos mediante Sperling, se puede comprobar que la mayor diferencia debida a las irregularidades se produce para un radio de curvatura de 600 metros y una velocidad de 15 m/s, obteniéndose una variación en los valores de 1,182, ocasionando un incremento del 89,41 %. De manera general, se puede decir que tanto el aumento de la velocidad, como la disminución del radio de curvatura, permiten reducir las diferencias obtenidas ante la presencia y ausencia de las irregularidades.
- El aumento de velocidad repercute negativamente en el confort del vehículo, produciendo variaciones en el índice de confort según la norma UIC 513 de hasta 3,527, ocasionando un incremento de 843,8 % debido al aumento de la velocidad de 10 a 35 m/s; este valor ha sido obtenido para un radio de curvatura de 300 metros, en ausencia de irregularidades. Ante la presencia de perturbaciones en la vía, la diferencia entre los índices de confort aumenta hasta un valor de 4,762, obteniendo un incremento de 631,56 %, produciéndose, al igual que en el caso anterior, para una curva de 300 metros de radio. Con respecto a los valores obtenidos según Sperling, los incrementos porcentuales obtenidos son menores que en la norma UIC, obteniendo un incremento en ausencia de irregularidades, para un radio de curvatura de 300 metros, de un 160,45 %, para una diferencia de 1,927 y de un 73,87 %, para una variación de 1,473, ocasionado para una curva de 600 metros de radio, y ante la presencia de irregularidades. Por lo tanto, se llega a la conclusión de que el aumento de velocidad repercute de manera más negativa en el confort del vehículo que la existencia de las irregularidades, como se puede ver comparando los valores obtenidos con respecto al punto anterior.
- Cuanto mayor sea el radio de curvatura del trazado ferroviario, mejor se comporta el vehículo. Según la norma UIC 513, la mayor disminución se produce para una velocidad de 30 m/s, pasando de 200 a 600 metros de radio, obteniendo un valor de 2,377, lo cual, produce un decremento del 61,28 % en ausencia de irregularidades. Ante la presencia de irregularidades, la variación obtenida es menor, dando un valor de 1,366, proporcionando un decremento del 27,58 %. Mediante Sperling, los

resultados pueden resultar contradictorios, debido a la proximidad de sus valores, por ese motivo, y ante la ausencia de irregularidades, la mayor disminución se produce para una velocidad de 25 m/s, dando un valor de 0,918, con un decremento del 32 %; mientras que, ante la presencia de imperfecciones en la vía, la mayor disminución se produce para una velocidad de 25 m/s, proporcionando un valor de 0,386, consiguiendo un decremento del 12,59 %. Cabe destacar que, las máximas variaciones deberían producirse para una velocidad de 35 m/s, pero debido a la ausencia de dicho valor para un radio de curvatura de 200 metros, como consecuencia del descarrilamiento del vagón, su valor no ha podido ser calculado. De manera general, se comprueba que el aumento del radio de curvatura, mejora el comportamiento del vehículo. Pero comparando los valores obtenidos con respecto a los puntos anteriores puede decirse que, el radio de curvatura, influye en el confort en menor medida que la velocidad y que las irregularidades.

- Se destaca una mayor influencia en el confort del vehículo de la velocidad, debido a la mayor variación de los índices de confort, con respecto a la diferencia ocasionada con el aumento del radio de curvatura, como se puede comprobar en los dos puntos anteriores.
- La situación más desfavorable estudiada, correspondiente a un radio de curvatura de 200 metros y una velocidad de simulación de 35 m/s, produce el descarrilamiento del vagón. Por lo tanto, a partir de los resultados obtenidos, es recomendable que el vehículo no supere los 30 m/s, tanto para evitar los posibles descarrilamientos, como aquellas situaciones de mayor infortabilidad.
- Según las características de la carga a transportar, así como el trazado a seguir por el ferrocarril, se tienen que definir las velocidades máximas permitidas para cada una de los radios de curvatura presentes, con el objetivo de mantener unos índices de confort uniformes y adecuados para evitar el daño de la carga a transportar durante el trayecto.

7.2 Trabajos futuros

Tras la realización de este proyecto, se ha podido comprobar el potencial presente en este tipo de programas computacionales, gracias a ellos, se pueden llevar a cabo complejas simulaciones de diversos vehículos ferroviarios, reduciendo de este modo el coste que constituye la realización de pruebas con vehículos reales, por ese motivo, gracias a estos programas, se pueden llevar a cabo diversos estudios como los expuestos a continuación.

- Modificación de las propiedades de la suspensión de diversos bogies, con el objetivo de mejorar sus comportamientos durante su trayecto.
- Diseño de nuevos bogies con mejores características que los existentes en este momento, trabajando tanto en la reducción del número de componentes que los constituyen, por lo que se reduce su precio como el mantenimiento de los mismos, así como mejorar las características que definen su comportamiento, respecto a los bogies ya existentes.
- Estudio del confort en bogies de viajeros como pueden ser los ETR o los de la serie Shinkansen.

- Trabajar en la simulación de vehículos con caja inclinable, ya sea mediante basculación asistida o mediante pendulación natural. Estos sistemas son muy utilizados debido a su capacidad de compensar las aceleraciones centrífugas que aparecen en curva, consiguiendo un aumento de velocidad en curva sin disminución de la estabilidad del vehículo y del confort de los viajeros.
- Trabajar en la continua mejora de los programas computacionales, con el objetivo de ir obteniendo datos cada vez más similares a la respuesta real del tren, mejorando los modelados de los diferentes elementos que componen el tren, como por ejemplo la introducción de la flexibilidad en los ejes calados, lo cual, puede influir en el estudio de manera significativa. Además, se podría tratar de mejorar la interfaz gráfica de estos programas de simulación, haciéndola más accesibles al usuario menos expertos, siempre y cuando se mantengan las posibilidades de simulación de dicho software.

8. Referencias

- [1] Ahrons, E.L. *The British Steam Railway Locomotive 1825-1925*. London: Bracken Books. 1987. 391 p.
- [2] Goodwin, A. M. *The evolution of the British electric tramcar truck*. London: Tramway and Light Railway Society. 1977. 37 p.
- [3] Carter, F. W. *The electric locomotive. Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers 221*. London. 1916, p. 221-252.
- [4] Carter, F. W. *Railway Electric Traction*. London: Edward Arnold. 1922. 443 p.
- [5] Molatife, H; Hecht, M and Kadivar, M.H. *Critical speed and limit cycles in the empty Y25-freight wagon*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2006, p. 347-359
- [6] Bosso, N; Gugliotta, A and Somà, A. *Simulation of a freight bogie with friction dampers*. Adams/Rail Users' Conference. Haarlem, The Netherlands. 2000. 13 p
- [7] Orlova, A and Boronenko, Y. *The Anatomy of Railway Vehicle Running Gear*. En: Iwnicki, S. *Handbook of railway vehicle dynamics*. Florida: Taylor and Francis. 2006, p 39-85.
- [8] Walterhay, W. *Rail*. En: *Railroad engineering. Vol. 1*.U.S.A: John Wiley and Sons. 1982, p 484-562
- [9] Dahlberg, T. *Railway track dynamics – a survey*. Sweden: Linköping University. 2003. 50 p
- [10] Lopez Pita, A. *Características fundamentales de una vía ferroviaria*. En: *Infraestructuras ferroviarias*. España: Ediciones UPC. 2006, p 41-53.
- [11] Álvarez Mántaras, D y Luque Rodriguez, P. *La Vía*. En: *Ingeniería e infraestructura de los transportes*. España: Universidad de Oviedo. 2003, p 17-171.
- [12] Okamoto, I. *How Bogies Work*. En: *Japan Railway & Transport Review 18*. Japan: East Japan Railway Culture Foundation. 1998, p 52-61.
- [13] Carballeira, J; Baeza, L; Rovira, A and García, E. *Technical characteristics and dynamic modeling of Talgo train*. En: *Vehicle System Dynamics, Vol. 26*. London: Taylor and Francis. 2008, p 301-316
- [14] Meunier, J. *On the fast track: French railway Modernization and the Origins of the TGV 1944-1983*. U.S.A: Greenwood Publishing Group. 2002. 255 p
- [15] Wicknes, A. H. *Dynamics of the wheelset*. En: *Fundamentals of rail vehicle dynamics: guidance and stability*. The Netherlands: Swets and Zeitlinger B.V, 2003, p 71-107
- [16] Profillidis, V. A. *Rolling Stock*. En: *Railway management and engineering*. England: Ashgaet publishing. 2006, p 370-382.

- [17] Barry, J. W and Bramwell. F. J. *Railways and locomotives*. England:Longmans, Green and Co. 1882. 427 p.
- [18] Carter, F. W. *On the action of a locomotive driving wheel*. London: Proc. Royal Soc. Ser. A.Vol.113. 1926, p.151-157
- [19] Johnson, K. L. *The effect of a tangential force upon the rolling motion of an elastic sphere upon a plane*. J. Appl. Mech. Vol. 25. 1964, p 339-246.
- [20] Johnson, K. L and Vermeulen, P.J. *Contact of non-spherical bodies transmitting tangential forces*. J. Appl. Mech. Sci. Vol. 31. Capítulo 10 Referencia 172. 1964, p 338-340.
- [11] Haines, J and Ollerton, E. *Contact stress distribution on elliptical contact surfaces subjected to radial and tangential forces*. Proc. Inst. Mech. Eng. Vol. 177. 1963, p 95-144
- [22] Halling, J. *Microslip between a rolling element and it's track arising from geometric conformity*. J. Mech. Eng. Sci. Vol. 6. 1964, p 64-73
- [23] Kalker, J. J. *On the rolling contact for two elastic bodies in the presence of dry friction*. The Netherlands: PhD dissertation. Delf University of Technology . 1973. 80 p.
- [24] Hertz, H. *Gesamelte Werke. Vol. 1*. Leipzig. 1895. 155 p.
- [25] Kalker, J. J. *A fast algorithm for the simplified theory of rolling contact*. En: *Vehicle System Dynamics. Vol. 11*. London: Taylor and Francis. 1983, p 1-13.
- [26] Ayasse, J.B and Chollet, H. *Wheel Rail - Contact*. En: Iwnicki, S. *Handbook of railway vehicle dynamics*. Florida: Taylor and Francis. 2006, p 85-121.
- [27] Polach, O; Berg, M and Iwnicki. S. *Simulation*. En: Iwnicki, S. *Handbook of railway vehicle dynamics*. Florida: Taylor and Francis. 2006, p 359-423.
- [28] Oscarsson. J. *Dynamic train – track – ballast interaction: linear and state-dependent track models*. Thesis for the Dergee of Licentiate of Engineering, Department of Solid Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden, ISSN 0283- 672, 1999.
- [29] S.N. *Laden Wagon with Y25 bogie 22T axle load*. A/Rail model. April 2002. 6 p
- [30] Förstberg. J. *Ride comfort-human responses to vibration*. En : *Ride comfort and motion sickness in tilting trains*. Department of Vehicle Engineering Royal institute of technology. Stockholm. 2000. 234 p.
- [31] Wöllstrom. M. *Internal noise & vibrations in railway vehicles*. Department of Vehicle Engineering Royal institute of technology.
- [32] Förstberg. J. *Motion-related comfort in tilting trains*. Swedish National Road and Transport Research. Sweden. 2000,p 14-18.
- [33] UIC 513. *Guide pour l'évaluation du confort vibratoire du voyageur dans les vehicules ferroviaires*. 01.07.94.
- [34] ENV 12299. *Railway applications-Ride Comfort for Passengers-Measurement and evaluation*. CEN 1999.

- [35] ISO 2631. *Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole body vibration*. 01.05.1997.
- [36] S, N. *Technical description of freight bogie Y25/t*. Wroclaw: ADtranz bogie division. 2000. 3 p.
- [37] Myung-Kwan Song. Hyuk-Chun Noh. Chang-Koon Choi. *A new three-dimensional finite element analysis model of high-speed train-bridge interactions*. En: *Engineering Structures*. Vol. 25. Kidlington: Ed. Elsevier. 2003, p 1611-1626.

