POLITÉCNICA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid
Tel.: 91 336 3060
info.industriales@upm.es

www.industriales.upm.es

Enrique Riesco Garcia

05 TESIS DOCTORAL

INDUSTRIALES

TESIS DOCTORAL

VALORACIÓN DE EFECTOS VIBRATORIOS SOBRE CONDUCTORES DE VEHICULOS FERROVIARIOS

TESIS DOCTORAL
PARA LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE **DOCTOR**

SEPTIEMBRE 2020

**Enrique Riesco
Garcia**

DIRECTOR DE LA TESIS DOCTORAL:
Juan Manuel Muñoz Guijosa

POLITÉCNICA

UNIVERSIDAD
POLITÉCNICA
DE MADRID

*Departamento de ingeniería Mecánica
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (UPM).*

Autor: Enrique Riesco García

Director de Tesis: Dr. Juan Manuel Muñoz Guijosa

2020

PAGINA DE FIRMAS DE LA TESIS

Los siguientes miembros del Comité de Examen han sido propuestos por la Comisión correspondiente del Programa de Doctorado de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingenieros Industriales y debidamente aprobados por la Comisión de Doctorado de la Universidad Politécnica de Madrid:

Presidente:

Secretario:

Miembro:

Miembro:

Miembro:

Suplente:

Suplente:

Tesis presentada en cumplimiento parcial de los requisitos para el grado de Doctor en Ingeniería Mecánica, el de, 2020, en la Escuela de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.

PresidenteMiembros del tribunal

Secretario

Agradecimientos

A mi padre, por sembrar la semilla de la curiosidad, motor de toda innovación.

A mi director de tesis, cuyo apoyo empeño y sabiduría, ha sido crucial en el desarrollo de esta tesis.

A mi familia por el tiempo y dedicación que les he robado para sacar adelante la tesis.

Al departamento de dinámica y ensayos de mi empresa, sin su colaboración no hubiese sido posible desarrollar este trabajo.

VALORACIÓN DE EFECTOS VIBRATORIOS SOBRE CONDUCTORES DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS

Resumen: Las vibraciones de cuerpo entero (WBV) es un concepto que está ganando importancia cada día más en el sector ferroviario. Las enfermedades ocupacionales, como el dolor de espalda y la ciática, con frecuencia causan baja por enfermedad y han ocasionado importantes demandas contra los empleadores. Los operadores ferroviarios necesitan un procedimiento claro para la especificación y compra de vehículos ferroviarios certificados que evalúen el vehículo desde el punto de vista del efecto de las vibraciones de cuerpo entero WBV. Sin embargo, una revisión de la normativa y estudios actuales no muestran un método claro y simple para definir un valor de emisión de vibración, como el que se define en la norma EN 1032 para maquinaria móvil. Esta tesis propone un índice de emisión de vibraciones sistemático y robusto que tiene en cuenta las características especiales de las vibraciones a las que está sometido el conductor del ferrocarril y describe la metodología para su determinación. El índice propuesto, basado en los estándares actuales de vibración de cuerpo completo, es robusto y permite las comparaciones entre vehículos. Para la validación del índice, se ha utilizado resultados datos obtenidos en test en vía real, así como los resultados obtenidos de una red neuronal que estima las vibraciones en la interfaz asiento conductor a partir de los datos del piso de la cabina.

Abstract: Whole-body vibration (WBV) is a concept that is gaining importance in the railway sector. Occupational disorders, such as back pain and sciatica, frequently cause sick leave and have resulted in lawsuits against employers. Railway operators require a clear procedure for specification and purchase of certified rail vehicles that evaluate the vehicle from the point of view of the effect of WBV. However, a review of current standards and studies shows no clear and simple method for defining a vibration emission value, such as that defined in EN 1032 for mobile machinery. This study proposes a systematic and robust railway driver-related vibration index and describes the methodology for its determination. The proposed index, based on current WBV standards, is robust and allows comparisons between vehicles. For index validation, we used experimental results as well as results from a neural network using the cabin floor data.

Índice

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación de la tesis.	1
1.2	Importancia de la tesis y justificación.....	4
1.2.1	Importancia industrial.....	4
1.2.2	Importancia social.	5
1.2.3	Importancia investigadora.	5
1.3	Contribución de la tesis.	6
2	OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA TESIS.	7
2.1	Alcance de la tesis.	8
2.2	Metodología.....	9
2.2.1	Análisis del entorno vibratorio de vehículos ferroviarios.....	9
2.2.2	Análisis del sistema Asiento- Conductor.....	9
2.2.3	Análisis de las mediciones realizadas en la interfaz entre el asiento y el conductor en vehículos ferroviarios.....	9
2.2.4	Establecimiento de un nuevo indicador y validación.	10
2.3	Esquema de la tesis.....	10
3	ANÁLISIS CRÍTICO DE LA NORMATIVA Y ESTUDIOS PARA LA VALORACIÓN DE LAS ACELERACIONES A LAS QUE ESTÁ EXPUESTO UN CONDUCTOR DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS.....	13
3.1	Normativa para la valoración de las aceleraciones a las que está expuesto un conductor de vehículos ferroviarios.....	13
3.1.1	Normas que valoran las aceleraciones que a las que está sometida el cuerpo humano.	14
3.1.2	Normas que valoran el comportamiento dinámico de los asientos.	31
3.1.3	Normas que valoran el comportamiento dinámico de los vehículos ferroviarios.	35
3.1.4	Conclusiones del análisis de la normativa.	52
3.2	Estudios sobre la influencia de las vibraciones en el cuerpo humano.	57
3.2.1	Estudios sobre la influencia de las vibraciones sobre el confort en vehículos ferroviarios.....	57
3.2.2	Estudios epidemiológicos sobre la influencia de las vibraciones en la salud.	62
3.2.3	Estudios sobre la influencia de las vibraciones en el desarrollo de tareas en vehículos ferroviarios.....	68
3.2.4	Estudios sobre la influencia de las vibraciones en la salud de conductores de vehículos ferroviarios.....	72

3.2.5	Ergonomía y reducción de la vibración.	88
3.2.6	Conclusiones.....	92
4	SISTEMA DINÁMICO ASIENTO CONDUCTOR Y MODELOS DE REDES NEURONALES.	99
4.1	El sistema dinámico asiento - conductor.	99
4.1.1	Descripción de los asientos.....	99
4.1.2	Componentes de los asientos.	103
4.1.3	Modelos para asientos.	110
4.1.4	Conclusiones sobre el sistema dinámico asiento- conductor.	115
4.2	Modelo de redes neuronales para el sistema dinámico asiento conductor.....	116
4.2.1	Redes neuronales. Fundamentos teóricos.	117
5	ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL ENTORNO VIBRATORIO Y PARAMETROS DE INFLUENCIA EN LAS ACELERACIONES EN CABINA.	127
5.1	Metodología empleada	127
5.2	Tramos medidos y localización de los ensayos.	129
5.3	Análisis de los datos.	131
5.3.1	Características de las aceleraciones en el piso de cabina.....	131
5.3.2	Variabilidad de las señales.	133
5.3.3	Velocidad.....	135
5.3.4	Tramo del ensayo.	136
5.3.5	Ejes predominantes.....	138
5.3.6	Características frecuenciales.....	139
5.3.7	Filtros utilizados.	145
5.3.8	Impactos en la señal. Factor de cresta.....	148
5.3.9	Valores estadísticos.	149
5.4	Conclusiones.....	152
6	PROPUESTA DE INDICES Y PROCEDIMIENTO DE VALORACIÓN: ÍNDICE DE EMISIÓN DE VIBRACIONES Y NIVEL DE EXPOSICIÓN A LAS VIBRACIONES.	155
6.1	Índice de emisión de vibraciones del vehículo ferroviario.	155
6.1.1	Definición del índice.	155
6.1.2	Calculo de los Subíndices.....	156
6.1.3	Requisitos del trazado de medida.	157
6.2	Evaluación de las vibraciones para cada caso particular, vehículo – vía: Nivel de exposición a las vibraciones.	158
7	VALIDACIÓN DEL INDICE Y PROCEDIMIENTO PROPUESTO MEDIANTE MEDIDAS REALES.....	161

7.1	Metodología empleada.	161
7.2	Medidas obtenidas en ensayos realizados en vía.	162
7.3	Cálculo del índice de emisión del vehículo.	168
7.4	Estudio de sensibilidad de los tramos utilizados para el cálculo del indicador. Robustez del indicador.	168
7.5	Estudio de sensibilidad de los factores de ponderación de los subíndices. Robustez del indicador.	169
7.6	Discusión.....	170
7.7	Conclusión.....	171
8	AMPLIACIÓN DE LA VALIDACIÓN DEL INDICE Y EL PROCEDIMIENTO MEDIANTE VALORES CALCULADOS. MODELO DE REDES NEURONALES.....	175
8.1	Sistema estudiado.	175
8.1.1	Vehículo.	175
8.1.2	Asiento objeto del estudio.	175
8.1.3	Instrumentación utilizada.	177
8.1.4	Registros utilizados.	177
8.1.5	Diseño de la red neuronal.	178
8.1.6	Resultados y discusión del modelo de redes neuronales.....	183
8.1.7	Conclusiones sobre el modelo de redes neuronales.	185
8.2	Aplicación modelo redes neuronales para el cálculo índice de emisión.	186
8.2.1	Introducción.....	186
8.2.2	Datos de partida.....	186
8.2.3	Simulación de los datos de aceleraciones en el asiento.	187
8.2.4	Cálculo del índice de emisión de vibraciones.....	189
8.3	Conclusiones.....	190
9	CONCLUSIONES DE LA TESIS.....	191
9.1	Conclusiones de la tesis.	191
9.2	Aportaciones científicas y académicas.	192
9.3	Futuras investigaciones.....	192

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.1. Mapa de las líneas ferroviarias en Españ.(Vía libre 2020.).....	3
Figura 2.1.1. Alcance de la Tesis (VIBSEAT final Technical Report 2005.).....	8
Figura 2.2.1. Factores que afectan a las vibraciones en las cabinas de vehículos ferroviarios (UNE-EN 14363 2017).....	10
Figura 3.1.1. Normativa aplicable en la valoración de las vibraciones en la salud (elaboración propia).....	14
Figura 3.1.2. Ejes de medida de las vibraciones (ISO 2631-1, 1997).	15
Figura 3.1.3 Método de los 3 ejes de traslación (Marjanen, 2004).	16
Figura 3.1.4 Filtros de ponderación según ISO 2631-1.	16
Figura 3.1.5. Interpretación de la norma ISO 2631-1 (Mansfield y Maeda 2011).	17
Figura 3.1.6 Interpretación de la norma 2631-1 (Y. Marjanen, Mansfield, y Maeda 2006).	17
Figura 3.1.7. Zonas de precaución según ISO 2631-1.	19
Figura 3.1.8 Resonancias características en el cuerpo humano (Kitazaki y Griffin 1997).....	21
Figura 3.1.9 Diferencia entre los filtros W_b y W_k (ISO 2631-4 2001).	23
Figura 3.1.10. Método de aplicación de la norma ISO 2631 parte 5 (ISO 2631-5 2018).	24
Figura 3.1.11. Correlación entre S_{ed} y VDV (Yka Marjanen 2005).	25
Figura 3.1.12. Diagrama de aplicación de la directiva 2002/44/CE (Mansfield 2004).	27
Figura 3.1.13. Medición del nivel de vibraciones según directiva 2002/44/CE (Mansfield 2004).	28
Figura 3.1.14. Aplicación de la norma ISO 10326 Parte 2 (ISO 10326-1 2016).	34
Figura 3.1.15. Estructura de ensayos según UNE-EN 14363:2007	36
Figura 3.1.16. Características de los ensayos en línea.....	37
Figura 3.1.17. Métodos de medición en la norma UNE-EN 14363:2007.	37
Figura 3.1.18. Condiciones de ensayo según UNE-EN 14363:2007.....	39
Figura 3.1.19. Características de las zonas de ensayo según UNE-EN 14363:2007.....	41
Figura 3.1.20. Métodos de muestreo (UNE-EN 14363:2007).	42
Figura 3.1.21. Ejes definidos en la norma EN 12299.	46
Figura 3.1.22. Procedimiento de medida según EN 12299.....	47
Figura 3.1.23. Histograma valores eficaces ponderados.....	48
Figura 3.1.24 Método de análisis de (ISO 10056 2001.).....	52
Figura 3.2.1. Vibraciones de cuerpo completo de maquinaria móvil y vehículos (Eberhard 2006).	59
Figura 3.2.2. Evolución de las aceleraciones transversales a baja frecuencia y evolución con la velocidad (UIC RP 12 B 153 1988).....	61

<i>Figura 3.2.3 Rango típico de vibraciones y magnitudes de los distintos efectos de las vibraciones.(Mansfield 2004).....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 3.2.4. Curva de frecuencia frente a transmisibilidad.(Bongers 1990)</i>	<i>65</i>
<i>Figura 3.2.5. Reparto de la zona de dolores en los conductores.(Clément y Mirot 2005)</i>	<i>67</i>
<i>Figura 3.2.6. Localización de la falta de confort (Clément y Mirot 2005).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 3.2.7 Nivel de dificultad de varias tareas en relación con la visualización de los monitores interiores y exteriores (Clément y Mirot 2005).....</i>	<i>71</i>
<i>Figura 3.2.8. Nivel de dificultad de varias tareas en función de las posturas y acciones (Clément y Mirot 2005).....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3.2.9. Nivel iso-dificultad para realizar tareas y funciones de transferencia para leer en un portátil y escribir (Harrell 1990)</i>	<i>72</i>
<i>Figura 3.2.10. Medida de los valores R.M.S. según distintos criterios (UIC RP 17 B 153 1989).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 3.2.11. Variación de la dosis de vibración según el tiempo de exposición (UIC RP 17 B 153 1989)....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 3.2.12. Valoración del confort del maquinista (Clément 2003).</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3.2.13. Valoración del confort del maquinista (Clément 2005a).</i>	<i>76</i>
<i>Figura 3.2.14. Análisis en frecuencia de las aceleraciones en la caja y el asiento (Clément 2003).</i>	<i>79</i>
<i>Figura 3.2.15. Análisis en frecuencia de las aceleraciones en la caja y el asiento para los asientos optimizados (Clément 2005a).</i>	<i>80</i>
<i>Figura 3.2.16. Análisis en frecuencia de las aceleraciones y desplazamientos utilizada en el simulador (Clément 2005b).</i>	<i>81</i>
<i>Figura 3.2.17. Densidad espectral y Factor SEAT (Johanning et al. 2002).</i>	<i>85</i>
<i>Figura 3.2.18. Medidas de vibración frente a límites ISO 2631(Larson, Raasch, y Pierce 2006).</i>	<i>85</i>
<i>Figura 3.2.19. Valores VDV y SED (Cooperrider y Gordon 2008).</i>	<i>86</i>
<i>Figura 3.2.20. Características de las aceleraciones en las líneas (Boileau et al. 2005).</i>	<i>88</i>
<i>Figura 3.2.21. Transmisibilidad del transportín (P. Boileau 2004).....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 3.2.22 Valores SEAT de transmisibilidad (Gunston y Griffin 2004).....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 3.2.23. Forma de la función de transferencia en las locomotoras finlandesas (Sorainen y Rytkönen 1999). Línea de puntos: 80 km/h. Línea de trazos: 100 km/h. Línea de trazos largos: 120 km/h. Línea continua: 140 km/h</i>	<i>91</i>
<i>Figura 3.2.24. Análisis en frecuencia de las vibraciones en locomotoras (Smith, y Bowden 2008).</i>	<i>92</i>
<i>Figura 3.2.25. Transmisibilidad de los asientos en locomotoras y coherencias (Smith 2006).</i>	<i>93</i>
<i>Figura 4.1.1. Asientos comerciales aplicados en el ferrocarril.....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 4.1.2. Transmisibilidad de los asientos según la suspensión (Smith, Smith, y Bowden 2008).</i>	<i>101</i>
<i>Figura 4.1.3. Descenso estático de la suspensión en función de la frecuencia propia en sistemas pasivos (Kauß 1981).....</i>	<i>101</i>

<i>Figura 4.1.4. Desarrollo histórico de los asientos y capacidad de aislamiento de las vibraciones(Kauß 1981).</i>	102
<i>Figura 4.1.5. Mecanismo de tijera con muelle neumático incluido.(Hauck 2001)</i>	102
<i>Figura 4.1.6. Función de transferencia para suspensiones activas (Matthew 2004)</i>	103
<i>Figura 4.1.7. Representación esquemática de las suspensiones en los asientos (Smith 2006).</i>	104
<i>Figura 4.1.8. Suspensiones laterales y pendulación (P. Boileau 2004)</i>	104
<i>Figura 4.1.9. Curva esfuerzo desplazamiento de muelle neumático (Krettek y Grajnert 1992)</i>	104
<i>Figura 4.1.10 Características de los muelles y amortiguadores de la suspensión de asientos de muelles y neumáticos (P. Boileau 2004).</i>	105
<i>Figura 4.1.11. Curva esfuerzo - desplazamiento de amortiguador de asiento.(Stayner 2000)</i>	106
<i>Figura 4.1.12. Curva Amortiguador magnetoreológicos RD-1005-1, Lord Corporation.(Falah, Clark, y Phule 1998)</i>	106
<i>Figura 4.1.13. Sistema de control de la suspensión del asiento (Hauck 2001) Ajustes del asiento.</i>	106
<i>Figura 4.1.14 Características de la rigidez de los topes (Rebelle 2004).</i>	107
<i>Figura 4.1.15. Características de la rigidez de los cojines. (Boileau 2004)</i>	108
<i>Figura 4.1.16. Distribución de peso de una persona sentada (Matthew 2004).</i>	108
<i>Figura 4.1.17. Relación entre presión y duración (Matthew 2004).</i>	109
<i>Figura 4.1.18. Distribución de presión según el tipo de cojín (Matthew 2004).</i>	109
<i>Figura 4.1.19. Representación del modelo de un grado de libertad (amortiguador muelle)(Wei y Griffin 1998).</i>	110
<i>Figura 4.1.20. Frecuencia de resonancia de un modelo de 1 GDL.(M. J. Griffin 2012)</i>	111
<i>Figura 4.1.21 Modelo de dos grados de libertad incluyendo el modelado de los topes (Boileau 2004).</i>	112
<i>Figura 4.1.22. Modelo de varios grados de libertad según (Gunston y Griffin 2000).</i>	112
<i>Figura 4.1.23. Ecuación del movimiento del modelo de varios grados de libertad (Gunston y Griffin 2000).</i>	113
<i>Figura 4.1.24. Respuesta del asiente medida (solido) y calculada (discontinua) en ensayos (Smith, y Bowden 2008).</i>	114
<i>Figura 4.1.25. Modelo del Asiento /con amortiguamiento viscoso y de fricción)- conductor según (a) ISO 5982; (b) DIN 45676 (c) Masa inerte.(Stein y Ballo 1991)</i>	114
<i>Figura 4.1.26. Resultado de la simulación vs datos medidos en ensayos (a) ISO 5982; (b) DIN 45676 (c) Masa inerte.(Stein, Mucka, y Clément 2004)</i>	115
<i>Figura 4.2.1 Concepto de red neuronal (Hilera y Martinez Hernando 1995).</i>	117
<i>Figura 4.2.2 Neurona artificial.(Hilera y Martinez Hernando 1995).</i>	119
<i>Figura 4.2.3. Capas existentes en una red neuronal.(Hecht-nielsen 1992).</i>	120

<i>Figura 4.2.4. Ejemplo de conexión entre neuronas en una RNA de tres capas. Entrenamiento de una red neuronal. (Demuth et al. 2014)</i>	121
<i>Figura 4.2.5. Diagrama de flujo de entrenamiento. (Hilera y Martínez Hernando 1995)</i>	123
<i>Figura 5.1.1 Posicionamiento de los acelerómetros en el piso de cabina</i>	128
<i>La Figura 5.1.2 da una visión de la cadena de medida, adquisición y procesamiento de las diferentes magnitudes medidas durante los ensayos.</i>	128
<i>Figura 5.1.3 Esquema de la cadena de medida, adquisición y procesamiento de las señales</i>	128
<i>Figura 5.1.4. Ejes de coordenadas</i>	129
<i>Figura 5.2.1. Línea 1: perfil de velocidad y curvas por punto kilométrico (elaboración propia)</i>	130
<i>Figura 5.2.2. Línea 2: perfil de velocidad y curvas por punto kilométrico (elaboración propia)</i>	130
<i>Figura 5.2.3. Línea 3: perfil de velocidad y curvas por punto kilométrico (elaboración propia)</i>	130
<i>Figura 5.2.4. Línea 4: perfil de velocidad y curvas por punto kilométrico (elaboración propia)</i>	130
<i>Figura 5.2.5. Línea 5: perfil de velocidad y curvas por punto kilométrico (elaboración propia)</i>	131
<i>Figura 5.2.6. Línea 6: perfil de velocidad y curvas por punto kilométrico (elaboración propia)</i>	131
<i>Figura 5.3.1 Valor eficaz ponderado de las aceleraciones vertical y lateral en el piso de cabina de un vehículo ferroviario (elaboración propia)</i>	132
<i>Figura 5.3.2. Diagrama de cajas del Valor eficaz ponderado de las aceleraciones verticales según la vía (elaboración propia)</i>	133
<i>Figura 5.3.3. Diagrama de cajas del Valor eficaz ponderado de las aceleraciones laterales según la vía (elaboración propia)</i>	134
<i>Figura 5.3.4 Valor eficaz ponderado de las aceleraciones laterales y laterales en el mismo tramo de vía a la velocidad de 220 km/h (elaboración propia)</i>	135
<i>Figura 5.3.5 Valor eficaz ponderado de las aceleraciones laterales y verticales frente a la velocidad y según el tipo de vía (elaboración propia)</i>	136
<i>Figura 5.3.6. Media móvil Valor eficaz ponderado de las aceleraciones longitudinales, laterales y verticales por punto kilométrico (elaboración propia)</i>	139
<i>Figura 5.3.7 Resonancias en el análisis PSD de las aceleraciones verticales y laterales en cabina (elaboración propia)</i>	140
<i>Figura 5.3.8. Análisis PSD más representativos de las aceleraciones laterales (elaboración propia)</i>	141
<i>Figura 5.3.9. Análisis PSD más representativos de las aceleraciones verticales (elaboración propia)</i>	142
<i>Figura 5.3.10 Análisis PSD de las aceleraciones en cabina, en bogie y de giros (elaboración propia)</i>	144
<i>Figura 5.3.11. Movimiento de la caja en función de la longitud de onda de las irregularidades (UNE-EN 14363 2017)</i>	145
<i>Figura 5.3.12. Valores R.M.S. Media móvil cada 5 s según filtros ISO y UIC (elaboración propia)</i>	146
<i>Figura 5.3.13 Valores R.M.S. de la aceleración vertical según filtros ISO y UIC (elaboración propia)</i>	147

<i>Figura 5.3.14 Valores R.M.S. ponderados de la aceleración vertical en función de la frecuencia dominante según ISO 2631-1 (elaboración propia).</i>	148
<i>Figura 5.3.15. Factor de cresta lateral y vertical en distintas pasadas según ISO 2631-1 (elaboración propia).</i>	148
<i>Figura 5.3.16. Factor de cresta lateral y vertical vs R.M.S. según ISO 2631-1 (elaboración propia).</i>	149
<i>Figura 5.3.17. Factor de cresta frente al VDV vertical según ISO 2631-1 (elaboración propia).</i>	151
<i>Figura 5.3.18. Evaluación de los parámetros indicados en la normativa ISO 2631-1 según el tramo de vía (elaboración propia).</i>	152
<i>Figura 6.1.1. Cálculo de los subíndices de emisión.</i>	156
<i>Figura 7.1.1 Cojín con acelerómetro triaxial.</i>	161
<i>Figura 7.1.2 Montaje del cojín sobre el asiento.</i>	162
<i>Figura 7.2.1. Aceleraciones velocidades y curvas en la vía tipo 4 por punto kilométrico (elaboración propia).</i>	162
<i>Figura 7.2.2. Valor eficaz ponderado en media móvil cada 5 seg por punto kilométrico. Vía tipo 4 (elaboración propia).</i>	163
<i>Figura 7.2.3. Aceleraciones velocidades y curvas por punto kilométrico en la vía tipo 3 (elaboración propia).</i>	163
<i>Figura 7.2.4 Valor eficaz ponderado en media móvil cada 5 seg. por punto kilométrico. Vía tipo 3 (elaboración propia).</i>	164
<i>Figura 7.2.5 Aceleraciones velocidades y curvas por punto kilométrico en la vía tipo 2 (elaboración propia).</i>	164
<i>Figura 7.2.6 Valor eficaz ponderado en media móvil cada 5 seg. por punto kilométrico. Vía tipo 2 (elaboración propia).</i>	165
<i>Figura 7.2.7 (incluye tabla). Calidad de vía en secciones rectas (elaboración propia).</i>	166
<i>Figura 7.2.8 (incluye tabla). Calidad de vía en sección curvas de radio medio (elaboración propia).</i>	166
<i>Figura 7.2.9 (incluye tabla). Calidad de vía en secciones curvas de radio pequeño (elaboración propia).</i>	167
<i>Figura 7.2.10. Histograma de las aceleraciones ponderadas según el eje y el VTV para los tramos de curvas de radio muy pequeño (elaboración propia).</i>	167
<i>Figura 7.2.11. Histograma de las aceleraciones ponderadas según el eje y el VTV para los tramos de curvas de radio pequeño (elaboración propia).</i>	168
<i>Figura 7.4.1 Tramos que cumplirían los criterios de calidad y radios de curva. a_{wx}, a_{wy}, y a_{wz}, son aceleraciones longitudinales, laterales y verticales, en azul, a nivel del suelo, y en verde, a nivel del asiento; $alnc$ es la aceleración lateral no compensada; w_z es las medidas del giroscopio que muestran las curvas. Los cuadros de sombreado gris muestran el conjunto de datos utilizado para el cálculo de un único valor de VEI a 0,4013 m/s², en lugar de un valor para cada prueba. (elaboración propia).</i>	169
<i>Figura 7.7.1. IEV vs valores según la normativa de salud ISO 2631).</i>	172

<i>Figura 7.7.2. Índice de emisiones del vehículo calculado con diferentes mediciones de sección de vía resultantes de una combinación de diferentes tests de la Tabla 2 frente a los valores calculados en los ensayos completos en cada combinación de prueba, según ISO 2631-1 (1997). Los corchetes muestran la variabilidad de los resultados de VEI (azul sólido), peor eje (rojo) y VTV (verde discontinuo) (elaboración propia).</i>	173
<i>Figura 7.7.3. Variación del IEV en función de los porcentajes elegidos para los tramos (elaboración propia).</i>	173
<i>Figura 7.7.4. Nivel de exposición de vibraciones frente a valores medidos (elaboración propia).</i>	174
<i>Figura 8.1.1. Asiento utilizado en el estudio. Izquierda: vista general del asiento y su situación en la cabina. Derecha: detalle de la suspensión.</i>	176
<i>Figura 8.1.2. Componentes del asiento utilizado en el estudio. A: Ajuste vertical. B: reposabrazos. C: suspensión. D: Respaldo de inclinación regulable. E: Reposacabezas. F: Articulación. G: Ajuste inclinación. H: tope de la suspensión. I: base del cojín. J: Base. K: ajuste longitudinal.</i>	176
<i>Figura 8.1.3 Velocidad lineal y velocidad de giro registradas en un tramo tipo QN2.</i>	178
<i>Figura 8.1.4. Aceleraciones en el piso de la cabina. Línea azul: aceleración filtrada según ISO. Línea verde: aceleración filtrada según UIC. Línea roja: aceleración R.M.S. promedio (elaboración propia).</i>	178
<i>Figura 8.1.5. Aceleraciones medidas en cojín en un tramo representativo (elaboración propia).</i>	178
<i>Figura 8.1.6. Influencia del número de neuronas en la correlación y tiempo de procesado (elaboración propia).</i>	179
<i>Figura 8.1.7. Estudio gráfico de relaciones entre señales de entrada y salida (elaboración propia).</i>	180
<i>Figura 8.1.8. Estudio de relaciones entre señales de entrada y salida. Matriz de correlaciones (elaboración propia).</i>	180
<i>Figura 8.1.9 División en segmentos de datos (elaboración propia).</i>	180
<i>Figura 8.1.10. Plausibilidad de aceleraciones laterales (gráfica superior) y verticales (gráfica inferior) (elaboración propia).</i>	181
<i>Figura 8.1.11. Redes neuronales planteadas (elaboración propia).</i>	182
<i>Figura 8.1.12 Comparación entre señales reales y simuladas en tiempo y frecuencia, aceleración lateral (elaboración propia).</i>	184
<i>Figura 8.1.13. Comparación entre señales reales y simuladas en tiempo y frecuencia, aceleración vertical (elaboración propia).</i>	185
<i>Figura 8.2.1. Aceleraciones en el asiento del conductor simuladas (verde) frente a las aceleraciones en el suelo de la cabina (azul) (elaboración propia).</i>	188
<i>Figura 8.3.1. Valores R.M.S. y VTV según ISO 2631-1 simulados frente a nivel de exposición a las vibraciones simulados (elaboración propia).</i>	190

INDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Filtros y multiplicadores de la normativa (ISO 2631-1, 1997).	15
Tabla 3-2 Filtros y multiplicadores para el cálculo de confort(ISO 2631-1, 1997).	16
Tabla 3-3. Parametros principales utilizados en la ISO 2631-1	18
Tabla 3-4. Dosis para 8 horas	20
Tabla 3-5. Límite de tiempo de exposición	20
Tabla 3-6. Comparativa ISO 2631-1 y BS 6841.	21
Tabla 3-7. Categorías de riesgo en norma ISO 2631-1 parte 5.	24
Tabla 3-8. Valoración de riesgos en norma ISO 2631-1 parte 5.	25
Tabla 3-9. Limites de exposición a la vibración según la directiva 2002/44.	27
Tabla 3-10. Valores limite SEAT para el cumplimiento de la norma.	35
Tabla 3-11. Valores limite EN 14363.	38
Tabla 3-12. Valores límite de las aceleraciones desde el punto de vista de la seguridad.	39
Tabla 3-13. Valores limite para la calidad de marcha.	39
Tabla 3-14. Calidad de vía según UNE-EN 14363:2007.	40
Tabla 3-15. Procedimientos de medida y evaluación según (UNE-EN 12299 2010).	46
Tabla 3-16. Comparativa de los filtros según diferentes normativas.	47
Tabla 3-17. indice de comodidad.	48
Tabla 3-18. Coeficientes del método completo.	50
Tabla 3-19. Coeficientes para eventos discretos.	50
Tabla 3-20. Resumen de la normativa y criterios de analisis.	56
Tabla 3-21. Comparativa de los niveles vibratorios en el ferrocarril y otros medios o maquinaria (a_s aceleración asiento ejes traslacionales, a_{sb} respaldo del asiento, a_f suelo,)(Y. Marjanen, Mansfield, y Maeda 2006).	58
Tabla 3-22. Comparativa de los niveles vibratorios según la dirección de aplicación.	59
Tabla 3-23. Modelo matemático de la carga sobre la columna vertebral.	64
Tabla 3-24. Valores medios en la sangre (Azlis-Sani et al. 2015). (train passengers, total exposure time =5 h)	67
Tabla 3-25 Nivel de dificultad de las tareas de conducción según los escenarios (Clément y Mirot 2005). .	71
Tabla 3-26. Características de los ensayos realizados en Francia (UIC B 153 RP 18:1989-09).	73
Tabla 3-27. Dosis de vibración según la ISO 2631-1 (UIC RP 17 B 153 1989).	73
Tabla 3-28. Niveles R.M.S. medidos en distintos ensayos en 4 líneas distintas (UIC RP 17 B 153 1989).	74
Tabla 3-28b. Niveles R.M.S. medidos en distintos ensayos en 4 líneas distintas (UIC RP 17 B 153 1989).	75

<i>Tabla 3-29. Calidad de las vías utilizadas en los ensayos de la SCNF (Clément 2003).</i>	76
<i>Tabla 3-30. Descomposición de las aceleraciones según la dirección (Clément 2005a). Asiento 2 suspensión vertical activa NVA 7.3</i>	77
<i>Tabla 3-31. Transmisibilidad de los asientos y sus componentes.</i>	77
<i>Tabla 3-32. Límite de exposición a la vibración, y límite que da lugar a una acción (European Directive 2002/44/EC).</i>	78
<i>Tabla 3-33. Ensayos realizados en Turquía.(Birlik 2009)</i>	81
<i>Tabla 3-34. Medidas según los ensayos de AEA Technology. (Evans 2004)</i>	83
<i>Tabla 3-35. Valores medidos según los ensayos (Johanning, Landsbergis, et al. 2006)..</i>	83
<i>Tabla 3-36. Valores medidos en 50 locomotoras en USA (Johanning et al. 2002).</i>	84
<i>Tabla 3-37. Valores medidos en 20 locomotoras en USA (Johanning, Fischer, et al. 2006).</i>	86
<i>Tabla 3-38. Medidas de aceleraciones en las líneas de Metro de Montreal sobre las locomotoras MR 63 y MR73(P.-E. Boileau et al. 2005).</i>	87
<i>Tabla 3-39. Aceleración eficaz según los distintos puntos del recorrido (Boileau et al. 2005).</i>	87
<i>Tabla 3-40. Funcion de transferencia (SEAT) de las locomotoras americanas.(Johanning, Fischer, et al. 2006)</i>	89
<i>Tabla 3-41. Características de asientos de locomotoras (Johanning, Fischer, et al. 2006).</i>	90
<i>Tabla 3-42. Resumen de los estudios analizados.</i>	94
<i>Tabla 3-43. Valores característicos en los estudios analizados</i>	97
<i>Tabla 4-1. Valores simulados de RMS y SEAT según distintas normativas.(Rakheja y Boileau 2003)</i>	115
<i>Tabla 5-1 Líneas de ensayo.</i>	129
<i>Tabla 5-2. Líneas de ensayo.</i>	133
<i>Tabla 5-3. Características del vehículo según la norma EN 14363. Valor R.M.S (elaboración propia).</i>	137
<i>Tabla 5-4. Valores estadísticos de las aceleraciones (elaboración propia).</i>	150
<i>Tabla 6-1. Clasificación de la calidad de vía según los defectos (UNE-EN 14363 2017).</i>	157
<i>Tabla 7-1. valores medios obtenidos en cada pasada según ISO 2631-1 (elaboración propia).</i>	165
<i>Tabla 7-2. Coeficientes de mayoración para cada subíndice (elaboración propia).</i>	167
<i>Tabla 7-3. Subíndices de emisión (abxR.M.S.t, awbyR.M.S.t awbzR.M.S.t: percentil 95 de las aceleraciones ponderadas medidas en las direcciones x, y y z, VTVt: Vibration Total Value para cada tipo de sección equivalente al subíndice).</i>	168
<i>Tabla 7-4. Variación de índice de emisión de vibraciones en distintas combinaciones de tramos que cumplen las exigencias de radios y calidad de vía.</i>	170
<i>Tabla 7-5. Variación de índice de emisión de vibraciones en función de los porcentajes de tramos de vía.</i>	170
<i>Tabla 7-6. Comparativa de los distintos parámetros de influencia.</i>	172

<i>Tabla 8-1. Características del asiento.....</i>	<i>177</i>
<i>Tabla 8-2. Tramos utilizados para la adquisición de información dinámica.</i>	<i>177</i>
<i>Tabla 8-3. Efecto de las diferentes estrategias de preprocesado de las señales de entrada en la correlación obtenida en las redes parciales.</i>	<i>181</i>
<i>Tabla 8-4. Entrenamiento red neuronal lateral.....</i>	<i>183</i>
<i>Tabla 8-5. Entrenamiento red neuronal vertical (elaboración propia).</i>	<i>183</i>
<i>Tabla 8-6. Tramos de validación utilizados (elaboración propia).</i>	<i>184</i>
<i>Tabla 8-7. Tramos de validación, aceleraciones laterales en cojín (elaboración propia).</i>	<i>184</i>
<i>Tabla 8-8. Tramos de validación, aceleraciones verticales en cojín (elaboración propia).</i>	<i>185</i>
<i>Tabla 8-9. Pasadas utilizadas para la simulación de las aceleraciones en el Asiento del conductor (elaboración propia).</i>	<i>187</i>
<i>Tabla 8-10. Valores R.M.S y percentiles simulados (elaboración propia).</i>	<i>189</i>
<i>Tabla 8-11. Índices simulados con la red neuronal (elaboración propia).</i>	<i>190</i>

ÍNDICE DE ECUACIONES

<i>Ecuación 1.....</i>	<i>18</i>
<i>Ecuación 2.....</i>	<i>18</i>
<i>Ecuación 3.....</i>	<i>19</i>
<i>Ecuación 4.....</i>	<i>19</i>
<i>Ecuación 5.....</i>	<i>19</i>
<i>Ecuación 6.....</i>	<i>20</i>
<i>Ecuación 7.....</i>	<i>33</i>
<i>Ecuación 8.....</i>	<i>42</i>
<i>Ecuación 9.....</i>	<i>42</i>
<i>Ecuación 10.....</i>	<i>47</i>
<i>Ecuación 11.....</i>	<i>49</i>
<i>Ecuación 12.....</i>	<i>49</i>
<i>Ecuación 13.....</i>	<i>49</i>
<i>Ecuación 14.....</i>	<i>50</i>
<i>Ecuación 15.....</i>	<i>64</i>
<i>Ecuación 16.....</i>	<i>64</i>
<i>Ecuación 17.....</i>	<i>64</i>
<i>Ecuación 18.....</i>	<i>64</i>
<i>Ecuación 19.....</i>	<i>91</i>
<i>Ecuación 20.....</i>	<i>109</i>
<i>Ecuación 21.....</i>	<i>110</i>
<i>Ecuación 22.....</i>	<i>111</i>
<i>Ecuación 23.....</i>	<i>113</i>
<i>Ecuación 24.....</i>	<i>113</i>
<i>Ecuación 25.....</i>	<i>113</i>
<i>Ecuación 26.....</i>	<i>122</i>
<i>Ecuación 27.....</i>	<i>137</i>
<i>Ecuación 28.....</i>	<i>137</i>
<i>Ecuación 29.....</i>	<i>139</i>
<i>Ecuación 30.....</i>	<i>155</i>

<i>Ecuación 31</i>	156
<i>Ecuación 32</i>	157
<i>Ecuación 33</i>	158
<i>Ecuación 34</i>	159

Lista de abreviaturas

EAV: Exposure Action Value.

RMS: root mean square.

VDV: vibration dose value.

VEI: vibration emission index.

VTV: vibration total value.

WBV: Whole-Body Vibration

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación de la tesis.

En los últimos años se ha producido en España un avance significativo en el ferrocarril. Aunque parezca que los mayores esfuerzos se centran en el desarrollo de los grandes corredores de alta velocidad, estos avances están alcanzando a todos los niveles (locomotoras, metros, trenes de cercanías y regionales, trenes de larga distancia, trenes hotel, etc.). De hecho, la empresa operadora, Renfe, resalta que posee la flota de trenes más moderna de Europa.

Para que un vehículo nuevo sea autorizado a circular en todas las vías de un país, o de incluso la unión europea, debe sufrir un riguroso proceso de homologación. Dicho proceso consiste en demostrar mediante pruebas estáticas, pruebas dinámicas, estudios, cálculos y simulaciones la validez del vehículo en todos los puntos de la normativa de homologación que se aplique ((*Reglamento (UE) n °1299/2014 de la Comisión, de 18 de noviembre de 2014 , relativo a las especificaciones técnicas de interoperabilidad del subsistema «infraestructura» en el sistema ferroviario de la Unión Europea Texto pertinente a efectos del EEE 2014*) –ETI a nivel europeo-, Especificaciones técnicas de homologación (Ministerio de Fomento 2009) –ETH a nivel español- o la normativa de homologación correspondiente en cada país)

Sin embargo, a día de hoy ninguna de estas normativas específicas del ferrocarril hace referencia directamente a las vibraciones a las que están expuestos los conductores de vehículos ferroviarios. En muchos casos el punto referente a la salud de la tripulación y conductores está abierto, pendiente de establecer los límites requeridos

En la especificación técnica de interoperabilidad en su versión de 2008 se indica que “El asiento principal disponible para el conductor se diseñará de manera que le permita realizar todas las funciones de conducción normales mientras permanece sentado. Los requisitos relacionados con la salud, la seguridad y la ergonomía se mantienen como cuestión pendiente”. En la versión del 2014 la última frase se ha modificado por “4.2.9.1.5 Asiento del maquinista apartado 3) *En el diseño del asiento y su utilización por el maquinista se tomarán en consideración aspectos de ergonomía y salud*”, dejando el punto abierto a la interpretación.

Por otro lado, la directiva 2002/44 de la unión europea (European Directive 2002/44/EC) regula la exposición de cualquier trabajador a las vibraciones dentro del ámbito europeo. A su vez, esta directiva está traspuesta al derecho español mediante el real decreto 1311/2005. Toda esta normativa emana de la (ISO 2631-1,) de 1997, pero en general está muy enfocada a ambientes con mayor contenido vibratorio, como vehículos agrarios, del sector de la construcción, agrario o de la minería.

No existen muchos estudios sobre las vibraciones a las que están sometidos los conductores de vehículos ferroviarios, pero en los estudios revisados el análisis de las vibraciones se realiza según distinta normativa, lo que hace muy difícil su comparación.

En los últimos años, se han registrado demandas judiciales, especialmente en Estados Unidos, en las que los trabajadores reclaman daños a los empleadores debido a los efectos de las vibraciones sufridas en el puesto de trabajo. Aunque no está claro que estas vibraciones den lugar a daños en la columna vertebral y otras partes del cuerpo, si parece que aquellos conductores expuestos a mayores vibraciones pueden sufrir bajas y enfermedades relacionadas con las vibraciones de cuerpo completo (Andres 2017; Bremseth 2011; Farina 2012; Greenidge 2010; Hannon and Palermo 2013; Village et al. 2012).

El ferrocarril, desde el punto de vista vibratorio, presenta unas características específicas que habría que valorar a la hora de estudiar las vibraciones a las que están sometidos los conductores de vehículos ferroviarios.

Una de las características es que los ferrocarriles siempre deben circular por unas vías fijas, que tienen unos parámetros de calidad fijados. Por otro lado, frente a otros entornos vibratorios en el ferrocarril existen aceleraciones de todo tipo: estacionaria, no estacionaria, cuasi-estática, dinámica con componentes, extremadamente no lineales (en curvas). Debido a estas características la normativa típica de ferrocarril realiza tratamientos estadísticos más o menos complejos para tener en cuenta la variabilidad de las señales.

Sin embargo, una vez se ha demostrado que los vehículos ferroviarios cumplen unas determinadas características, la validez de estas se extiende a todas las vías de un país o incluso de Europa. Hoy en día existen vehículos con cambio de ancho y varias tensiones, incluso híbridos que pueden circular por casi todas las líneas, aunque lo normal sea que cada vehículo se destine a unas líneas determinadas.

Las emisiones de vibraciones en cabina podrían ser valoradas como un elemento diferenciador en el proceso de compra y de venta de los trenes. A menudo se confunde la normativa que evalúa el confort de los ferrocarriles con la normativa para evaluar los daños que las vibraciones producen en los seres humanos. Sin embargo, aunque ambos aspectos derivan de los efectos de las vibraciones sobre los seres humanos, la forma de evaluar las vibraciones es distinta. A día de hoy incluso la normativa de confort ferroviaria tampoco establece correctamente el procedimiento para definir el grado de confort de un vehículo validándolo para todas las vías. Lo que sí se puede hacer con dicha normativa es comparar el confort entre dos vehículos circulando por el mismo tramo de vías (ya sea confort medio, en eventos discretos o en curvas de transición)

En cualquier caso, la valoración de la exposición a las vibraciones, al igual que el confort vibratorio se realizan siempre a partir de la medida y procesamiento de aceleraciones. Está demostrado que existe una relación entre las aceleraciones sufridas por el cuerpo humano y su influencia sobre la salud, pero se desconoce la relación exacta y los límites concretos a partir de los cuales se producen daños. Esto puede variar de un individuo a otro y existen múltiples factores exógenos que hay que tener en cuenta (la temperatura, el gradiente térmico, la ergonomía, etc.) (Parsons y Griffin 1993; Richards 1980)

La normativa que valora el confort exige realizar medidas en tramos de 5 minutos. Pero estas medidas pueden variar dependiendo del punto de medida y de la velocidad de circulación del tren. La directiva europea señala que es necesario valorar las vibraciones en los recorridos característicos del vehículo. Las vibraciones que se dan están íntimamente ligadas al sistema vía-vehículo y parece difícil extrapolarla a otros sistemas fuera del que se ha medido. Como se aprecia en la Figura 1.1.1, si es necesario realizar valoraciones sobre el nivel de vibraciones con cada vehículo en cada uno de sus recorridos, el esfuerzo a realizar sería ímprobo o incluso inviable.

Por tanto, parece necesario establecer un método que garantice la salud laboral de los conductores de vehículos ferroviarios en lo referente a la exposición a las vibraciones, compatible con la normativa actual, pero que no exija realizar mediciones en todas las vías o recorridos por los que se puede circular cada uno de los vehículos.

Con este método, se podría establecer el procedimiento para llevar a cabo la evaluación del tren desde el punto de vista de las vibraciones transmitidas a los conductores. Si el resultado de esta evaluación se encuentra dentro de unos determinados límites se puede garantizar que se cumple con los límites establecidos en la normativa general para cualquier vía (según los parámetros de vía que se definen en la normativa ferroviaria).

Se podría definir un nuevo índice para establecer los límites de las vibraciones que tenga en por un lado cuenta las características de las vibraciones del ferrocarril y por otro lado las limitaciones de la normativa sobre las vibraciones a las que se exponen a los conductores.

Se puede establecer los límites a las aceleraciones en la base del asiento, que son medidas en las pruebas de homologación de los vehículos ferroviarios y por otro lado establecer los límites sobre las características de los asientos empleados.

Figura 1.1.1. Mapa de las líneas ferroviarias en Españ.(Vía libre 2020.).

Para poder demostrar la validez de este método se deben analizar las características de las aceleraciones medidas en las cabinas, y el comportamiento de los asientos montados Posteriormente se compararían los resultados con las aceleraciones medidas en las interfases para demostrar que se llega a los mismos resultados.

La directiva europea exige realizar una valoración de riesgos por parte del empresario para conocer en qué situación se encuentra el trabajador. Las conclusiones pueden ser que es necesario realizar mediciones para valorar el nivel de aceleraciones y, si supera determinado límite, el empresario debe tomar medidas para reducir las vibraciones.

Cuando se trasladan los requerimientos de esta directiva al fabricante de maquinaria, en este caso al fabricante ferroviario, la directiva requiere:

- Diseñar y construir vehículos que reduzcan la exposición a las vibraciones al mínimo que técnicamente pueda ser alcanzado.
- Suministrar la documentación técnica con la información para:

- Garantizar un uso seguro del vehículo.
- Definir las Emisiones vibratorias de vehículo.
- Procedimientos de mantenimiento para mantener las características de reducción frente a las vibraciones.
- Instrucciones sobre cómo usar el equipamiento para evitar el riesgo de la vibración.

El primer objetivo parece obvio, pero no existe una metodología para conseguir una reducción máxima de las vibraciones a las que está sometido el conductor de vehículos ferroviarios.

Durante el desarrollo de un vehículo ferroviario, en lo referente a la dinámica vehicular, se intenta diseñar para cumplir los criterios de seguridad en primer lugar, y los criterios de solicitaciones sobre la vía y los criterios de calidad de marcha en segundo lugar.

Habría que añadir el criterio de exposición a las vibraciones del conductor. El asiento del conductor no viene definido por los criterios de la dinámica vehicular. Se pueden instalar distintos tipos de asientos que mejorarán o empeorarán el comportamiento dinámico del sistema Vehículo+ conductor. Por ello es una de las claves la correcta elección del asiento.

No está claro cómo definir las emisiones vibratorias de un vehículo tal y como requiere la directiva. Parece necesario realizarlo según el tipo de vía por el que circule ya que el comportamiento vibratorio va íntimamente ligado al par vehículo vía.

Por último, sería interesante estudiar las aceleraciones que se producen en puesto de trabajo del conductor desde el punto de vista de la influencia que puedan tener sobre el desarrollo de sus actividades.

1.2 Importancia de la tesis y justificación.

1.2.1 Importancia industrial.

Desde el punto de vista de los operadores ferroviarios y los constructores de los vehículos, el correcto diseño y empleo de los vehículos y asientos conducirá a un mejor aprovechamiento de los mismos.

Los operadores ferroviarios deben asegurar que las vibraciones a las que están sometidos de sus conductores se encuentran dentro de los límites establecidos. De este modo podrían disminuir los problemas ocasionados por las bajas debido a dolores de espalda y otras patologías derivadas de la exposición a las vibraciones. Como se ha demostrado en las numerosas demandas judiciales, existe una relación entre el exceso de vibraciones a las que está sometido el conductor y las posible bajas temporales o permanentes que se producen debido a dolores en la zona lumbar y cervical(Andres 2017)

A la hora de adquirir un vehículo, los operadores deben tener en cuenta el comportamiento de este al circular a distintas velocidades por las líneas por las que está planificado que circule. Pueden especificar la necesidad de elementos que reduzcan la vibración si a priori consideran que el conductor puede estar sometido vibraciones elevadas, o ahorrarse el coste de estos elementos si consideran que no existe tal riesgo.

También pueden utilizar distintos tipos de planificación de rutas y turnos para garantizar que el mismo conductor no está sometido a vibraciones excesivas en todo el periodo de trabajo. Aunque en este caso el objetivo del empresario será optimizar los costes de modo que pueda planificar las rutas maximizando el uso de recursos (ya sean los vehículos o los conductores).

Derivado de lo anteriormente expuesto, lo lógico es que el operador especifique las emisiones de vibraciones de un vehículo determinado cuando pretende adquirírselo al constructor. El constructor deberá

diseñar el vehículo para cumplir con los límites establecidos por el operador y teniendo en cuenta las líneas en las que operará el vehículo.

Aunque el constructor diseña los vehículos para cumplir los criterios de calidad de marcha, que indirectamente influyen sobre las vibraciones que afectan a la salud, deberá hacer especial hincapié en estudiar el modo de reducir las vibraciones más dañinas que llegan al conductor a través del vehículo y del asiento.

Por otro lado, el hecho de diseñar unos vehículos capaces de disminuir las vibraciones de cara a los conductores también puede suponer una ventaja competitiva desde el punto de vista del constructor.

Una metodología que permia eliminar la subjetividad a la hora de valorar los vehículos desde el punto de vista de la emisión de vibraciones teniendo en cuenta la salud de los conductores será una garantía tanto para el comprador (en este caso el operador de trenes) como para el vendedor (fabricante). Los fabricantes de ferrocarriles necesitan un objetivo claro cuando diseñan vehículos ferroviarios para minimizar las vibraciones. Según lo declarado en («European Cab Ergonomics. Guidance Document» 2018) “Los fabricantes deben diseñar y construir vehículos y cabinas que reduzcan el WBV al mínimo que se pueda lograr”. Sin embargo, se requiere un objetivo y una metodología claros para lograr este mínimo.

1.2.2 Importancia social.

Como demuestra el hecho de la aparición de la directiva 2002/44, en Europa existe una gran preocupación por la salud de los trabajadores.

No se permitirá el empleo de vehículos y métodos de trabajo que puedan provocar daños sobre la salud, en particular por presentar un alto nivel de vibraciones.

Aunque esta tesis se centra en un pequeño colectivo, los conductores de vehículos ferroviarios, se pretende mejorar las condiciones laborales de los mismos, intentando disminuir el efecto de las vibraciones y las posibles patologías que puedan causar.

Desde un punto de vista económico se reducirían las bajas y el absentismo debido a estas patologías, mejorando al mismo tiempo la calidad de vida de estos trabajadores.

Probablemente, a medida que la tecnología avance, podrían reducirse los límites actualmente establecidos ya que en muchos casos son un compromiso entre lo que se puede exigir a la industria y lo que se puede conseguir.

1.2.3 Importancia investigadora.

Esta tesis se enmarca en la confluencia entre campos como la dinámica vehicular, la teoría de vibraciones, la biomecánica, la medicina y de algún modo la psicología del trabajo.

Está especialmente orientada al análisis de las vibraciones en las cabinas de conducción de vehículos ferroviarios, sus causas y como reducirlas. Pero siempre desde el punto de vista de cuáles son las vibraciones que más afectan al ser humano porque producen una serie de patologías y/o pueden afectar a las tareas de conducción.

Se utilizan técnicas para el análisis de vibraciones, validando los métodos actuales o proponiendo nuevos métodos.

Se comprueba la validez de modelos matemáticos para simular el comportamiento de asientos comparando resultados calculados y resultados reales.

Por último, se intenta establecer una metodología de diseño para optimizar el comportamiento del sistema dinámico asiento-conductor dentro de la cabina de un vehículo ferroviario.

1.3 Contribución de la tesis.

Con esta tesis se cree presentar una investigación original sobre los siguientes aspectos:

- Experimentación sobre el nivel de vibraciones en la cabina de conducción soportado por los conductores de vehículos ferroviarios, teniendo en cuenta los efectos sobre los humanos en función del tipo de vehículo y de la vía por la que circulan.
- Comprobación de la validez la normativa actual para la valoración de las vibraciones a las que están expuestos los conductores de vehículos ferroviarios.
- Propuesta de índice de valoración de las aceleraciones y metodología para poder utilizar las mediciones ya realizadas en otros ensayos.
- Modelos alternativos para la determinación de las vibraciones en el puesto de trabajo de conductores, utilizando los datos obtenidos del proceso de homologación dinámica del vehículo.

2 OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA TESIS.

Existe una gran variedad de normativa aplicable para valorar las vibraciones en los puestos de conducción de vehículos ferroviarios, con distintos criterios y límites.

Por un lado, existen normas referentes al impacto de las vibraciones en la salud, que a priori parecen las aplicables. Sin embargo, esta normativa no tiene en cuenta las especificidades del ferrocarril.

Por otro lado, están las normas específicamente ferroviarias para la valoración de las vibraciones y las aceleraciones, cuyo objetivo final (seguridad, confort, calidad de marcha etc.) es distinto al análisis del impacto sobre la salud, pero cuya metodología se adapta mejor a las características de los vehículos ferroviarios y su comportamiento dinámico.

Como se verá en el capítulo 3 la normativa deja abierta a la interpretación muchos parámetros del proceso de determinación de los límites de emisión de vibraciones.

No está clara la idoneidad de:

- Filtros de ponderación a aplicar a las señales
- Duración de las medidas para que se puedan considerar medidas representativas
- Tramos de vía en las que se deben realizar las medidas para considerarlas representativas
- Tratamiento estadístico de las señales
- Ejes en los que se evalúan las vibraciones
- Puntos de medida
- Valoración de los impactos

La finalidad de la normativa debería ser garantizar que los niveles de las vibraciones en las cabinas se encuentren por debajo de un límite determinado, de modo que se establezcan las disposiciones mínimas en materia de protección de los trabajadores contra los riesgos para su seguridad y su salud originados o que puedan originarse por la exposición a vibraciones mecánicas. Si la determinación de dichos límites se realiza de un modo que sea demasiado favorable, pueden producirse problemas de salud en los conductores, aunque en un principio se consiga obtener una certificación para la compra del vehículo.

Una vez evaluado un vehículo, la certificación del mismo debería ser válida para cualquiera de las situaciones en las que se pueda utilizar. Asimismo, dicha certificación debería evitar posibles reclamaciones judiciales por daños sobre la salud por parte de los trabajadores.

Por último, la adaptación de los vehículos y asientos ferroviarios puede ser un elemento de venta y marketing desde el punto de vista del fabricante de trenes. El aseguramiento de que los conductores sufran un bajo nivel de vibraciones puede suponer una ventaja para el operador de trenes, ya que disminuirían las bajas por enfermedad debidas a dolencias como el dolor de espalda.

Por lo tanto, como **objetivo principal** de la tesis se plantea la demostración de la siguiente **hipótesis**: es posible proponer un procedimiento e indicadores alternativos o complementarios a los indicados en las normativas para la valoración de las vibraciones y su efecto en la salud de los conductores, de modo que, sin dejar de basarse en éstas, permita una menor posibilidad de interpretación. Dicho procedimiento definiría el

nivel de emisiones de vibraciones del sistema vehículo-vía. Este nivel de vibraciones podría servir para establecer los análisis de riesgos exigidos por la directiva europea, sustituyendo a las costosas mediciones para valorar la exposición a las vibraciones.

Como **objetivo secundario**, y debido al elevado coste y plazo temporal asociados a las medidas de campo en el sector del ferrocarril, que frecuentemente implican el cierre de tramos completos de vía y la contratación de horas extras de personal especializado, se pretende analizar la posibilidad de aprovechamiento de alguna de las pruebas llevadas a cabo en el proceso de homologación del vehículo en cuestión, completándolas con medidas adicionales para garantizar que no existe afectación de la salud de los conductores. En particular, se pretende comprobar si los datos obtenidos durante los ensayos de homologación dinámica del tren pueden ajustarse para validar el vehículo desde el punto de vista de la influencia sobre la salud de su conductor. Para ello se examinarán las características especiales de los parámetros de velocidad, duración de las medidas, trazado de vía y tratamiento estadístico de las señales que se realizan en los ensayos dinámicos. Se estudiará el método más adecuado para la extrapolación de las medidas realizadas durante la homologación de los vehículos ferroviarios, de modo que se puedan utilizar en el cálculo del índice de emisión de vibraciones.

2.1 Alcance de la tesis.

Dentro de los campos clásicos examinados en los estudios sobre la vibración en humanos, esta tesis se concentra en el análisis de las vibraciones presentes en las cabinas de conducción de vehículos ferroviarios y sus asientos. En la Figura 2.1.1. se remarca en rojo el ámbito de la tesis, que se centra en el análisis de las vibraciones para definir un índice objetivo y homogéneo. No se realizarán estudios médicos ni encuestas de análisis subjetivo para la valoración del índice y especialmente el límite.

	Measurements			Field of application		
	Subjective	Instrumental	Performance	Trains	Military vehicles	Other vehicles
Exposure						
Task						

Figura 2.1.1. Alcance de la Tesis (VIBSEAT final Technical Report 2005.)

No es objetivo de esta tesis realizar un estudio epidemiológico sobre los efectos de las vibraciones sobre la salud y establecer el límite a partir del cual se producen daños sobre la salud de los conductores. Como se ha indicado en capítulos anteriores esta cuestión es difícil de dictaminar y exigiría numerosos estudios médicos.

Tampoco es objeto de la tesis examinar la influencia de las vibraciones sobre el desarrollo de actividades del conductor, aunque si se tendrá en cuenta a la hora de establecer nuevas metodologías.

2.2 Metodología.

Para alcanzar los objetivos mencionados en el apartado anterior se propone utilizar la metodología que se describe a continuación.

2.2.1 Análisis del entorno vibratorio de vehículos ferroviarios.

En la Figura 2.2.1 se muestran los distintos factores que pueden influir en este comportamiento dinámico y en su influencia sobre la salud. Para determinar cuáles son los niveles de vibración a los que está sometido el conductor se partirá del análisis de las aceleraciones medidas en el piso de las cabinas de diferentes vehículos ferroviarios. Como se ha indicado el comportamiento dinámico del sistema vía-vehículo-asiento-conductor depende de cada uno de estos cuatro componentes (Nagai et al. 2006). Dado que los asientos son un componente fácilmente cambiante se separará el estudio del sistema dinámico vía- vehículo del asiento conductor, que se analizarán aparte.

Se puede determinar al comportamiento de un mismo vehículo circulando por distintas vías, a distintas velocidades, en distintas condiciones de mantenimiento, circulando por distinto tipo de curvas, comportamiento ante eventos discretos, cantidad de impactos en la señal etc. Se puede determinar al grado de validez de las medidas realizadas teniendo en cuenta los tramos de vía por que se circula y la duración que deben tener las medidas realizadas. También se determinará la validez de realizar las mediciones en el peor de los ejes o en los ejes más desfavorables si como parece entre el eje lateral y vertical no se puede establecer una predominancia clara. Estas vibraciones serán la entrada del sistema dinámico compuesto por el asiento- conductor.

2.2.2 Análisis del sistema Asiento- Conductor.

En la normativa ferroviaria se recomienda realizar mediciones a nivel de suelo (en general tanto para el estudio del confort como para el estudio de la influencia de la salud). Sin embargo, en la normativa sobre la salud se recomienda realizar las mediciones en la interfaz entre el asiento y el conductor. Se examinarán las características del sistema asiento- conductor desde el punto de vista dinámico, así como de los componentes que puedan tener influencia en su comportamiento.

Hasta el momento no se habían obtenido resultados satisfactorios en la determinación de las aceleraciones en el asiento calculadas a partir de las aceleraciones en el piso.

Se revisarán los modelos propuestos en la literatura comprobando su idoneidad, para por un lado poder llegar a conclusiones correctas en las valoraciones de las aceleraciones en el asiento a partir de las aceleraciones en el piso y por otro lado servir como metodología de diseño de los asientos y los vehículos.

En esta tesis se propone un método para el cálculo de las aceleraciones a nivel del asiento a partir de las aceleraciones medidas en la cabina.

2.2.3 Análisis de las mediciones realizadas en la interfaz entre el asiento y el conductor en vehículos ferroviarios.

Se examinarán las mediciones realizadas en vehículos comerciales para establecer la validez de estas medidas según indica la normativa. En este caso se puede comprobar la validez de los distintos filtros propuestos y la variación de los resultados según los distintos tratamientos estadísticos de las señales. Si los resultados obtenidos anteriormente sobre el cálculo de las aceleraciones en la interfaz entre el asiento y el conductor son correctos, se puede comparar las diferencias entre las medidas en un recorrido comercial y los recorridos que se miden durante una certificación dinámica.

Aunando todos los puntos anteriores se propondrá el método que parece más adecuado para valorar las aceleraciones a las que está sometido el conductor. Una vez estudiado el problema de forma global se puede

establecer unas guías para el diseño del sistema vehículo- asiento desde el punto de vista de las vibraciones transmitidas al conductor y métodos para optimizar y reducir el nivel de vibraciones en las cabinas de conducción.

Figura 2.2.1. Factores que afectan a las vibraciones en las cabinas de vehículos ferroviarios (UNE-EN 14363 2017).

2.2.4 Establecimiento de un nuevo indicador y validación.

Tras analizar el estado del arte en cuanto a normativa y estudios además del entorno vibratorio de las cabinas en los trenes, se propone un nuevo indicador. El objetivo será eliminar las características identificadas y las críticas encontradas en la literatura, para conseguir un indicador objetivo y sencillo de medir, incluso que pueda aprovechar las medidas realizadas para otros fines. Para validar el indicador se realizarán pruebas en recorridos reales mediante un cojín instrumentado, aprovechando las operaciones asociadas a las pruebas de certificación.

Con el objeto de ampliar el número de puntos con el que se calcula el indicador, se desarrollará un modelo de redes neuronales. Este modelo permite calcular las aceleraciones en el cojín a partir de las medidas reales tomadas en el piso de cabina para otras pruebas. Se mostrará la robustez del indicador al incluir un mayor número de puntos para el cálculo y para poder compararlo contra lo que establece la norma.

2.3 Esquema de la tesis

La tesis se divide en 9 capítulos En el primer capítulo se presentan la introducción y motivación de la tesis, definiendo el objetivo en este capítulo 2.

En el tercer capítulo se analiza la normativa actual que se puede aplicar a para la valoración de la exposición a las vibraciones de los conductores de ferrocarril. También se analiza la normativa aplicable a los

asientos (con su aplicación a los asientos de ferrocarril) y la normativa de análisis de comportamiento dinámico y de confort de vehículos ferroviarios. A continuación, se revisan los estudios publicados y las conclusiones que se pueden extraer de ellos tanto del entorno vibratorio como de la aplicación de la norma e índice utilizados.

En el cuarto capítulo se analizan los asientos desde el punto de vista dinámico y los modelos matemáticos que se pueden utilizar para prever las aceleraciones que transmitirán al conductor a partir de las aceleraciones que se presentan en el piso de la cabina. Así mismo se indica una breve introducción al estado del arte de las redes neuronales.

En el capítulo quinto se analizará el entorno vibratorio en las cabinas de conducción a partir de los numerosos datos obtenidos en la homologación de distintos vehículos ferroviarios. De este modo se pueden determinar las características principales de estas vibraciones. A partir del análisis de las vibraciones, se establecerán los criterios considerados idóneos para la valoración de las vibraciones desde el punto de vista de la salud de los conductores de los vehículos ferroviarios.

En el sexto capítulo se propone un nuevo índice de emisión de vibraciones para caracterizar el vehículo y la metodología para calcularlo. También se propone un índice del nivel de exposición a las vibraciones para el caso particular de un vehículo que circula por una vía determinada.

En el capítulo séptimo, se valida la idoneidad del indicador, basándose en medidas reales tomadas en ensayos reales con un cojín.

En el capítulo octavo se diseñará un modelo basado en redes neuronales para predecir el comportamiento del sistema dinámico vehículo-asiento-conductor. Utilizando este modelo se corroborará la robustez del índice de emisión de vibraciones propuesto en el capítulo séptimo. Con el modelo de redes neuronales se pueden utilizar todos los datos de las medidas realizadas durante el proceso de homologación dinámica del vehículo.

Por último, en el noveno capítulo se evalúan las conclusiones y futuras investigaciones que se derivan de esta tesis.

3 ANALISIS CRÍTICO DE LA NORMATIVA Y ESTUDIOS PARA LA VALORACIÓN DE LAS ACELERACIONES A LAS QUE ESTÁ EXPUESTO UN CONDUCTOR DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS

En este capítulo se revisarán las distintas normativas que podrían aplicarse para la valoración de las vibraciones a las que está sometido el conductor de vehículos ferroviarios, analizando su idoneidad, ventajas e inconvenientes. También se analizan la normativa específicamente ferroviaria y la normativa aplicable a los asientos. El presente capítulo pretende hacer un resumen de la normativa existente para que sirva como base a las propuestas expuestas en los siguientes capítulos. Finalmente se revisa el estado del arte de los artículos publicados en la literatura sobre las vibraciones en los puestos de conducción.

3.1 Normativa para la valoración de las aceleraciones a las que está expuesto un conductor de vehículos ferroviarios

Hoy en día existen multitud de normas que se podrían aplicar para valorar las aceleraciones a las que está sometido un conductor de vehículos ferroviarios desde el punto de vista del efecto que estas aceleraciones tienen sobre la salud. Sin embargo, aunque los métodos son parecidos entre unas normas y otras, no existe una regla y un criterio único para determinar los límites que garanticen que la salud laboral de los trabajadores. El capítulo se divide en tres tipos de normas; las que afectan a las vibraciones finales que recibe el maquinista, las que se podrían aplicar a los asientos y las que aplican a los vehículos ferroviarios.

En la primera parte se examinan las consecuencias que tienen sobre la industria la aplicación de las directivas europeas y decretos del gobierno español que normalizan de un modo general los límites establecidos para todos los ámbitos laborales. Sobre el maquinista actúan las aceleraciones que son transmitidas a través del asiento (además de a través del punto de apoyo de los pies). A su vez dichas aceleraciones se transmiten desde la vía hasta el asiento a través del vehículo. Por ello, posteriormente se analiza la normativa aplicable a los asientos, especialmente aquella que afecta los asientos ferroviarios.

En la última parte se examina la normativa existente para caracterizar el vehículo ferroviario como sistema dinámico. Por un lado, se revisan los límites que se establecen para la validación de un vehículo desde el punto de vista dinámico para poder autorizarlo a circular por todas las vías normalizadas. Por otro lado, se examinan normas que afectan al confort en vehículos ferroviarios. En muchos casos el método de valoración de las aceleraciones desde el punto de vista de la salud y el confort son parecidos (filtros, valores R.M.S., etc.) pero las consecuencias de las aceleraciones no son iguales. En el caso del confort, este será mayor cuando las aceleraciones sean menores, pero los pasajeros están expuestos a estas aceleraciones unas pocas horas. Sin embargo, los conductores están sometidos a estas aceleraciones diariamente, el tiempo que están conduciendo a lo largo de la jornada laboral. En la Figura 3.1.1 se muestra la normativa aplicable para la valoración de los efectos de las vibraciones sobre la salud

Figura 3.1.1. Normativa aplicable en la valoración de las vibraciones en la salud (elaboración propia).

En adelante se revisará la normativa que podría ser de aplicación, incidiendo en el alcance, objetivos y análisis crítico para el caso de aplicación de esta normativa al sector ferroviario o a la salud.

3.1.1 Normas que valoran las aceleraciones que a las que está sometida el cuerpo humano.

En esta parte del capítulo se revisará aquella normativa que se podría aplicar, según el estado del arte actual, para valorar el entorno vibratorio del puesto de trabajo de un conductor de vehículos ferroviarios.

3.1.1.1 ISO 2631 (1997) Vibración mecánica y choques. Evaluación de la exposición humana a la vibración de cuerpo completo. Parte 1 Requerimientos generales

Objetivo y motivación de la norma

La norma general que examina las vibraciones a las que está sujeto el cuerpo humano y que fue el origen del resto de normas y directivas es la ISO 2631 en su versión de 1997. Esta norma fue elaborada por el subcomité 4 (SC4 “Human exposure to mechanical vibration and shock.”) del comité técnico ISO/TC 108 (Mechanical vibration and shock”)

La norma ISO 2631-1 no ha sido adoptada por el CEN como norma europea, en su lugar se ha elaborado la norma (**BS EN 14253:2003+A1:2007**). Sin embargo, muchos de los métodos, filtros y factores utilizados por normativa europea derivan de esta norma. Todavía se utiliza incluso en Europa para la evaluación de las vibraciones y existen numerosos estudios realizados según esta norma. Existen varias partes subsiguientes que se refieren a vibraciones en edificios (parte 2) vibraciones en ferrocarril (parte 4) y vibraciones con múltiples impactos (parte 5)

El objetivo de la norma es establecer una guía cuantitativa para la valoración de los efectos de la vibración sobre la salud y el confort, así como la percepción y la incidencia del mareo. Define los métodos de

medida de las vibraciones periódicas, aleatorias y transitorias que actúan sobre el cuerpo humano e indica los principales factores que combinados determinan en qué grado es aceptable la exposición a las vibraciones

Esta norma no tiene en cuenta el efecto de las vibraciones sobre el desarrollo de actividades por parte del ser humano ya que éste depende en gran medida de detalles ergonómicos, de la postura y del desarrollo de la tarea. En cualquier caso, los métodos presentados en esta norma se pueden aplicar para determinar la capacidad del ser humano para desarrollar actividades bajo el efecto de las vibraciones.

Descripción de la norma

Analizando la norma desde el punto de vista de la salud, que es el efecto que se trata en esta tesis, se describe el procedimiento definido en la norma a continuación. La valoración de las vibraciones se realiza a partir de la medida de las aceleraciones realizadas en la interfaz entre el cuerpo humano y la fuente de vibración (bajo las tuberosidades isquiales o en el marco del asiento para el caso del respaldo) según los ejes comúnmente establecidos para las medidas de aceleraciones de cuerpo entero. Para el caso de un conductor se aplica los ejes de cuerpo sentado como se muestra en la Figura 3.1.2.

Figura 3.1.2. Ejes de medida de las vibraciones (ISO 2631-1, 1997).

La duración de la medida debe ser lo suficientemente amplia para que estadísticamente asegure que se dan los casos típicos de vibraciones a los que está expuesto el ser humano.

En primer lugar, para determinar los efectos de las aceleraciones se ponderan las señales adquiridas mediante filtros adecuados que reflejan la percepción del ser humano frente a las vibraciones a distintas frecuencias. Según esta norma se debe filtrar en primer lugar la señal para limitar el ancho de banda de la señal entre 0.4 y 100 Hz mediante filtros paso alto y paso bajo tipo Butterworth. Posteriormente se utilizan los siguientes filtros según la dirección de medida. Así mismo se indican los factores multiplicadores dependiendo del eje de medida en la Tabla 3-1. Siendo a_f la aceleración en los tres ejes a nivel del suelo, a_{sz} las aceleraciones en los ejes de traslación del asiento, a_{sr} las aceleraciones en los ejes de rotación del asiento y a_b la aceleración en los tres ejes del respaldo

Para el caso del confort los filtros y factores multiplicadores muestran en la Tabla 3-2.

Tabla 3-1. Filtros y multiplicadores de la normativa (ISO 2631-1, 1997).

POSICIÓN		PONDERACIÓN (eje)	K	Estimación (ISO 2631-1;1997)
Sentado	Traslación (asiento)	$W_d(x)$	1.4	$a_w = (K_x^2 a_{wx}^2 + K_y^2 a_{wy}^2 + K_z^2 a_{wz}^2)^{1/2}$
		$W_d(y)$	1.4	
		$W_k(z)$	1	
Sentado	Traslación (respaldo)	$W_c(x)$	0.8	

Si en lugar de utilizar solo los tres ejes de traslación se utilizase la medición sobre los 12 ejes los factores serían según Figura 3.1.3

Translational									Rotational			$a_v = \sqrt{a_f^2 + a_{sz}^2 + a_{sr}^2 + a_b^2}$
Seat			Back-rest			Floor			Seat			
x	y	z	x	y	z	x	y	z	r _x	r _y	r _z	
1	1	1	0,8	0,5	0,4	0,25	0,25	0,4	0,63	0,4	0,2	

Figura 3.1.3 Método de los 3 ejes de traslación (Marjanen, 2004).

Tabla 3-2 Filtros y multiplicadores para el cálculo de confort(ISO 2631-1, 1997).

POSICIÓN (Lugar de medición)		PONDERACIÓN (eje)	K	Estimación (según ISO 2631-1:1997)
CONFORT (0,5 a 80 Hz) ^{1,2}				
	Traslación (asiento)	W _d (x) W _d (y) W _k (z) W _b (trenes)	1 1 1	a _w = (k _x ² a _{wx} ² + k _y ² a _{wy} ² + k _z ² a _{wz} ²) ^{1/2}
Sentado	(asiento)	W _s (rx)	0,63 m/rad	
		W _s (ry)	0,4 m/rad	
		W _s (rz)	0,2 m/rad	
	Rotación (respaldo)	W _c (x)	0,8	
		W _d (y)	0,5	
		W _d (z)	0,4	
	(pies)	W _k (x)	0,25	
		W _k (y)	0,25	
W _k (z)		0,4		
De pie (suelo)		W _d (x) W _d (y) W _k (z)	1 1 1	

Los filtros se muestran en la Figura 3.1.4

Figura 3.1.4 Filtros de ponderación según ISO 2631-1.

Según la literatura existen diversas maneras de interpretar el proceso a seguir de esta norma como muestran las Figura 3.1.5 y Figura 3.1.6

Figura 3.1.5. Interpretación de la norma ISO 2631-1 (Mansfield y Maeda 2011).

Figura 3.1.6 Interpretación de la norma 2631-1 (Y. Marjanen, Mansfield, y Maeda 2006).

Donde los parámetros principales que se indican en los diagramas anteriores se calculan como se indica en la Tabla 3-3

Si dos ejes presentan valores similares se puede utilizar el vector suma, aunque no es mandatorio y no se indica cómo interpretarlo.

Teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto y que la respuesta del cuerpo humano está relacionada con la energía transmitida en las vibraciones se puede deducir que dos exposiciones diarias son equivalentes cuando

$$a_{w1}T_1^{\frac{1}{2}} = a_{w2}T_2^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 1}$$

O bien, según otros estudios,

$$a_{w1}T_1^{\frac{1}{4}} = a_{w2}T_2^{\frac{1}{4}} \quad \text{Ecuación 2}$$

Esto se traduce en una zona de precaución según la guía para la salud que se muestra en la Figura 3.1.7.

Tabla 3-3. Parametros principales utilizados en la ISO 2631-1

Parámetro	Fórmula	Observaciones
Valor eficaz ponderado o r.m.s.	$a_w = \left[\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}}$	Se debe calcular para cada uno de los ejes a _w es la aceleración ponderada con los filtros anteriores. T es el tiempo de medida
Vector suma r.m.s	$r.m.s = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} a_w^2(n)}$	a _{wi} valor eficaz ponderado, K _i son los factores arriba indicados
Factor de cresta	$CF = \max(a_w) / \text{running r.m.s. } (a_w(t_0))$	CF mínimo es 1 para ondas cuadradas, 1.4 para ondas sinodales y 1.7 para ondas gaussianas; muestra la existencia de impactos en la señal.
Valor máximo de la vibración transitoria o valor máximo de R.M.S. móvil	$MTVV = \max \left(\sqrt{\frac{1}{\tau} \sum_{n=n_0}^{n_0+\tau} a_w(n)^2} \right)$	Valores máximos del R.M.S. calculados en periodos más cortos
Valor de la dosis de la vibración (VDV) o método de la cuarta potencia	$VDV = \left[\int_0^T a_w^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}}$ $VDV = \sqrt[4]{\frac{1}{f_s} \sum_{n=0}^{N-1} a_w^4(n)}$	Tiene en cuenta los impactos más claramente que el valor R.M.S. Otra característica es que este valor no decae cuando existen periodos de vibración nula o niveles bajos
Vector suma VDV	$VDV_{xyz} = (K_x^4 VDV_x^4 + K_y^4 VDV_y^4 + K_z^4 VDV_z^4)^{1/4}$	Los factores k son los mismo que para el R.M.S. indicados en la tabla

Figura 3.1.7. Zonas de precaución según ISO 2631-1.

Para exposiciones por debajo de la zona de precaución no se han documentado efectos sobre la salud. Estas relaciones se deben usar para exposiciones entre 4 horas y 8 horas, en las que prácticamente ambas ecuaciones coinciden. Un aumento del doble de la aceleración R.M.S. implica una reducción del tiempo de exposición de 4 veces en un caso y de 16 veces en el otro. El caso de método R.M.S. los límites son 1.15 m/s² y 0.5 m/s². Para las valoraciones según la dosis VDV el límite superior e inferior son 17 m/s^{1.75} y 8.5 m/s^{1.75}.

No existe una zona equivalente para el método MTVV.

➤ Cálculo de la exposición diaria

La exposición diaria a la vibración A (8) es la cantidad normalizada equivalente a 8 horas de exposición continua a ese nivel de vibración. Cuando existen distintos niveles de vibración debido a distintas tareas o trazados se calcula como

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{8} \sum_{n=1}^N a_{wn}^2 t_n} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde a_{wn} es el valor R.M.S. de la aceleración y t la duración sobre la que se calcula el valor R.M.S. (en horas) para una tarea n , siendo N el número de tareas.

El valor VDV es una dosis en sí y no es necesario normalizarlo a una duración de la vibración de referencia. Para extrapolar el VDV a una dosis diaria se debe realizar en dos etapas. En primer lugar, se establece una dosis total para cada tarea.

$$VDV_n = \sqrt[4]{\frac{t_n}{t_{n,measured}} VDV_{n,measured}^4} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde VDV_n es la dosis equivalente de cada tarea, t_n es el tiempo que se realiza cada tarea, $t_{n,measured}$ es el tiempo que se ha medido de una tarea n y $VDV_{n,measured}$ el valor VDV medido para la tarea n . En segundo lugar, se debe sumar cada VDV de cada tarea utilizando la expresión

$$VDV_{total} = \sqrt[4]{\sum_{n=1}^N VDV_n^4} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde VDV es el VDV diario. Para caracterizar la exposición diaria la aceleración ponderada de 8 horas puede ser medida o calculada con las 8 h como el periodo T. En caso de que existan varios periodos la exposición total se calcularía como se indica en la Tabla 3-4

Tabla 3-4. Dosis para 8 horas

Valores eficaces ponderados	Valor de dosis de la vibración
$a_{w,e} = \left[\frac{\sum a_{wi}^2 \cdot T_i}{\sum T_i} \right]^{\frac{1}{2}}$	$a_{w,e} = \left[\frac{\sum a_{wi}^4 \cdot T_i}{\sum T_i} \right]^{\frac{1}{4}}$

Siendo la relación entre la dosis de vibración estimada y el valor R.M.S.

$$eVDV = 1.4a_w T^{\frac{1}{4}} \quad \text{Ecuación 6}$$

Esta aproximación solo es válida para señales un factor de cresta inferior a 6.

➤ Límites de tiempo de exposición aceptable.

Una vez se conoce la emisión de vibraciones que produce un vehículo se puede calcular cual es el tiempo de exposición a la vibración aceptable para cumplir con una norma, guía o regulación según se indica en la Tabla 3-5.

Tabla 3-5. Límite de tiempo de exposición

Valores eficaces ponderados	Valor de dosis de la vibración
$T_{A(8)} = 8 \times \left[\frac{A(8)}{a_w} \right]^2$	$T_{VDV} = T \times \left[\frac{VDV_{threshold}}{VDV_{measured}} \right]^4$

Donde $T_{A(8)}$ es el tiempo para alcanzar A(8) en horas, A(8) es el límite establecido en la norma y a_w es el valor R.M.S. de la vibración ponderada medida. T_{VDV} es el tiempo para alcanzar el límite VDV en horas, T es el tiempo de duración medición, $VDV_{threshold}$ es el límite definido en la norma y $VDV_{measured}$ es el valor medido.

En cualquier caso, la norma incide en que si se sobre pasa el valor 9 para el factor de cresta se debe añadir un análisis más profundo con información sobre el contenido en frecuencia de las aceleraciones (espectro), ejes de las vibraciones, como cambian las condiciones con el tiempo u otros factores que puedan tener influencia

Comparándola con su norma homónima inglesa, la BS-6841 presenta las diferencias indicadas en la Tabla 3-6.

Conclusiones y discusión

El proceso de valoración de los riesgos sobre la salud mediante la norma ISO 2631 es bastante confuso. Si dos personas realizan medidas en el mismo vehículo y bajo las mismas condiciones según la norma ISO 2631 pueden darse resultados diferentes. Existen muchos métodos de valoración permitidos que no ayudan a concretar resultados.

Existen muchas cláusulas que quedan a la interpretación del operador y pueden llevar a conclusiones erróneas (Lewis y Griffin 1998). En otros casos se describe como calcular el valor, pero no como interpretarlo. Sería recomendable una versión más simple de la norma que deje menos interpretación al investigador, estableciendo los límites para otros métodos que no sean el del valor R.M.S., o VDV, e indicando claramente cuando se debe utilizar cada uno de los métodos.

Tabla 3-6. Comparativa ISO 2631-1 y BS 6841.

ISO 2631	BS 6841
Utilización del filtro vertical W_k .	Utilización del filtro vertical W_b . Si la vibración presenta mucha energía en la zona en la que difieren (25% por debajo de los 3 Hz) los resultados pueden ser muy distintos.
Vibraciones horizontales escaladas por el factor $K=1.4$ (aumenta un 40%).	No existen factores multiplicativos en los ejes.
Utiliza dos zonas de precaución como criterio de riesgo para la salud.	El factor de riesgo para la salud es de $15 \text{ m/s}^{1.75}$
Valoración de la vibración según el peor valor de la aceleración en todos sus ejes.	Valoración de la vibración por el valor combinado de la aceleración en todos sus ejes.
Límite del factor de cresta para la validez del método R.M.S. es 9.	El límite del factor de cresta para la validez del método R.M.S. es 6.

Los límites establecidos para los valores R.M.S. y VDV provienen de estudios epidemiológicos realizados sobre la incidencia de las vibraciones en trabajadores. Es necesario realizar más estudios bajo la misma norma para corroborar que los límites son los adecuados.

La guía que aplica esta norma es ambigua con una gran variedad de combinación de ejes y posicionamiento de los sensores. Existen estudios (Mansfield, 2008; Marjanen 2010) que demuestran que la inclusión de más ejes mejoran la correlación entre la amplitud de la vibración y la sensación de falta de confort, pero en la mayoría de los casos considerando un factor de 1.4 para los ejes de traslación es suficiente y no es necesario incluir las medidas según los ejes de rotación ya que estos presentan una pequeña contribución. La combinación de ejes se utiliza especialmente en el caso de la evaluación confort.

Como se verá más adelante los filtros utilizados para los trenes son distintos, especialmente el utilizado para las aceleraciones verticales. También varía respecto a la norma inglesa BS 6841. Estos filtros derivan de los estudios realizados sobre la percepción humana de las vibraciones. En realidad, deberían derivar de las consecuencias que producen las vibraciones sobre los distintos sistemas que componen el cuerpo humano. Ambas características están relacionadas ya que el cuerpo humano, considerado como sistema vibratorio, presenta una serie de resonancias a determinadas frecuencias que aumentan la incidencia de la vibración transmitida, como se observa en la Figura 3.1.8.

Figura 3.1.8 Resonancias características en el cuerpo humano (Kitazaki y Griffin 1997).

La duración de la medida, como se ha indicado, debe contener todos los casos típicos de vibración que se da a lo largo de la jornada laboral. En el caso de los vehículos ferroviarios, significaría que es necesario realizar medidas en todos los vehículos utilizados, por cada una de las vías por las que circula, ya que las vibraciones transmitidas al conductor dependen fuertemente del tipo de vehículo y de la vía por la que circula. Adicionalmente se debería realizar las mediciones para los distintos estados de mantenimiento del vehículo (rueda nueva, rueda desgastada, máxima poligonización admitida etc.). El esfuerzo para valorar las aceleraciones sería enorme. Habría que tener en cuenta los distintos turnos y la duración de los viajes que realizan los conductores o por lo menos el peor caso de estos.

En otras normas más específicas del ferrocarril se realiza un tratamiento estadístico para tener en cuenta la variabilidad de las aceleraciones cuando se realizan las medidas. De este modo se puede asegurar que, en cualquier caso, para un grado de probabilidad dado, las aceleraciones estarán por debajo de un nivel determinado.

Actualmente el comité ISO/TC 108/SC 4 ha decidido establecer un grupo de trabajo ad hoc para la "Revisión de ISO 2631-1:1997" focalizándose en la Evaluación la información nueva relativa a la cláusula 7 y el anexo B sobre el efecto de la vibración sobre la salud. El objetivo sería establecer una Guía para la evaluación de las vibraciones según los ejes x, y, y z. y estudiar la interacción entre la exposición a la vibración y otros factores ergonómicos del puesto de trabajo y la postura.

3.1.1.2 ISO 2631-4 (2001) Vibración mecánica y choques. Evaluación de la exposición humana a la vibración de cuerpo completo. Parte 4 Guías para la evaluación de los efectos de la vibración y el movimiento rotatorio en el confort de los pasajeros y la tripulación en el transporte guiado.

Objetivo y motivación de la norma

Aunque esta norma trata principalmente sobre el confort se ha incluido aquí ya que tiene en cuenta las características propias de las vibraciones en ferrocarril y además se ocupa del confort de la tripulación. El objetivo es proporcionar una guía para la evaluación de los efectos de la vibración mecánica sobre el confort de los pasajeros y la tripulación de los vehículos guiados por carriles.

Descripción de la norma.

En esta norma se realizan consideraciones relevantes referentes a las características del ferrocarril. Aunque el método preferido por la norma ISO 2631-1 para la evaluación de las vibraciones en los asientos es en la interfaz entre el asiento y el cuerpo humano no siempre es la más adecuada debido a los cambios de postura que se producen en estos medios de transporte y a los movimientos voluntarios realizados por el pasajero. Por otro lado, los asientos no son un componente permanente del vehículo, ya que a lo largo de su vida (30 años o más) pueden ser cambiados varias veces. Las vibraciones presentes en el ámbito del ferrocarril pueden interferir con las actividades que se realizan en él, como leer, teclear u otras actividades que requieren concentración visual. (Nakagawa y Suzuki 2005; Ågren y Westberg 2002) Las condiciones de mantenimiento tanto del vehículo como de la vía tienen gran influencia sobre el nivel de vibraciones que se producen en el recorrido. Las pruebas que se deben llevar a cabo deben tener un número suficiente de curvas y rectas para caracteriza el comportamiento del vehículo en un rango amplio de recorridos. Así mismo dichas pruebas se deberían realizar con vehículos con rueda nueva y desgastada, y en carga y en vacío. También se indica en esta norma que las vibraciones rotatorias pueden inducir kinetosis o mareos sobre todo si se producen repetidas veces.

Sin embargo, la principal diferencia entre esta norma y la anterior es que para la ponderación de las aceleraciones verticales indica que se debe utilizar el filtro W_b en vez del filtro W_k . En la Figura 3.1.9 se indica la diferencia entre ambos filtros

Figura 3.1.9 Diferencia entre los filtros W_b y W_k (ISO 2631-4 2001).

El proceso de valoración de las aceleraciones se realiza como se ha indicado en la ISO 2631-1 teniendo las características indicadas anteriormente.

Por último, establece una serie de criterios para realizar los ensayos directos de confort sobre pasajeros

Conclusiones y discusión

Esta norma particulariza la ISO 2631-1 para el sector ferroviario, pero principalmente desde el punto de vista del confort y no de la salud de la tripulación. No establece ningún límite ni para el confort ni para la salud.

No hace referencia a los ejes de medida ya que el criterio es el mismo que para la ISO 2631-1. Incluye las aceleraciones del giro de la caja alrededor del eje x, que deben ser medidas especialmente para vehículos pendulares.

Respecto a los filtros, utiliza un filtro diferente para las aceleraciones verticales. Aunque en general ambos filtros dan resultados muy parecidos por debajo de los 8 Hz el filtro W_b da resultados un 80 % menores mientras que por encima de los 8 Hz los valores pueden ser un 120% mayores.

Según la norma los ensayos se deben realizar en tramos representativos de vía recta y curva. El estado del vehículo y de la vía debe ser descrito para poder comparar con otros ensayos. Pero no queda definido que tramos o qué tipo de vía debe ser utilizada para llevar a cabo los ensayos.

Aunque indica que existe una gran variabilidad en la señal, no proporciona ningún método para contemplar este problema. En este punto hace referencia a la ISO 10056 para definir un método estadístico que tenga en cuenta la variabilidad de la señal.

Como puntos de medida establece que se debe medir en el suelo y en la interfaz hombre – asiento. Sin embargo, explica por qué no son normativas las medidas en los asientos en el sector del ferrocarril y sí que son normativas las medidas a nivel de suelo, ya que los asientos son remplazados varias veces a lo largo de la vida de los vehículos ferroviarios.

3.1.1.3 ISO 2631 parte 5 (2004). Vibración mecánica y choques. Métodos para la evaluación de la vibración que contiene impactos múltiples.

Objeto de la norma

Esta norma se desarrolló para completar la primera parte, especialmente en la aplicación a los vehículos todoterreno de uso militar, donde se producen impactos repetidos. Los estudios llevados a cabo concluyeron que la respuesta biomecánica de la espina dorsal depende del eje del impacto, la amplitud y dirección, siendo el eje vertical el que producía mayores respuestas. El objeto de la norma es analizar el efecto de los impactos

múltiples en relación a la salud de los seres humanos, pero solo en el caso de la posición sentada. Hoy en día se puede utilizar para llevar a cabo los análisis de riesgo para impactos repetidos exigidos por la directiva 2002/44 ya que es la única norma que analiza los impactos (Marjanen 2005).

Descripción de la norma

Mediante modelos realizados a base de redes neuronales para el caso de las aceleraciones verticales (no lineal) y modelos de un grado de libertad (lineal) para aceleraciones horizontales se calcula la aceleración que se produce en la espina dorsal a partir de las aceleraciones en el asiento. De esta manera se puede calcular una dosis de aceleración (D_x , D_y y D_z), sumando los picos de la respuesta de la aceleración. (Véase Figura 3.1.10).

Figura 3.1.10. Método de aplicación de la norma ISO 2631 parte 5 (ISO 2631-5 2018).

Estas dosis son normalizadas para un día de trabajo en función de los datos grabados y se calcula la exposición total diaria (D_{xd} , D_{yd} y D_{zd}). Posteriormente se combinan para obtener la tensión de compresión estática con el que se calcula el factor de riesgo (este tiene en cuenta la edad del conductor, el número de días que está sometido a la vibración, etc.). Si este es menor que 0.8 ($S_{ed} < 0.5$ Mpa) la probabilidad de afectar a la salud laboral es baja y si es mayor que 1.2 ($S_{ed} > 0.8$ Mpa) la probabilidad es alta (derivados de los valores conocidos de la resistencia de la columna vertebral). Para ello se definen 4 categorías de riesgo (ISO 2631-5 2018, 23) según la Tabla 3-7.

Tabla 3-7. Categorías de riesgo en norma ISO 2631-1 parte 5.

Whole-Body Vibration			Repeated Shocks		HHA	
ISO 2631-1			ISO 2531-5		AR 40-10	
WBV Exposure Limit(minutes)	Daily Vibration Dose Value VDV(8) (m/s1.75)		Equivalent Stress, S_{ed} (Mpa)	Daily Risk Factor R	Severity Category	
<10	>21		>0,95	>1,4	I.	Catastrophic
10-30	13-21		0.65-0.95	1.4-1.0	II.	Critical
30-180	4-13		0.35-0.65	1.0-0.6	III.	Marginal
> 180	<4		<0.35	<0.6	IV.	Negligible

Según la misión que se vaya a realizar se adjudica un nivel de probabilidad de riesgo a la exposición a los impactos repetidos. Según la severidad de la categoría y el nivel de probabilidad se asigna un código de valoración del riesgo entre 1 y 5 (Alem 2005) (véase Tabla 3-8).

Tabla 3-8. Valoración de riesgos en norma ISO 2631-1 parte 5.

Hazard		Probability		Likelihood of Occurrence	
Level		Label	In <i>a vehicle</i>	In the <i>fleet</i>	
A		Frequent	Frequently	Continuously	
B		Probable	Several times	Frequently	
C		Occasional	Sometime	Several times	
D		Remote	Unlikely, possible	Unlikely, expected	
E		Improbable	May never occur	Unlikely, possible	

Probability Levels						
Severity Categories	A		B	C	D	E
	Frequent		Probable	Occasional	Remote	Improbable
	I. Catastrophic	1	1	1	2	3
	II. Critical	1	1	2	3	4
	III. Marginal	2	3	3	4	5
	IV. Negligible	3	5	5	5	5

Conclusiones y discusión

Existe una cierta correlación entre el VDV y el S_{ed} ya que ambos detectan vibraciones con altos contenidos de impactos. Pero para valores admisibles de VDV en la ISO 2631-1 se dan valores muy altos de S_{ed} como se observa en la Figura 3.1.11.

Figura 3.1.11. Correlación entre S_{ed} y VDV (Yka Marjanen 2005).

Aunque esta norma está diseñada para aplicaciones con un alto contenido vibratorio (R.M.S. entre 0.6 y 3 y VDV entre 2 y 14) el método de aplicación podría ser válido para vehículos ferroviarios

Existen estudios sobre las aceleraciones a las que están sometidos los maquinistas en Norteamérica, en los que se ha evaluado las vibraciones bajo la óptica de la ISO 2631-5 (Johanning, Fischer, et al. 2006). Las conclusiones sugieren que en las locomotoras estudiadas el riesgo a la exposición a las vibraciones con múltiples impactos es baja pero otros datos y experiencias indican que se puede infravalorar dichos efectos. De hecho, proponen un indicador que incluya otros factores como la ergonomía, el diseño del asiento, la postura y otros factores ambientales. (Alem 2005)

En este caso se realiza la valoración de las vibraciones en los tres ejes x, y y z combinándose para obtener una dosis global, aunque la vibración más dañina para la columna vertebral sea la dirección vertical. No existen factores multiplicadores. En lugar de utilizar filtros calcula los valores pico de las aceleraciones en cada una de las direcciones, por lo que obliga a eliminar errores en las medidas. No define la duración de las aceleraciones, pero sí que calcula una dosis diaria de aceleraciones, Como en el caso de la ISO 2631-1 habría que realizar mediciones en todas las vías de determinadas características y con todos los vehículos. Las medidas se deben realizar en las interfaces entre el conductor y el asiento, ya que si no sería muy difícil caracterizar los picos de las aceleraciones mediante cálculos o simulaciones.

3.1.1.4 EN 14253:2007 Vibraciones mecánicas. Medidas y cálculos de la exposición laboral a las vibraciones de cuerpo completo con referencia a la salud. Guía práctica.

Objetivo de la norma

La norma EN 14253 describe las precauciones que se deben tomar para la realización de las medidas representativas de la vibración y para determinar el tiempo de exposición diario para cada operación con el objetivo de calcular el valor de exposición diaria.

Descripción de la norma

El proceso determinado en la norma es muy similar al indicado en la ISO 2631-1, pero esta norma lo adapta al ámbito europeo Incluye ejemplos de cálculo de la exposición diaria a las vibraciones. Esta norma se puede utilizar para evaluar el cumplimiento de la directiva de la unión europea de los agentes físicos. Contempla solo el método R.M.S. y el método de valor A (8). El grupo de trabajo del CEN reconoce la necesidad de la evaluación de impactos, pero no acordó incluir el método VDV, aunque sea uno de los métodos indicados en la directiva. EL BSI está considerando generar una norma aparte para elaborar una guía equivalente para el uso del método VDV.

Conclusiones y discusión

La directiva europea establece unos límites para las aceleraciones basados en cálculos que se deben realizar bajo la ISO 2631-1. Paradójicamente la norma ISO 2631-1 no está aceptada como norma en Europa. Por ello se ha editado esta norma en la que se indica cómo se debe calcular los niveles de aceleración a los que están expuestos los trabajadores. Por lo tanto, sirven los mismos comentarios que los realizados para la norma ISO 2631-1. Adicionalmente, el hecho de no tener en cuenta la dosis de vibración VDV elimina uno de los métodos que pueden servir para calcular la exposición a las vibraciones con múltiples impactos.

3.1.1.5 Directiva 2002/44/CE de 25 de junio de 2002 sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativa a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (vibraciones)

Objeto de la directiva.

La directiva 2002/44/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002 (European Directive 2002/44/EC) sobre las disposiciones mínimas de seguridad y salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de agentes físicos (vibraciones) fue la primera directiva que especificó los

límites sobre la exposición a las vibraciones. Cubre el hueco existente, de modo que las vibraciones puedan ser evaluadas y controladas como cualquier otro riesgo físico, definiendo los parámetros a controlar y sus correspondientes valores límite. Es un compromiso entre las exigencias para establecer un límite de la exposición a las vibraciones que garantice la seguridad para la salud y la practicidad para cumplir con la directiva por parte de los sectores industriales (Mansfield 2004; Newell, Mansfield, y Notini 2006).

El objetivo de esta directiva es adoptar una serie de requerimientos mínimos para promover mejoras especialmente en el ambiente de trabajo y de este modo garantizar una mejor protección de la salud y la seguridad de los trabajadores. Los estados miembros pueden adoptar los límites propuestos por la directiva u otros más favorables para la salud de los trabajadores.

Descripción de la directiva.

Aunque la directiva se denomina de los agentes físicos, se concentra principalmente en los evitar y controlar los riesgos causados por el ruido y las vibraciones. Se indica que la mejor manera de reducir el nivel de vibraciones consiste en incorporar medidas preventivas en el diseño de los puestos de trabajo reduciendo los riesgos en la fuente de las vibraciones. Los empleadores deben llevar a cabo los ajustes necesarios según avanza el conocimiento científico y el progreso técnico. La directiva establece unos límites a la exposición de los trabajadores a la vibración para el caso de la vibración mano brazo y para la vibración de cuerpo completo. Para el caso que se trata en esta tesis, los límites sobre la exposición a las vibraciones de cuerpo completo son las indicadas en la Tabla 3-9 (European Directive 2002/44/EC.).

Tabla 3-9. Límites de exposición a la vibración según la directiva 2002/44.

Vibración de cuerpo completo	Valor de exposición diaria normalizado que da lugar a una acción:	Valor límite de exposición diaria normalizado:
	EAV	ELV
R.M.S A(8)	0.5 m/s ²	1.15 m/s ²
VDV	9.1 m/s ^{1.75}	21 m/s ^{1.75}

Los valores A (8) y VDV se calculan como el mayor valor R.M.S. o VDV de las aceleraciones ponderadas determinadas sobre los tres ejes ortogonales (1.4 a_{wx} , 1.4 a_w , o. a_{wz}).

El valor límite nunca debe ser sobrepasado y el valor de acción indica el límite a partir del cual se deben tomar medidas especiales. En la Figura 3.1.12 se indica el diagrama de aplicación:

Figura 3.1.12. Diagrama de aplicación de la directiva 2002/44/CE (Mansfield 2004).

Según esta directiva los empleadores deberán realizar medidas para determinar los niveles de vibración a los que están expuestos los trabajadores mediante servicios competentes a intervalos adecuados. Estos niveles de vibración pueden ser valorados mediante la observación de las prácticas de trabajo, teniendo en cuenta a la probabilidad de la magnitud de la vibración a la que se expone el trabajador por la utilización de un determinado equipo y las condiciones de uso, incluyendo la información del fabricante del equipo (véase Figura 3.1.13).

Es importante registrar el tipo y la duración de la exposición (incluyendo vibraciones intermitentes o impactos repetitivos) los valores límite y de acción, los efectos que afectan a la salud de un riesgo especial y cualquier efecto indirecto, la información del fabricante del equipo, si existe equipamiento para reducir los niveles de vibración, si existen bajas temperaturas y la información sobre la vigilancia de la salud publicada al respecto. En cualquier caso, esta directiva no proporciona una guía para interpretar todos estos factores.

El empleador debe llevar a cabo una valoración de riesgos con las medidas a implementar para reducir o eliminar estos riesgos especialmente si la vibración puede afectar al manejo el control o la lectura de indicadores.

El empleador deberá implementar un programa con medidas técnicas u organizacionales como otros métodos de trabajo (por ejemplo, conduciendo a otras velocidades), a la elección de otro equipo de trabajo (entiéndase vehículo) utilización de equipos auxiliares como asientos con suspensión que tengan en cuenta el peso del conductor, programas de mantenimiento, el diseño de los puestos de trabajo, la formación a los trabajadores y la limitación de los turnos u horarios.

Figura 3.1.13. Medición del nivel de vibraciones según directiva 2002/44/CE (Mansfield 2004).

Una vez se conoce la emisión de vibraciones que produce un vehículo se puede calcular cual es el tiempo de exposición a la vibración aceptable para cumplir con la directiva, tal y como se indica en el apartado correspondiente al tiempo límite de la ISO 2631.

Los trabajadores deben recibir la información concerniente a las vibraciones y los riesgos a los que están expuestos, especialmente sobre cómo detectar daños derivados de las vibraciones y de las prácticas de trabajo más seguras.

En la vigilancia sobre la salud la responsabilidad de realizar las disposiciones necesarias recae sobre los estados miembros.

El propósito es identificar de una forma temprana los desórdenes que puede provocar la vibración para poder eliminar el riesgo. Deben ser analizados los casos de enfermedad o efecto grave sobre la salud por un médico especialista en medicina de salud laboral que determine si la vibración es la causa de la vibración.

Existe un periodo de transición de 5 años desde el 6 de junio de 2005 para el equipamiento entregado antes del 6 de julio de 2007 y a partir de Julio de 2010 se deben cumplir en todos los vehículos excepto los agrarios. La directiva no afecta al ámbito marino y a la aviación.

Conclusiones y discusión

El objetivo de la directiva es mejorar la salud y seguridad de los trabajadores europeos, por ello las medidas que se tomen para reducir las vibraciones deben disminuir la incidencia de las vibraciones en las enfermedades. Pero esto puede tener consecuencias en los costes e incluso en la viabilidad de ciertos negocios o empresas.

Los costes vendrán derivados de la valoración de riesgos laborales, de las modificaciones o cambios vehículos, de la vigilancia de la salud o de la formación de los trabajadores. Incluso la propia vigilancia puede dar lugar a un aumento de quejas por daños sobre la salud. Según (Coles 2002), en las vibraciones de cuerpo completo el mayor coste vendrá derivado de la reducción de las vibraciones. Si la directiva tiene éxito, en el futuro habrá menos enfermedades debido a las vibraciones, implicando un menor gasto médico y menos reclamaciones por daños.

Por otro lado, los valores de emisión de vibraciones serán un factor importante a la hora de comprar un vehículo por lo que el fabricante debe diseñar los vehículos de modo que se reduzca la vibración al mínimo

Las consecuencias en algunos casos serán notables, e implicarán cambios en los modelos y en las mentalidades.

Según los estados miembros, se puede usar el valor R.M.S. o el VDV, aunque el VDV refleja mejor la influencia de las vibraciones (considerando impactos) es más difícil de medir e interpretar. La mayor parte de los estados utilizarán el valor R.M.S. aunque se prefiera el VDV para determinar los valores de acción. Esto provoca una falta de armonización entre los distintos estados.

Hay que considerar que para las vibraciones de cuerpo completo la directiva dicta que se debe utilizar el peor valor medido entre todos los ejes, aunque para eso se debe medir todos los ejes. Si un eje es predominante, los otros tendrán poca influencia en el valor final, pero si varios ejes tienen valores similares la raíz de la suma de los cuadrados del R.M.S. podría ser hasta un 73% mayor (Mansfield 2004; Y. Marjanen, Mansfield, y Maeda 2006). En el caso de ferrocarril lo normal sería que dos ejes (lateral y vertical) tengan un valor similar de R.M.S. por lo que significa que vector suma sería un 41% mayor que el valor obtenido del peor eje.

El establecimiento de los límites es complicado para las vibraciones de cuerpo completo ya que existen numerosos factores que puede inducir al dolor de espalda (ergonomía, postura, humedad, temperatura etc.)

Dado que el método de evaluación corresponde al indicado en la ISO 2631-1, respecto al método de cálculo sirven los mismos comentarios realizados para dicha norma.

3.1.1.6 REAL DECRETO 1311/2005, de 4 de noviembre.

Objetivo del real decreto

En España actualmente existe la siguiente legislación en la materia que nos ocupa (Garcia Ortiz 2005)

- Ley de Prevención de Riesgos Laborales, Ley 31/1995 de 8 de noviembre. Se adaptaba a las directivas europeas, dejando el desarrollo de la ley a los respectivos reglamentos que fueran emanando de ella.
- Reglamento de Seguridad en Máquinas, aprobado por RD. 1495/1986, de 21 de julio que transpone tanto la Directiva 89/392/CEE como su primera modificación, Directiva 91/368/CEE.

- En la misma línea que el anterior el R. D. 1435/1992, de 27 de noviembre intenta aproximar las legislaciones de los Estados de la Unión Europea sobre máquinas en la relación con la directiva mencionada anteriormente (89/392/CEE).
- También es citado este agente físico brevemente en el R. D. 1215/1997, de 18 de julio, por el que se establecen los requisitos mínimos de seguridad y salud para la utilización por los trabajadores de los equipos de trabajo y transpone las Directivas 89/655/CEE y su modificación 95/63/CEE.

Teniendo en cuenta todo lo anterior mediante el Real Decreto 1311/2005 se procede a la transposición al derecho español del contenido de la directiva 2002/44/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de junio de 2002, sobre las disposiciones mínimas de seguridad y de salud relativas a la exposición de los trabajadores a los riesgos derivados de los agentes físicos (vibraciones).

Descripción del real decreto

El real decreto (Real Decreto 1311/2005) especifica los valores límite de exposición diaria y los valores de exposición diaria que dan lugar a una acción, para la vibración transmitida al cuerpo entero y el procedimiento que debe seguirse para ello trasponiendo lo indicado en la directiva pero obviando los límites para las valoraciones en VDV. Prevé diversas especificaciones relativas a la determinación y evaluación de los riesgos, y establece, en primer lugar, la obligación de que el empresario efectúe una evaluación de los niveles de vibraciones mecánicas a que estén expuestos los trabajadores, que incluirá, en caso necesario, una medición. Asimismo, regula las disposiciones encaminadas a evitar o a reducir la exposición, de manera que los riesgos derivados de la exposición a vibraciones mecánicas se eliminen en su origen o se reduzcan al nivel más bajo posible.

También incluye la obligación de que el empresario establezca y ejecute un programa de medidas técnicas y/o de organización. Recoge dos de los derechos básicos en materia preventiva, como son la necesidad de formación de los trabajadores y la información a estos, así como la forma de ejercer los trabajadores su derecho a ser consultados y a participar en los aspectos relacionados con la prevención teniendo en cuenta que su objetivo es la prevención y el diagnóstico precoz de cualquier daño para la salud como consecuencia de la exposición a vibraciones mecánicas.

Todo trabajador expuesto a niveles de vibraciones mecánicas superiores a los valores establecidos tendrá derecho a una vigilancia de la salud apropiada incluyendo la elaboración y actualización de la historia clínico-laboral.

Análogamente a lo establecido en la directiva, para evaluar el nivel de exposición a la vibración mecánica, podrá recurrirse a la observación de los métodos de trabajo concretos y remitirse a la información apropiada sobre la magnitud probable de la vibración del equipo o del tipo de equipo utilizado en las condiciones concretas de uso, incluida la información facilitada por el fabricante. Esta operación es diferente de la medición, que precisa del uso de aparatos específicos y de una metodología adecuada (Real Decreto 1311/2005 2005). Cuando se proceda a la medición, los métodos utilizados podrán implicar un muestreo, que deberá ser representativo de la exposición del trabajador a las vibraciones mecánicas en cuestión. Además, las mediciones o evaluaciones deben repetirse periódicamente.

Este real decreto vuelve a hacer hincapié como la directiva en las interferencias que las vibraciones pueden producir con la conducción, en la lectura de indicadores o en el manejo de manipuladores.

El Instituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo (<https://www.insst.es/>) deberá realizar estudios técnicos especializados en materia de vibraciones mecánicas, teniendo en cuenta el estado de la técnica y la experiencia obtenida en otros Estados. En función de este estudio se podrá modificar el real decreto para determinar las fechas definitivas. Así mismo elaborará y mantendrá actualizada una guía técnica de carácter no vinculante, para la evaluación y prevención de los riesgos derivados de la exposición a vibraciones mecánicas.

La modificación del real decreto de 13 de marzo de 2009 amplía la fecha de entrada en vigor de la normativa para equipos suministrados antes del 6 de julio de 2007, hasta el 6 de julio de 2010 para el caso general y hasta el 6 de julio de 2012 para el caso de vehículos agrarios.

Conclusiones y discusión

EL objetivo del Real Decreto es el mismo que la directiva 2002/44 y el método para valorar las exposiciones a las vibraciones de los trabajadores también, por lo que las conclusiones son análogas a las del apartado anterior en este aspecto.

La única diferencia radica en que no contempla la utilización del método VDV (más empleado en países anglosajones). Como se ha indicado anteriormente, este método valora mejor las vibraciones con un alto contenido en impactos. Este tipo de vibraciones que si pueden tener influencia en la salud quedan enmascaradas en los valores medios de energía absorbida por el conductor.

Desde el punto de vista de los asientos de maquinista, las vibraciones vendrán determinadas por las características dinámicas del vehículo, las características dinámicas del asiento instalado, del estado de la vía y del tipo de operación que se realiza con el tren. Teniendo en cuenta los puntos anteriores se podría realizar una evaluación del nivel de exposición mediante una estimación basada en las informaciones sobre las características dinámicas del vehículo y asiento proporcionados por el fabricante y el estudio de las de las prácticas de trabajo (tipo de conducción realizada, vías por las que se circula, turnos, etc.)

Parece necesario establecer algún procedimiento para determinar el nivel de vibraciones que produce un vehículo ferroviario.

Por último, es necesario remarcar que, aunque el método de valoración indicado se basa en la norma ISO 2631-1 (y ahora en la EN 14253) ninguna de estas normas establece una metodología para determinar la influencia de las vibraciones en el desarrollo de las actividades del conductor. Sería necesario incluir la forma de valorar esta influencia dada la responsabilidad del conductor.

3.1.2 Normas que valoran el comportamiento dinámico de los asientos.

Los asientos de maquinista pueden ser considerados como una forma de equipo de protección de personal según se define en la directiva. No es una de las partes más caras del vehículo, pero sí que puede tener una gran influencia desde el punto de vista de la protección del trabajador frente a la exposición a las vibraciones. Si están mal diseñados puede darse el caso de que asientos con suspensión amplifiquen la vibración en lugar de reducirla. Por ello, se deben desarrollar protocolos de prueba para asegurar un buen comportamiento y, por tanto, un buen comportamiento dinámico de los asientos.

3.1.2.1 EN 30326-1:1994/A1: 2007 Vibraciones mecánicas. Método de laboratorio para evaluar las vibraciones del asiento en el vehículo Parte 1: Requisitos básicos. Modificación 1.

Objetivo de la norma

La (EN 30326-1:1994/A1:2007), análoga a la ISO 10326-1, especifica los requerimientos básicos para las pruebas de laboratorio que caracterizan la transmisión de la vibración al ocupante a través del asiento del vehículo.

Descripción de la norma

Para caracterizar los asientos dinámicamente se somete al asiento a dos tipos de pruebas.

El primer tipo de prueba está diseñada para evaluar las características dinámicas de los asientos bajo las vibraciones típicas de los vehículos en los que se montan. El segundo tipo de prueba evalúa el comportamiento del asiento cuando está sometido a impactos severos y transitorios.

La vibración se mide en la base del asiento y en la superficie del asiento y si aplica en el respaldo. Antes de llevar a cabo las mediciones se debe exponer el asiento a una señal sinusoidal a la frecuencia de resonancia del asiento cargado con una masa rígida de 75 kg. Todas las pruebas se realizan con dos sujetos, uno del peso de percentil del 5 % y otro del de 95 %.

Las pruebas de simulación del vehículo (de transmisibilidad) exponen al asiento en el laboratorio a un movimiento representativo, aunque más severo que el que se da en la realidad. La característica de la señal se define según el valor R.M.S. de la magnitud de la vibración. En algún caso se pueden realizar pruebas con una señal sinusoidal de frecuencia creciente para determinar la transmisibilidad. Se requieren tres medidas. El asiento pasará la prueba si el valor SEAT es menor que un determinado límite especificado basándose en la ISO 10326-1.

La ISO 10326-1 define un test de amortiguamiento en el que se excitan a los asientos con suspensión a su frecuencia de resonancia. También se deben realizar tres medidas.

La revisión de la norma incluye los dummies dinámicos utilizados para las pruebas de los asientos y el método de prueba para evaluar la capacidad de los asientos de suspensión para controlar los efectos de los impactos causados al agotar la carrera (topes final de carrera)

Conclusiones y discusión

El objetivo de la norma es la definición de las características dinámicas del asiento. Dichas características deben especificarse a priori para elegir el asiento más idóneo para cada uso determinado y verificarse una vez construido mediante esta norma. Puede también servir a posteriori para determinar si el asiento es el más idóneo para la aplicación específica.

En cualquier caso, es necesario conocer las vibraciones del entorno en el que se va a montar el asiento para determinar sus características.

La norma no establece ningún tipo de límite sobre las transmisibilidades o el grado de amortiguamiento del asiento.

Tampoco establece al método para determinar el comportamiento no lineal del asiento.

3.1.2.2 ISO 10326 Parte 2 (2001). Método de laboratorio para evaluar las vibraciones del asiento en el vehículo Aplicación a vehículos ferroviarios

Objeto de la norma.

Esta norma, desarrollada por el Subcomité SC2 del ISO TC108, trata de establecer el método para realizar los ensayos que caracterizan el comportamiento dinámico de los asientos de pasajeros, tripulación y conductores de tren. El objetivo es caracterizar la manera en la que se transmite la vibración entre el asiento y el maquinista mediante funciones de respuesta en frecuencia (FRF). Aunque como indica la norma este método solo es válido solo cuando el sistema hombre asiento es lo suficientemente lineal (ISO 10326-1 2016).

Descripción

La norma especifica las vibraciones de entrada que se deben usar en la prueba. El rango de interés de las vibraciones de los asientos en ferrocarril está entre 0.5 y 20 Hz. Se deben probar los asientos con dos tipos de ocupantes de 55 kg +0/-5% y 90kg -0/+5% apoyando sus pies en la misma plataforma que en el vehículo. Los asientos, que deben ser lo más parecidos posible a los de serie, deben ser probados antes del ensayo para adaptarse al sujeto durante 2 horas, instalándose en la plataforma de la misma manera que en el vehículo y con la posición de utilización más común.

Se someterá el asiento a dos tipos de vibraciones:

- a) **Excitación Pseudoaleatoria:** para determinar la función de respuesta en frecuencia del asiento. Para ello se excita el asiento con 18 secuencias iguales de como mínimo 5 segundos (para obtener un ancho de banda de 0.2 Hz). La historia en tiempo de cada secuencia estará formada por la suma de componentes puros sinusoidales dependiendo de la resolución de la frecuencia. La amplitud de cada componente seguirá la densidad espectral de potencia descrita por la Ecuación 7.

$$G(f) = 0.05f^4(m/s^2)^2Hz^5 \quad \text{para } f < 1 \text{ Hz}$$

$$G(f) = 0.05(m/s^2)^2Hz^5 \quad \text{para } 1 \text{ Hz} < f < 20 \text{ Hz}$$

Ecuación 7

La fase de cada componente será una variable aleatoria entre 0 y 2π con una densidad de probabilidad uniforme. La tolerancia de desviación al medirlo en la base sería de un $\pm 20\%$. El valor eficaz de la aceleración de excitación será de aR.M.S. = $1.6 \pm 0.16 \text{ m/s}^2$.

- b) **Excitación armónica:** Una vez analizado el asiento en de un modo pseudoaleatorio se debe someter a una excitación puramente sinusoidal a las frecuencias que se determinan en el ensayo anterior como frecuencias máximas o donde se presenta resonancias. Para ello se utilizan aceleraciones de amplitud $0.5 \pm 0.1 \text{ m/s}^2$ y $1 \pm 0.1 \text{ m/s}^2$.

Se someterán a los sujetos a las vibraciones durante 90 s en cada una de las direcciones X Y Z por separado repitiéndose hasta que el módulo de la FRF no varía más del 5% en cada dirección. Los acelerómetros deben estar montados en un cojín semirrígido con la forma aproximada de una persona sentada. Este mecanismo es el clásico utilizado en el ferrocarril, pero no es igual a los cojines SAE. De este modo se obtienen los siguientes parámetros en cada tipo de ensayo.

- a) **Excitación Pseudoaleatoria:** para determinar la función de respuesta en frecuencia.

En las FRF de las señales de distintos ejes entre la base y el asiento la coherencia suele ser muy baja (cuando sea menor de 0.6 el valor de la FRF debe ser cero).

- b) **Excitación armónica:** Se debe calcular la diferencia porcentual entre los módulos de la FRF en los valores picos.

Si $(H(f_1) - H(f_2)) / \max(H(f_1) - H(f_2)) > 30\%$ significa que existe un marcado comportamiento no lineal entre ambas señales (véase Figura 3.1.14).

Figura 3.1.14. Aplicación de la norma ISO 10326 Parte 2 (ISO 10326-1 2016)

Conclusiones y discusión

De manera parecida a la anterior norma, la 10326-2 describe el procedimiento para caracterizar dinámicamente el asiento del maquinista, pero no los límites que se pueden establecer sobre los asientos para garantizar un buen aislamiento a las vibraciones.

Aunque las vibraciones varían de un vehículo a otro que circule por una vía o por otra, esta norma se circunscribe solo al ámbito ferroviario, por lo que parece a priori, más sencillo establecer unos límites sobre características como la transmisibilidad, el factor SEAT, el grado de amortiguamiento o el desplazamiento máximo limitado por los topes final de carrera para asientos con suspensión.

Los filtros de la señal son los mismos que para la ISO 2631-1 que como se ha visto difieren de los utilizados en el sector ferroviario.

Se evalúan las aceleraciones en todos los ejes, incluso las coherencias entre unos ejes y otros. Lo normal es que el grado de coherencia sea bajo, pero determinados movimientos de la caja del vehículo producen aceleraciones en otros sentidos (movimientos verticales producen aceleraciones en el eje longitudinal del respaldo).

Con todas las características que se deben calcular en estos ensayos queda determinado el comportamiento dinámico del asiento, especialmente en los puntos más críticos de funcionamiento que son las resonancias de la aceleración en el piso de la cabina. Si el comportamiento fuese puramente lineal se podría deducir las aceleraciones en la interfaz a partir de las aceleraciones en el piso.

El punto de medida es la interfaz entre el hombre y el asiento, pero podría ser interesante medidas en otros puntos como la base del cojín del asiento o el punto inmediatamente después de la suspensión para un mejor dimensionamiento de las suspensiones y el amortiguamiento que presenta el propio cojín del asiento.

Asimismo, sería interesante conocer las fuerzas de rozamiento presentes en el mecanismo y otras características que hacen que el asiento no tenga un comportamiento totalmente lineal.

3.1.2.3 Otras normas

ISO 7096

Fuera del ámbito ferroviario existen otras normas como la (ISO 7096: 2020)) en las que, si se establece un límite o criterio de aceptación para la transmisibilidad, la transmisibilidad en el punto de resonancia y el valor SEAT (el cociente entre el valor efectivo ponderado en el cojín y el valor efectivo ponderado en el amarre del asiento se denomina SEAT seat effective amplitude transmissibility) según el tipo de vehículo y la categoría a la que este pertenezca.

EWG78-764

En esta norma, además de establecer exigencias sobre las medidas, estabilidad y ajustabilidad del asiento, define valores límite para determinar la capacidad de aislamiento de los asientos. De este modo se dividen los vehículos en 3 clases en función del peso. Se debe simular el paso por una pista suave definida en la norma a una velocidad de 12 km/h con masas del conductor de 55 kg y 98 Kg. El valor efectivo ponderado R.M.S. medido sobre el cojín no debe sobrepasar los 1.25 m/s². De un modo alternativo permite realizar las medidas del asiento en un banco de pruebas.

Para la aceptación de un tipo de asiento, éste debe tener un cierto amortiguamiento. Para ello se realiza prueba de amortiguamiento Bajo una carga rígida de $m=40$ Kg y $m=80$ kg y una excitación armónica de frecuencia entre 0.5 Hz y 5 Hz y una amplitud $A=15$ mm la relación entre el valor efectivo de la aceleración en el amarre del asiento y la superficie del asiento no puede superar el valor de 2. Esto quiere decir que en la resonancia no puede ser mayor de 2 lo que corresponde a un factor de amortiguamiento de $D=0.3$.

Con la aparición de la ISO 2361 en 1997 se tuvieron que adaptar las pruebas de asientos para que cumpliesen con la norma ISO 5007. Para la misma clasificación de los vehículos en clases de peso se mantiene la forma de la excitación, aunque los filtros cambian. El criterio de aceptación es el valor efectivo en el cojín del asiento según se indica en la Tabla 3-10.

Tabla 3-10. Valores límite SEAT para el cumplimiento de la norma.

Clase	AG1	AG2	AG3
Masa vehículo	Bis 3600 kg	3600-6500 kg	> 6500 kg
RMS $a_{zw, Flansch}$	1,89 m/s ²	1,20 m/s ²	1,02 m/s ²
SEAT _{Grenz}	0,59	0,84	0,98

3.1.3 Normas que valoran el comportamiento dinámico de los vehículos ferroviarios.

Una vez analizada la normativa aplicable a la valoración del efecto de las vibraciones en la salud de los conductores, se examinan la normativa específica del sector ferroviario, con ciertas características especiales.

3.1.3.1 UNE-EN 14363:2007 Aplicaciones ferroviarias. Ensayos para la aceptación del comportamiento dinámico de los vehículos ferroviarios. Ensayos en línea y en parada.

Objeto de la norma.

La norma por excelencia para valorar el comportamiento dinámico de los trenes, al menos en Europa ha sido tradicionalmente la UIC 518. Toda la normativa UIC está siendo trasladada a normas EN, siendo la norma UNE-EN 14363 de 2017 la norma equivalente a la UIC 518.

Esta norma, elaborada por el grupo de trabajo 10 del comité técnico CEN/TC 256, detalla el conjunto de ensayos que se deben realizar para la aceptación del comportamiento dinámico de los vehículos ferroviarios nuevos o modificados, especialmente para unificar los criterios de un modo internacional. El objetivo fundamental es garantizar la seguridad, la comodidad de los vehículos ferroviarios y la interacción entre el vehículo y la vía.

Descripción de la norma.

El comportamiento dinámico del vehículo vendrá caracterizado por:

- Seguridad de circulación, medida según las fuerzas de interacción entre la rueda y el carril, fuerzas transversales entre el eje y la caja de graso y las aceleraciones).
- Solicitación de la vía (medida según las fuerzas de interacción entre la rueda y el carril).
- Características de marcha (medida según las aceleraciones).

Éste último punto sería el más relevante considerando las vibraciones que se producen en la cabina y que en definitiva llegan al conductor a través del asiento.

Para garantizar este comportamiento dinámico seguro y cómodo se definen una serie de ensayos a realizar (Véase Figura 3.1.15).

Figura 3.1.15. Estructura de ensayos según UNE-EN 14363:2007

Los ensayos de comportamiento dinámico se componen de ensayos preliminares de aprobación (principalmente, ensayos en parada) y ensayos de comportamiento dinámico (ensayos en línea). En este último caso pueden existir ensayos completos teniendo en cuenta las condiciones de circulación y todos los estados del vehículo o ensayos parciales para una ampliación de la aceptación que permite una aplicación reducida del ensayo según Figura 3.1.16.

Figura 3.1.16. Características de los ensayos en línea.

Los criterios para la extensión de ensayos suelen estar basados en un parámetro $\lambda > 1.1$ que indica que los valores evaluados en el ensayo original deben estar un 10% por debajo de los valores límites establecidos por la norma.

Mediante el método de medición normal se deben medir todas las aceleraciones y las fuerzas de interacción rueda carril, mientras que con el método simplificado basta con medir una serie de aceleraciones definidas en la norma (véase Figura 3.1.17). La diferencia es que no es necesario instalar ejes dinamométricos, además de la simplificación que supone adquirir un menor número de señales.

Figura 3.1.17. Métodos de medición en la norma UNE-EN 14363:2007.

Según se indica en la norma, los parámetros relevantes para el comportamiento dinámico de los vehículos serían la máxima velocidad permitida prevista para el vehículo, la insuficiencia de peralte permitida y prevista, menor radio de curva que debe negociarse, la disposición de los ejes, la distancia entre los centros de los bogies, la altura del centro de gravedad, el peso del vehículo, la distribución de la fuerza de tracción y de la fuerza horizontal, la masa no suspendida, los momentos de inercia de la caja del vehículo (con respecto del eje z), rigidez torsional de la caja del vehículo, la rigidez torsional del bastidor del bogie, el esfuerzo de tracción, las dimensiones de las ruedas y de los ejes, los perfiles de rueda, las características de la suspensión vertical primaria, las características de la suspensión vertical secundaria, las características del eje director, las características de la suspensión transversal secundaria, el par de rotación del bogie y el momento de inercia del bogie (con respecto del eje vertical z). La inestabilidad del vehículo se evalúa sobre la base de un valor

cuadrático medio en movimiento de la suma de las fuerzas de guiado ΣY , suma de las fuerzas transversales de la caja de grasa H, las aceleraciones transversales en el bogie o las aceleraciones transversales en los ejes.

Desde el punto de vista de la seguridad las aceleraciones en la caja del vehículo vienen limitadas por los valores indicados en la Tabla 3-12. La Tabla 3-11 muestra los valores para la obtención de una buena calidad de marcha. Si se obtienen valores superiores, se debe estudiar la influencia en los viajeros o en la seguridad de la carga y la resistencia del vehículo y de sus componentes. Se deben tener en cuenta el número y la duración de los incidentes, así como la naturaleza del servicio como indica la Tabla 3-13. Según indica la norma, se deben medir las fuerzas de guiado y verticales en los ejes y en las cajas de grasa y las aceleraciones en las cajas de grasa. Para las aceleraciones en caja, indica que se debe medir encima de cada bogie y en la cabina de conducción (en la mayor parte de los casos coincide). Sin embargo, solo requiere medir las aceleraciones de caja laterales y verticales. Las condiciones de ensayo se describen en la Figura 3.1.18.

El vehículo ensayado debe ser representativo de la serie en lo que se refiere a los parámetros que influyen en el comportamiento dinámico y el estado de construcción y mantenimiento. Se debe ensayar con perfil de rueda nuevo y desgastado y el estado de carga del vehículo se debe ensayar en vacío y a plena carga, estudiando cuál es la más desfavorable. También se deben estudiar los modos de fallo del vehículo (suspensiones neumáticas desinfladas, amortiguadores desactivados).

Tabla 3-11. Valores límite EN 14363.

Característica	Valor de evaluación	Valor límite
Valores de evaluación y límite para seguridad de circulación	El valor ΣY se utiliza para evaluar si se cumplen las medidas de seguridad contra el ripado de la vía	$\Sigma Y_{max,lim} = k_1 \left(10 + \frac{2Q_0}{3} \right) \text{ en KN}$
	El cociente Y/Q de la rueda conductora es el criterio de resistencia al descarrilamiento resultante del remonte de la pestaña de la rueda en el carril	$(Y/Q)_{max} \cdot Lim=0.8$
	Las aceleraciones en el bogie $\ddot{y}^+$ y aceleraciones en la caja del vehículo $\ddot{y}^*$ permiten la evaluación de la seguridad de circulación de manera más simplificada	$\ddot{y}_{max,lim}^+ = 12 - \frac{m^+}{5}$
Criterio de inestabilidad:	aceleraciones en la caja del vehículo	Siendo m la masa en toneladas Véase la tabla 2
	Suma de las fuerzas de guiado	$\Sigma YR.M.S.,lim = \Sigma Y_{max,lim} / 2$
	Fuerza de guiado cuasi-estáticas	$Y_{qst,lim} = 60 \text{ kN}$
Valores de evaluación de carga de la vía	Carga de rueda cuasi-estática	$Q_{qst,lim} = 145 \text{ kN}$
	Carga de rueda máxima	$Q_{max,lim} = 90 + Q_0 \text{ en kN}$ siendo Q_0 constante en función de la velocidad.
Valores de evaluación y límite de la calidad de marcha	Acercaciones cuasi-estáticas en la caja del vehículo $\ddot{y}^*_{qst}$	Véase tabla 5
	Acercaciones máximas en la caja del vehículo max $\ddot{y}^*$.	
	Valor cuadrático medio de las aceleraciones de la caja del vehículo R.M.S.	

Tabla 3-12. Valores límite de las aceleraciones desde el punto de vista de la seguridad.

Vehículo, condiciones de ensayo		Valores límite para aceleraciones en la caja de vehículo en m/s ²	
		$\ddot{y}^*_{Sm\acute{a}x,lim}$	$\ddot{z}^*_{Sm\acute{a}x,lim}$
Locomotoras, automotores, trenes automotrices y coches de viajeros	Nivel de suspensión simple o condición de suspensión neumática desinflada		5
	Nivel de suspensión doble		3
	Zonas de ensayo 1 y 2	3	
	Vía recta, curvas de radio amplio		
	Zona de ensayo 3	2,8	
	Curvas de radio pequeño		
	Zona 4	2,6	
Curvas de radio muy pequeño			
Vagones de mercancías cargados y vehículos especiales			5
Vagones de mercancías vacíos			5 ^b

Tabla 3-13. Valores límite para la calidad de marcha.

Evaluación, vehículo, condiciones de ensayo	Valores límite para aceleraciones en la caja del vehículo m/s ²				
Calidad de la marcha	$(\ddot{y}^*_{qst})_{lim}$	$\ddot{y}^*_{lim}$	$\ddot{z}^*_{lim}$	$(s\ddot{y}^*)_{lim}$	$(s\ddot{z}^*)_{lim}$
locomotoras, automotores	1,5	2,5	2,5	0,5	1,0
Trenes automotores, coches de viajeros	1,5	2,5	2,5	0,5	0,75
Vagones de mercancías, vehículos especiales con bogies	1,3	3,0	5,0	1,3	2,0
Vagones de mercancías, vehículos especiales	1,3	4,0	5,0	1,5	2,0

Figura 3.1.18. Condiciones de ensayo según UNE-EN 14363:2007.

Las vías se eligen según

- Trazado de las vías: se debe circular por los siguientes trazados
- Inclinación de los carriles: que suele ser de 1:20 o 1:40.
- Perfil del carril
- Estado del carril: lo normal es que se realicen las pruebas con carril seco.
- Geometrías de la vía: según las desviaciones medidas o la calidad de la vía definida como sigue

- los defectos en alineación lateral y nivelación y longitudinal: se definen por sus valores máximos y desviaciones típicas
- los niveles de calidad fundamentados en los criterios de mantenimiento divididos según la Tabla 3-14 en
 - QN1 tramo enmarcado en el programa normal de operaciones.
 - QN2 aplicación de medidas de mantenimiento a corto plazo.
 - QN3 tramos que no presentan la calidad de vía habitual.

Para los valores máximos de QN3 se define como:

$$QN3 = 1.3 \times QN2$$

La calidad de la geometría de la vía se evalúa sobre la base de los valores indicativos de las desviaciones típicas para los niveles de calidad QN1 y QN2, separadamente según la alineación y la nivelación longitudinal. Las desviaciones típicas deberían mostrar los siguientes porcentajes en cada zona de ensayo:

- a) 50%: calidad de la geometría de vía $\leq$ QN1
- b) 40%: calidad de la geometría de vía $>$ QN1 ... $\leq$ QN2
- c) 10%: calidad de la geometría de vía $>$ QN2

Para ello se deben evaluar estadísticamente los valores, agrupando en clases las desviaciones típicas.

Tabla 3-14. Calidad de vía según UNE-EN 14363:2007.

Velocidad máxima admisible en km/h	Alineación		Nivelación longitudinal	
	Valores del nivel de calidad en mm			
	QN 1	QN 2	QN 1	QN 2
Valor máximo absoluto $\Delta Y^0_{\max}$ Y $\Delta Z^0_{\max}$				
$0 < V \leq 80$ km/h	12	14	12	16
$80 \text{ km/h} < V \leq 120$ km/h	8	10	8	12
$120 \text{ km/h} < V \leq 160$ km/h	6	8	6	10
$160 \text{ km/h} < V \leq 200$ km/h	5	7	5	9
$200 \text{ km/h} < V \leq 300$ km/h	4	6	4	8
Desviaciones tipo $\Delta Y_{\sigma^0_{\max}}$ Y $\Delta Z_{\sigma^0_{\max}}$				
$< V \leq 80$ km/h	1,5	1,8	2,3	2,6
$80 \text{ km/h} < V \leq 120$ km/h	1,2	1,8	2,3	2,6
$120 \text{ km/h} < V \leq 160$ km/h	1,0	1,3	1,4	1,7
$160 \text{ km/h} < V \leq 200$ km/h	0,8	1,1	1,2	1,5
$200 \text{ km/h} < V \leq 300$ km/h	0,7	1,0	1,0	1,3

Las zonas de ensayo deben cumplir las siguientes características (véase Figura 3.1.19). Se dividen en tramos de una longitud L_{tx} con un trazado determinado que se recorren con una velocidad e insuficiencia de peralte fijos. Las condiciones de ensayo deben permanecer prácticamente constantes a lo largo de cada uno de estos tramos de ensayo.

La velocidad significativa es la velocidad máxima admisible para el vehículo. Los ensayos se realizarán a una velocidad un 10% superior a dicha velocidad máxima. Análogamente, la insuficiencia de peralte también debe ser un 10% superior a la nominal.

Evaluación del ensayo

Los datos deben quedar registrados en soporte informático.

Los datos deben venir filtrados por un filtro paso bajo con límites de 40 Hz en general, 10 Hz para parámetros verticales y 20 Hz para parámetros transversales. Posteriormente se debe determinar la media desplazada y establecer los valores seleccionados características de la distribución de frecuencia.

Para evitar las desviaciones sistemáticas se utilizan métodos estadísticos para promediar la obtención de variables aleatorias. En concreto, se utilizan medios de muestreos, método de la media desplazada y método de valores cuadráticos desplazados. En la Figura 3.1.20 se puede observar un ejemplo del método de cálculo.

Figura 3.1.19. Características de las zonas de ensayo según UNE-EN 14363:2007.

Figura 3.1.20. Métodos de muestreo (UNE-EN 14363:2007).

De este modo el factor de seguridad viene determinado por:

$$\lambda = \frac{y_{lim}}{Y(PA)_{max}} \quad \text{Ecuación 8}$$

Para todos los valores de evaluación deben mostrarse los resultados de la evaluación estadística: los valores máximos esperados y previstos $Y(PA)_{máx}$ de todas las variables según una evaluación unidimensional o bidimensional para las distribuciones de muestras aleatorias evaluadas. Se debe establecer una comparación entre el valor máximo esperado $Y(PA)_{máx}$ y el valor límite y_{lim} .

Si los valores de los parámetros influyentes más importantes (variables independientes) x_i tienen una desviación pequeña, la distribución global de un parámetro puede considerarse inicialmente como una variable de distribución unidimensional, lo que permite la realización de evaluaciones estadísticas simplificadas basadas en poblaciones con distribución normal y distribución unidimensional de muestras aleatorias.

Se utiliza el nivel de confianza $PA = 95,0\%$ para calcular valores estadísticos característicos medios y $PA = 99,0\%$ para calcular los valores máximos estimados para los parámetros relativos a la seguridad.

Es decir, el valor máximo estimado se calcula a partir del valor medio y de la desviación típica:

$$Y(PA)_{max} = y + k s_y \quad \text{Ecuación 9}$$

Con $k=3$ para valores de evaluación de la seguridad y $k=2.2$ para valores de evaluación de la solicitud de vía y calidad de marcha.

Si una distribución de muestras aleatorias indica una mayor dispersión, la causa probable es la influencia significativa de determinados parámetros, a pesar de las restricciones impuestas en las condiciones de ensayo. Esto se espera en las zonas de ensayo 2 y 4, donde los ensayos se efectúan en curvas con algún rango de insuficiencia de peralte. En este caso y en condiciones bien definidas, se debe incluir la insuficiencia de peralte I como parámetro influyente x_i en la evaluación estadística.

El análisis de regresión aplicable en las zonas de ensayo 2 y 4 presupone la existencia de una relación lineal entre el parámetro de influencia x_i (en este caso, insuficiencia de peralte I) y la variable dependiente y (valor de evaluación).

Conclusiones y discusión

Esta norma es la norma básica para la aceptación de todos los vehículos ferroviarios desde el punto de vista dinámico. Cuando un operador decide comprar un vehículo exige siempre la certificación del mismo frente a esta norma (o la UIC 518).

Una vez se ha demostrado que un vehículo cumple los límites establecidos en esta norma se puede autorizar desde el punto de vista dinámico para circular por todas las vías de Europa. Las exigencias de esta norma son mayores que las que se pueden aplicar a normas que influyen en la salud ya que tiene implicaciones sobre la seguridad de los vehículos.

Se podría decir que todos los vehículos deben ser certificados contra esta norma y por ello el mayor esfuerzo de los fabricantes irá destinado a su cumplimiento. En los ensayos de certificación se realizan numerosas medidas de aceleraciones que, adecuadamente tratadas, podrían aprovecharse para definir el nivel de vibraciones que emite el vehículo desde el punto de vista de la salud de la tripulación.

Se deben realizar ensayos y medidas por casi todos los trazados de vía posibles (con distintos los radios de curvatura y la calidad de la vía) que consiguen caracterizar el vehículo en la mayor parte de las situaciones que se pueden dar en la explotación.

Dentro de los distintos criterios que establece para la valoración dinámica de los vehículos ferroviarios, la calidad de marcha es la que influye directamente sobre las vibraciones a las que se exponen pasajeros y tripulación.

Para valorar la calidad de marcha se calculan los valores R.M.S. sobre las aceleraciones filtradas a 10 Hz y 20 Hz según sean aceleraciones verticales u horizontales. Si comparamos estos filtros con los establecidos en la ISO 2631-1 o la ISO 2631-4 son menos restrictivos que los W_c o W_b por lo que en estas valoraciones considera un nivel de energía más alto que en las normas específicas de la salud.

Los límites establecidos para la calidad de marcha (0.5 m/s^2 para aceleraciones verticales y 1 m/s^2 o 0.75 m/s^2) son iguales o superiores a los establecidos por las normas referentes a la salud si consideramos los límites que conducen a una acción. Si consideramos el límite a la exposición siempre se encuentran por debajo.

Si consideramos que para autorizar un vehículo deben cumplir estos límites, esto explica que en general los vehículos ferroviarios tengan un nivel vibratorio relativamente bajo comparado con otros equipos utilizados en el ámbito laboral.

Dadas las especiales características de los vehículos ferroviarios, la norma EN 14363 evalúa las aceleraciones solo en el eje vertical y transversal. Las aceleraciones en el eje longitudinal suelen ser bajas en la mayor parte de los vehículos ferroviarios. Únicamente en metros, tranvías o trenes de cercanías los niveles de aceleraciones longitudinales son un poco más altos que en trenes de larga distancia, regionales o de alta velocidad. Estos vehículos frenan y aceleran numerosas veces a lo largo de un recorrido tipo y si el sistema de tracción está bien regulado y el trazado no tiene muchos desniveles dichas aceleraciones son de muy baja frecuencia.

Como se ha indicado anteriormente se utiliza el valor R.M.S., por lo que consideran las aceleraciones medias. No se tiene en cuenta las aceleraciones con múltiples impactos.

Otro factor diferente frente a las normas sobre la salud es que las mediciones se realizan a una velocidad un 10% superior a la velocidad de servicio prevista para cada una de las zonas de ensayos. En general, un aumento de la velocidad genera un aumento de las vibraciones que se producen en el vehículo, excepto en el caso de que para una determinada velocidad se estén excitando modos de vibración de alguno de los componentes del vehículo (bogie, caja, etc.).

Para tener en cuenta la variabilidad de la señal se exige un tratamiento estadístico de las medidas realizadas de tal manera que si se considera que las aceleraciones siguen una distribución normal u otra que se

defina, la evaluación se realiza teniendo en cuenta una probabilidad del 95%. Este tratamiento no es requerido en las normas sobre la salud laboral, pero sí sobre las normas que valoran el confort ferroviario como se verá más adelante. Si se realizan medidas con un mismo vehículo por una misma vía y a la misma velocidad se pueden obtener resultados diferentes, por lo que parece necesario realizar este tratamiento estadístico.

Esta norma establece los puntos de la caja en los que se debe realizar la medición. Entre otros, se debe medir en la cabina de conducción, que en muchos casos tiene el punto de medida coincidente con el punto de medida sobre el bogie delantero. Las mediciones se realizan sobre el piso. Desde el punto de vista de la salud de los conductores no tiene en cuenta el efecto aislante o multiplicador que puede tener el asiento dependiendo de las características dinámicas de éste y de la aceleración que se dé a nivel de piso.

3.1.3.2 EN 15827-3. Aplicaciones ferroviarias. Bogies y órganos de rodadura. Parte 3: Requisitos dinámicos.

Objeto de la norma

Esta norma pretende ser un documento recopilatorio de todos los requerimientos sobre los bogies de los estándares europeos para conseguir un diseño funcional y seguro de éstos. Sin embargo, las consideraciones en muchos casos están íntimamente unidas al vehículo y la aplicación específica de los mismos, y no se pueden considerar los bogies independientemente. Esta parte 3 se focaliza en el comportamiento dinámico de los bogies.

Descripción de la norma

Según esta especificación los aspectos relevantes para definir el bogie son:

- Las conexiones físicas del bogie (muelles de suspensión, amortiguadores, barra de tracción o pivote, actuadores, equipamiento de tracción).
- Masas e inercias incluyendo las de la caja del vehículo según las definidas en la EN15663.
- Otras características de la caja que influyan en la dinámica (rigidez torsional de la caja, rigidez vertical a flexión, frecuencias estructurales y modos de vibración, rigideces características de los soportes).
- Gálibo, según está definido en la norma EN 15273.
- Condiciones de operación (máxima velocidad, máximo peralte e insuficiencia de peralte, mínimo radio de curva) y características de la vía (ancho de vía, perfil de carril, inclinación del carril, alabeo de la vía, calidad de la vía).
- Perfil de rueda.

Según esta norma los criterios obligatorios para la aceptación de los bogies son:

- Seguridad contra el descarrilo: según lo indicado en la norma EN 14363.
- Seguridad de marcha y carga sobre la vía según lo indicado en la norma EN 14363 y la EN15687.
- Dosis de vibración: Las aceleraciones experimentadas por la tripulación de los trenes estarán limitadas a lo estipulado en la directiva 2002/44 EU, aunque los estados miembros podrán establecer límites más exigentes como el caso de la norma francesa NF E 90 401-2 y la EN12299 (aunque como se verá que esta norma se limita solo al confort y no establece ningún límite.) Esta norma indica que en los casos en los que se dan altos niveles de vibración ésta suele provenir de equipamientos situados en la caja y no afecta excesivamente la amortiguación de los bogies.

Los criterios no mandatorios son los siguientes:

- Características de marcha: según lo indicado en la EN 14363.

- Confort de marcha: según lo indicado en la EN12299.

Por último, esta propuesta establece los criterios para la validación de los bogies, el plan de calidad y de mantenimiento de los mismos y sobre cuándo se pueden aplicar simulaciones por ordenador para sustituir las pruebas en vía.

Conclusiones y discusión.

En esta norma se establecen los requerimientos sobre los bogies en lo que a su comportamiento dinámico se refiere. En muchos de sus puntos hace referencia a otras normas. Sin embargo, en la mayor parte de ellas no existe límite alguno, y como se indica al principio depende en gran medida de las características de la caja y de la aplicación concreta.

Es importante destacar que según esta norma para demostrar ciertas características dinámicas de los bogies desde el punto de vista dinámico se permite utilizar únicamente las simulaciones por ordenador. Podrían utilizarse estos métodos para caracterizar el nivel de vibraciones que emite un vehículo ferroviario como exige la directiva sobre los agentes físicos.

3.1.3.3 UNE-EN 12299:2010 Aplicaciones ferroviarias. Comodidad de viaje para los pasajeros. Medición y evaluación.

Objeto de la norma

Esa norma tiene como objeto especificar un método para la cuantificación de los efectos de los movimientos de la caja del vehículo sobre la comodidad de marcha de los viajeros.

Tiene en cuenta, de modo obligatorio, los efectos que ejerce la exposición a las vibraciones, medida en el piso de la caja del coche, sobre la comodidad para los viajeros (método simplificado) y, como recomendación, la exposición a la vibración medida en las interfaces (método completo) en eventos discretos y los movimientos sobre curvas de transición.

El efecto que producen los movimientos de la caja es la falta de confort y normalmente está asociada a niveles relativamente bajos de aceleración. No contempla efectos asociados a niveles de aceleración más elevados como el efecto sobre el riesgo para la salud: daño físico, deterioro psicológico y sobre las actividades. Por ello, las locomotoras quedan excluidas en la evaluación de esta norma, aunque podría utilizarse como guía para su evaluación.

Las características típicas de las vibraciones en los vehículos ferroviarios vienen determinadas porque se encuentran en un rango de frecuencias de 0 Hz a 2 Hz para la comodidad en curvas de transición y en eventos discretos, y de 0,4 Hz a 80 Hz para la evaluación de la comodidad media. Dentro de este último rango se concentran principalmente en los rangos de 0,4 Hz a 3,0 Hz en la dirección lateral y 0,4 Hz a 20 Hz en la dirección vertical. Los niveles de vibración presentan relativamente una baja amplitud. En el ferrocarril existen aceleraciones de todo tipo: estacionaria, no estacionaria, cuasi-estática, dinámica con componentes, extremadamente no lineales (en curvas, en eventos discretos) y lineal (comodidad media).

La sensación de incomodidad media está basada en el análisis de la vibración a lo largo de un periodo prolongado de tiempo mientras que la sensación instantánea de incomodidad está basada en una modificación repentina de la sensación media, que es debida a un evento de corta duración.

La Tabla 3-15 presenta una visión global de las diferentes características para los procedimientos de medida y evaluación.

Tabla 3-15. Procedimientos de medida y evaluación según (UNE-EN 12299 2010).

Características	Comodidad media simplificada	Comodidad media completa	Comodidad en curvas de transición	Comodidad en eventos discretos
Índice de comodidad	N_{MV}	N_{VD} N_{VA}	P_{CT}	P_{DE}
Procedimiento	Normativo	Informativo	Informativo	Informativo
Parámetro de medida	Aceleraciones	Aceleraciones	Aceleración lateral, velocidad de balanceo	Aceleración lateral
Punto de medida	Suelo	Suelo	Suelo	Suelo

Descripción de la norma

La norma deriva de las distintas normas relacionadas, pero principalmente de la UIC 513 - Guía para evaluar la comodidad del viajero en relación con la vibración en los vehículos ferroviarios: 1ª edición, 01-07-94.

A diferencia de otras normas como la ISO 2631, los ejes de coordenadas se definen como se acostumbra en el mundo del ferrocarril (el eje z es positivo hacia abajo) (véase la Figura 3.1.21).

Figura 3.1.21. Ejes definidos en la norma EN 12299.

Método simplificado

La aplicación de este método proporcionará un índice de comodidad para el sistema vehículo-vía ya que ambos están íntimamente ligados desde el punto de vista de la comodidad. La influencia por separado del vehículo y la vía no puede valorarse sin información más detallada sobre las características del vehículo, el trazado y las características de rugosidad de la vía (UNE-EN 12299 2010).

La evaluación de la comodidad media definida en esta norma se basa en la relación entre las aceleraciones medidas en un vehículo y la valoración de la comodidad media proporcionada por un grupo representativo de viajeros durante un periodo de 5 minutos.

Según se indica se debe medir las aceleraciones en varios puntos de la caja del vehículo (sobre bogies, y en la zona central) y se tratarán como sigue a continuación:

1. Ponderación de la señal en frecuencia,
2. Cálculo de los valores eficaces en intervalos de tiempo de 5 s,

3. Cálculo de la curva de frecuencias acumuladas durante un intervalo de tiempo total de cinco minutos,
4. Cálculo del muestreo de probabilidad del 95%,
5. Cálculo del índice de comodidad media NMV en cada punto de medición.

Para este índice se utilizan las aceleraciones a nivel de suelo.

El procedimiento se muestra en la Figura 3.1.22 Figura 3.1.22 Figura 3.1.22. Procedimiento de medida según EN 12299.

$$NMV = 6 \sqrt{a_{XP95}^{Wad^2} + a_{YP95}^{Wad^2} + a_{ZP95}^{Wab^2}} \quad \text{Ecuación 10}$$

Los filtros utilizados por esta norma difieren un poco de los utilizados por las normas ISO, especialmente en el definido para la aceleración vertical (frente a la Norma ISO 2631-4 elaborada específicamente para el sector ferroviario, se diferencia en los coeficientes Q4, Q5, y Q6).

La ponderación a utilizar viene definida por los filtros $W_a \times W_b$ y $W_a \times W_d$ para el suelo, $W_a \times W_b$ y $W_a \times W_d$ para el asiento de la butaca y $W_a \times W_c$ para el respaldo del asiento.

En la Tabla 3-16 se observa la comparativa de los filtros con otras normativas.

Tabla 3-16. Comparativa de los filtros según diferentes normativas.

EN 12299

	Rango de ponderación de la frecuencia			Parámetros de la curva de ponderación							
	f_1 [Hz]	f_2 [Hz]	Q_1	f_3 [Hz]	f_4 [Hz]	f_5 [Hz]	f_6 [Hz]	Q_2	Q_3	Q_4	K
W_a	0,4	100	0,71	—	—	—	—	—	—	—	—
W_b	—	—	—	16	16	2,5	4	0,63	0,8	0,8	0,4
W_c	—	—	—	8	8	—	—	0,63	—	—	1,0
W_d	—	—	—	2	2	—	—	0,63	—	—	1,0

ISO 2631-1

Weighting	Band-limiting		Acceleration-velocity transition (a-v transition)			Upward step			
	f_1 Hz	f_2 Hz	f_3 Hz	f_4 Hz	Q_4	f_5 Hz	Q_5	f_6 Hz	Q_6
W_k	0,4	100	12,5	12,5	0,63	2,37	0,91	3,35	0,91
W_d	0,4	100	2,0	2,0	0,63	—	—	—	—
W_l	0,08	0,63	—	0,25	0,86	0,062 5	0,80	0,1	0,80

ISO 2631-4

(Wb)

Band-limiting			Frequency weighting							
f_1 Hz	f_2 Hz	Q_1	f_3 Hz	f_4 Hz	f_5 Hz	f_6 Hz	Q_4	Q_5	Q_6	K
0,4	100	0,71	16	16	2,5	4	0,55	0,90	0,95	0,4

Se realiza un análisis estadístico de la señal con el fin de tener en cuenta el aspecto fluctuante de las vibraciones. La comodidad de vibración tal como la percibe el viajero depende de los valores extremos de los valores eficaces ponderados.

El valor eficaz de las vibraciones se determina sobre un periodo de 5 s en cada dirección y en cada interfaz. Este intervalo de 5 segundos es la mejor solución de compromiso si van a tenerse en cuenta las frecuencias más bajas.

Se construye el histograma de los valores eficaces ponderados calculados cada 5 segundos para determinar el percentil 95° y eliminar así los valores extremos según se muestra en Figura 3.1.23.

Figura 3.1.23. Histograma valores eficaces ponderados.

Las condiciones de ensayo pueden variar en función de la aplicación. La velocidad será la normal de servicio, no siendo obligatorio a velocidades diferentes, las secciones de ensayo deben ser tales que se tengan en cuenta las condiciones de funcionamiento del vehículo (línea AV, normal, con curvas etc.) y la geometría y calidad de vía se debe corresponder con la velocidad del ensayo. Así mismo se debe determinar la geometría de contacto rueda carril y el estado del vehículo.

- Guía para la interpretación de resultados.

Comodidad media. Definida según Tabla 3-17.

Tabla 3-17. índice de comodidad.

$N < 1$	Muy cómodo
$1 \leq N < 2$	Cómodo
$2 \leq N < 4$	Medio
$4 \leq N < 5$	Incómodo
$N \geq 5$	Muy incómodo

Para la comodidad en las curvas de transición y eventos discretos la experiencia existente no permite disponer de una escala de comodidad.

Método completo

En este método se tiene en cuenta las vibraciones del suelo, del asiento y del respaldo, teniendo en cuenta el comportamiento dinámico del vehículo, del asiento y de la localización de los puntos de medida. No tiene en cuenta las velocidades de balanceo (la aceleración lateral no compensada está limitada a 1 m/s^2) ni las sacudidas, lo que excluye las circulaciones por curvas cerradas y los vehículos pendulares.

En este caso también la aplicación de este método proporcionará un índice de comodidad para el sistema vehículo-vía. La influencia separada del vehículo y de la vía no puede valorarse sin información más detallada sobre las características del vehículo y el trazado y características de la calidad de la vía. Deben tenerse en cuenta como puntos de medida un punto en el centro del vehículo y un punto en cada extremo.

Las mediciones se llevan a cabo utilizando a dos sujetos con masas de 52 kg y de 90 kg o utilizando a dos sujetos de 70 kg representativos del 50% de la población.

La duración de las mediciones depende del propósito del ensayo. Su valor deberá ser múltiplo de 5 minutos: ésta es la unidad básica que permite la aplicación de este método. El mínimo requerido es cuatro unidades de 5 minutos, representando las condiciones de funcionamiento, viajando a velocidad constante.

La evaluación se realiza en las interfaces con el sujeto;

- de pie, sobre la base de las mediciones de la aceleración llevadas a cabo en el suelo;
- sentado, sobre la base de las mediciones de la aceleración tomadas en el suelo, al nivel del asiento y el respaldo de la butaca.

Con el fin de tener en cuenta el aspecto fluctuante de las vibraciones, la comodidad de vibración, tal como la percibe el viajero, depende de los valores extremos de los valores eficaces ponderados para el viajero sentado y de la mediana de los valores eficaces ponderados para el viajero de pie.

Tratando estadísticamente las aceleraciones medidas de un modo parecido al método simplificado, se llegan a las siguientes fórmulas para valorar los índices.

➤ Índice de comodidad sentado

$$N_{VA} = 4 \cdot \left(a_{ZP95}^{W_{ab}} \right) + 2 \cdot \sqrt{\left(a_{YA95}^{W_{ad}} \right)^2 + \left(a_{ZA95}^{W_{ab}} \right)^2} + 4 \cdot \left(a_{XD95}^{W_{ac}} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde las a_{xd} son aceleraciones al nivel del respaldo del asiento, a_{zr} al nivel del suelo, y a_{ya} , a_{za} al nivel del asiento:

➤ Índice de comodidad de pie.

$$N_{VD} = 3 \cdot \sqrt{16 \cdot \left(a_{XP50}^{W_{ad}} \right)^2 + 4 \cdot \left(a_{YP50}^{W_{ad}} \right)^2 + \left(a_{ZP50}^{W_{ab}} \right)^2} + 5 \cdot \left(a_{YP95}^{W_{ad}} \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

Comodidad en las curvas de transición

Se utiliza en situaciones en las que el número o tipo de transiciones en curvas y contracurvas es suficiente para contribuir significativamente a la percepción global de comodidad del viajero. Proporciona una medida de la comodidad para una transición en curva aislada y puede aplicarse a vehículos convencionales y basculantes a cualquier velocidad y a una aceleración transversal no compensada media o alta.

En este caso el paso por curvas es percibido como una súbita modificación de la sensación promedio de comodidad de viaje, debida a un comportamiento a baja frecuencia en transiciones de entradas en curva y contracurva. Este tipo de sensación se percibe de modo distinto por gente diferente.

Mediante métodos de filtrado y análisis de ventana deslizante se calcula:

- variación de la aceleración transversal de la caja del coche desde el principio hasta el final de esta fase;
- valores máximos (que no necesariamente ocurren simultáneamente) para la velocidad de balanceo y sacudida;

Y de este modo se calcula el índice de comodidad PCT.

$$P_{CT} = (Ay + By - C) + D\theta^E \quad \text{Ecuación 13}$$

Siendo

• y el valor máximo de la aceleración transversal en la caja del coche, en el intervalo de tiempo entre el principio de la transición y el final + 1,6 s, expresado en m/s^2 ;

• θ el valor máximo de la sacudida en la transición, en el intervalo de tiempo entre 1 s antes del comienzo de la transición en curva y el final de la transición, expresado en m/s^3 ;

• θ la máxima velocidad absoluta de balanceo de la caja, en el intervalo de tiempo entre el principio y el final de la transición, referido al centro de la caja del vehículo, expresado en grados por segundo. Los coeficientes se definen en la Tabla 3-18.

Tabla 3-18. Coeficientes del método completo.

Condición	A	B	C	D	E
En reposo, de pie	28,54	20,69	11,1	0,185	2,283
En reposo, sentado	8,97	9,68	5,9	0,120	1,626

Comodidad en eventos discretos.

Las magnitudes relevantes en este caso son: valor $\ddot{y}_p$ pico a pico de la aceleración transversal filtrada y el valor medio del mismo $\ddot{y}_m$, evaluados ambos en una ventana de 2 s, desplazando (1/10) s, de acuerdo con la fórmula

$$P_{DE} = a \cdot \ddot{y}_p + b \cdot \ddot{y}_m - c \quad \text{Ecuación 14}$$

Con los coeficientes según la Tabla 3-19.

Tabla 3-19. Coeficientes para eventos discretos.

Condición	a	b	c
En reposo-de pie	16,62	27,01	37,0
En reposo-sentado	8,46	13,05	21,7

Deben realizarse las mediciones de la aceleración transversal $\ddot{y}^*$ en el centro del suelo de la caja del vehículo y sobre el bogie delantero $\ddot{y}_I^*$ y eventualmente de cola $\ddot{y}_{II}^*$, la aceleración transversal no compensada (a_{nc}) sobre el k^a caja de grasa $\ddot{y}_k$ y la velocidad v . Se realiza un filtrado con un filtro paso bajo de 2 Hz y se calculan los datos sobre una ventana móvil de 2 s que se mueve a 1/10 s.

Esta norma también incluye una guía para la aplicación de los ensayos directos sobre la reacción al viajero. Las principales dificultades asociadas al ensayo directo consiste en que,, por un lado, diferentes individuos tienen diferentes expectativas respecto a lo que debería ser un viaje satisfactorio y, por otro, los individuos están inevitablemente afectados por otros aspectos de su entorno (temperatura, humedad, paisaje exterior, decoración interna, etc.) tanto como por la marcha del vehículo y que incluso el mismo individuo puede no ser consistente de las diferencias de un día a otro y de un vehículo a otro.

Los ensayos directos pueden utilizarse, con precaución, para comparar dos vehículos diferentes del mismo tren, siempre que se utilice una muestra adecuada de individuos (al menos 10 en cada vehículo) y que se emplee un número adecuado de secciones de vía (al menos 4 secciones de 5 minutos cada una).

Conclusiones y discusión

El alcance de esta norma se limita exclusivamente al confort de los vehículos ferroviarios y excluye explícitamente los efectos sobre la salud y sobre el desarrollo de las actividades. Sin embargo, algunos estudios sobre la salud se siguen basando en esta norma o en la antigua UIC 513. La valoración del confort se realiza a partir de los valores R.M.S. de las aceleraciones ponderadas mediante filtros.

Existen numerosos índices, pero el único que es normativo es el índice NMV del método simplificado ya que es sobre el que se tiene cierta experiencia. Este método solo contempla las aceleraciones a nivel de

suelo. Hay que tener en cuenta las consideraciones realizadas anteriormente sobre los asientos. Estos pueden variar a lo largo de la vida de los vehículos ferroviarios.

La valoración del confort desde el punto de vista de los eventos discretos y curvas de transición se realiza a partir de la valoración de las aceleraciones laterales, aceleraciones pico sobreaceleraciones y velocidades de balanceo con distintos métodos de filtrados (ventana de media móvil, filtros de paso bajo de 2 Hz). En esto se diferencia de los métodos establecidos en las normas que valoran los efectos sobre la salud como el VDV o los establecidos en la ISO 2631-5. No hace referencia a los eventos discretos en la dirección vertical.

Esta norma considera que sobre el confort influyen las aceleraciones en los tres ejes x, y, z. Incluso en la valoración en posición sentada en el método completo, tiene en cuenta las vibraciones que se transmiten a través de los pies. Estas vibraciones también podrían tener influencia sobre la salud desde el punto de vista de los efectos que sobre el sistema circulatorio de las extremidades puedan tener las vibraciones. Sin embargo, la normativa sobre la salud no lo tiene en cuenta, ya que está centrada en la influencia sobre la columna vertebral y el dolor de espalda.

No se definen en detalle los recorridos sobre los que se debe evaluar el confort ni el estado de la vía. Tan solo indica que debe quedar reflejado en el informe. Lo normal es que las autoridades ferroviarias determinen unos tramos característicos de vía para poder comparar unos vehículos con otros. De esta manera no se puede extrapolar los resultados para el resto de las vías como ocurre con la norma EN 14363.

De un modo análogo a la norma anterior realiza un tratamiento estadístico para tener en cuenta la variabilidad de la señal. De este modo elimina los valores extremos. El tiempo de medida debe ser como mínimo de 5 minutos y la evaluación se realiza cada 5 segundos. Esto supone que tendrá en cuenta las vibraciones a partir de 0.2 Hz. En otras normas se establecen periodos de 1 s, pero para el mundo del ferrocarril parece más correcto el periodo de 5 s.

3.1.3.4 ISO 10056 (2001) Medida y análisis de la vibración de cuerpo completo a la que están expuestos los pasajeros y la tripulación de vehículos ferroviarios

Objeto de la norma

Esta norma establece el método de medida y de análisis de las vibraciones de cuerpo completo en los entornos ferroviarios teniendo en cuenta las características especiales de estos vehículos, pero no propone ningún método de valoración.

Descripción de la norma

Las mediciones de las aceleraciones se realizan en el suelo encima de los bogies y en el centro del vehículo. En la cabina de conducción se debe medir cerca del lugar donde está montado el asiento del maquinista (a 100 mm de la proyección vertical del asiento) y en el interfaz hombre - asiento. Se medirán las aceleraciones en los ejes x, y, z y se puede medir el giro alrededor del eje x.

Método de análisis

El procesamiento de las señales se realiza según las normas ISO 2631-1 e ISO 2631-4 calculando los valores R.M.S. de las aceleraciones ponderadas, pero para tener en cuenta las fluctuaciones y la variabilidad de las aceleraciones en ferrocarril se realiza un análisis estadístico de los valores R.M.S. calculados cada 5 s. Este método es igual al presentado en la EN 12299. Se utilizan los valores de los percentiles 95% y 99% del histograma de probabilidades.

En cualquiera de estas normas se requiere para el informe el análisis espectral de la señal y los resultados estadísticos (medias, desviaciones típicas, percentiles 99, valores máximos etc.) así como la descripción del vehículo, asiento, la vía y las condiciones del ensayo.

El método se esquematiza en la Figura 3.1.24.

Conclusiones y discusión

Esta norma es muy similar a la EN 12299 debido al desarrollo paralelo que se produce entre los comités ISO y los de la agencia europea de normalización. Por lo que rigen los mismos comentarios realizados en el apartado anterior. Como mayor diferencia no tiene en cuenta los eventos discretos ni en las curvas de transición.

Figura 3.1.24 Método de análisis de (ISO 10056 2001.)

No indica ningún límite y solo define la forma y contenido que debe tener el informe. Esto se debe principalmente a que los límites que establecen otras normas no están suficientemente probados y parece más lógico esperar a tener más información para establecer dichos límites.

3.1.4 Conclusiones del análisis de la normativa.

Como se indica en (Griffin 2006), no existe un conocimiento claro sobre cómo afectan las vibraciones e cuerpo completo a la salud. Se sabe que muchas personas expuestas a vibraciones experimentan dolor de espalda, pero también que existen otros factores como la ergonomía, la postura, la humedad y las bajas temperaturas que tienen una gran influencia sobre el dolor de espalda. Se sabe que las vibraciones y los impactos aumentan las tensiones que se producen en el cuerpo humano. Se piensa que mediante determinados métodos de medida y evaluación que tienen en cuenta la dirección y las frecuencias a las que se producen las vibraciones se puede predecir la severidad de las vibraciones e indicar las magnitudes que pueden ser dañinas.

Pero a día de hoy no se es capaz de predecir la probabilidad de ciertos daños debidos a la exposición a las vibraciones. Actualmente existe variada normativa que podría aplicarse para evaluar la exposición de los conductores de vehículos ferroviarios a las vibraciones. Sin embargo, no existen numerosos estudios al respecto.

Debido a esta gran variedad los distintos estudios consultados, han sido realizados según distintas normas, lo cual supone perder uno de los objetivos de las normas que es homogeneizar los resultados de las evaluaciones realizadas para poder compararlas.

En este capítulo se ha tratado de examinar la normativa que se puede aplicar para la evaluación de las vibraciones a las que está expuesto el conductor de vehículo ferroviario desde el punto de vista de la salud. Hay que tener en cuenta que la normativa es un compromiso entre los distintos implicados (usuarios, autoridades, legisladores, fabricantes, operadores). Puede ser útil para homogeneizar resultados poder comparar unos vehículos y otros, establecer criterios para la compra de vehículos y establecer límites en la legislación. Pero hay que diferenciarla del conocimiento ya que en muchos casos son compromisos a los que se llega para alcanzar a un consenso. Es necesario diferenciar entre lo comúnmente aceptado y lo probado.

En cualquier caso, si la normativa consigue la reducción de las vibraciones a las que están expuestos los trabajadores, está claro que se reducirán los riesgos de que estas vibraciones provoquen enfermedades. Si el objetivo es cambiar la distribución de la vibración entre sus ejes o la duración de la exposición a la misma, puede que un mal método de evaluación de lugar a condiciones peores de exposición.

En la Por otro lado, también existe normativa para caracterizar el comportamiento dinámico de los asientos (EN 30326 o ISO 10326), pero estas normas no establecen límites las características dinámicas de los asientos. Esto sí sucede en normativa sobre tractores y vehículos de carga (Ahmadian et al. 2002).

Combinando las dos normativas anteriores, se podría establecer el método que garantice que la exposición a las vibraciones de un maquinista ocupando un asiento que cumpla determinados límites (en lo que se refiere a sus características dinámicas) y montado sobre un vehículo ferroviario que cumple la normativa de comportamiento dinámico, están por debajo de los límites establecidos por la normativa general.

La normativa relacionada con el mundo ferroviario posee sus características propias.

Así por ejemplo los filtros utilizados por las normas ferroviarias para establecer el efecto de las vibraciones en los humanos (por ejemplo, el confort) difieren ligeramente de los estipulados en la normativa general (véase los filtros verticales definidos en las normas ISO 2631-1 ISO 2631-4, y EN 12299),

Además, la norma EN 12299, que trata principalmente sobre el confort, define la mayor parte de sus índices como una combinación de las aceleraciones ponderadas en los tres ejes y no como el peor de los mismos. De un modo análogo a la norma UC 518 o EN 14363 que caracterizan el comportamiento dinámico del vehículo en general, la norma EN 12299 realiza un tratamiento estadístico de las señales para tener en cuenta la fluctuación de las vibraciones en el ferrocarril. Éste no es el caso de la normativa general que exige realizar las mediciones simulando la operativa cotidiana del trabajador, sin realizar ningún tratamiento posterior aparte de la ponderación de las señales por los filtros definidos.(Howarth 2004)

La norma EN 12299 también introduce conceptos como el confort ligado a las curvas de transición y a eventos discretos ya que son importantes en el ferrocarril. Estos conceptos no están desarrollados en la normativa sobre la salud (tan solo en la ISO2631-5 que parece muy complicada de utilizar (Marjanen 2005)) pero se sabe que los impactos y las vibraciones bruscas también tienen un efecto importante sobre la salud.

Por último, se ha examinado la normativa que afecta a los Bogies (EN 15827-3) ya que uno de los requisitos obligatorios para el diseño de los bogies según esta norma consiste cumplir lo indicado en la directiva 2002/44, pero sin embrago no indica cómo conseguir dicho cumplimiento. Está claro que un elemento fundamental son los asientos elegidos. Sin embargo, los asientos se pueden llegar a cambiar a lo largo de la vida del vehículo.

Tabla 3-20 se presenta un resumen de la normativa analizada y los criterios que se han utilizado para el análisis.

Actualmente se ha publicado numerosa normativa (ISO, EN, etc.) para la valoración de las vibraciones en los puestos de trabajo. Existe incluso una directiva de la unión europea con su correspondiente traslado a la legislación española cuyo objetivo primordial es garantizar la salud de los trabajadores y limitar los efectos de las vibraciones.

Sin embargo, son normas generalistas y no tienen en cuenta las especificidades del ferrocarril.

La aplicación estricta de esta normativa en el mundo del ferrocarril es posible que no presente muchos problemas, ya que no es un ámbito en los que los niveles vibratorios sean excesivos como en el sector de vehículos agrarios o la maquinaria de obra pública.

Sin embargo, hoy en día el proceso de aprobación de un vehículo ferroviario ya es casi tan largo y costoso como el de la construcción del mismo. Según esta normativa sería necesario realizar por parte del explotador del vehículo numerosas pruebas y mediciones para garantizar la salud de sus trabajadores, en este caso los maquinistas.

Uno de los objetivos de las normas, además de unificar criterios y poder comparar resultados, es servir a los clientes de cierto tipo de productos a establecer los requisitos necesarios que garanticen un uso correcto y seguro de dichos productos. Trasladado al sector ferroviario, la normativa sirve, entre otras cosas, para conseguir que el diseño de los vehículos sea seguro y no represente ningún peligro para las personas que viajan o que operan los trenes.

Sería necesario establecer una metodología, específica en el caso de las cabinas de los vehículos ferroviarios, para que se pudiesen extrapolar a cualquier tipo de vía y condición del vehículo los resultados de las mediciones realizadas durante el proceso de aceptación del vehículo, de tal manera que se garantice que los niveles vibratorios están siempre dentro de los límites permitidos.

En general la valoración de las vibraciones se basa en el análisis de las aceleraciones. La norma ISO 2631-1 establece el método general de esta valoración, aunque de un modo confuso. Es la más extendida de las normas y también la más criticada. El método preferido es el valor eficaz ponderado o R.M.S. y según el factor de cresta se pueden aplicar otros métodos sobre los cuales no establece límites. Esta norma es bastante imprecisa y existen numerosas interpretaciones de la misma. De hecho, está en proceso de revisión.

La directiva 2002/44 y el real decreto aplican el mismo método para la valoración de las aceleraciones que la ISO 2631-1 pero consideran solo el peor valor medido entre los ejes en los que se realiza la medición (aunque existen estudios que indican que en este caso se pueden estar subestimando el nivel de vibraciones (Marjanen, 2004)). La directiva europea permite utilizar el método del valor eficaz ponderado R.M.S. o el método VDV, mientras que el real decreto considera solo el R.M.S. Este método es el más utilizado en España y en general en toda Europa mientras que el VDV es más utilizado en países anglosajones. Sería necesario analizar que método es más apropiado en función del tipo de vibraciones que se da en el sector ferroviario.

La directiva europea permite sustituir mediciones por estudios e informes de los fabricantes que garanticen que el nivel de vibraciones se encuentra por debajo de los límites establecidos (Ortiz et al. 2005). Hoy en día existen varios aspectos de la dinámica de un vehículo que se pueden demostrar mediante simulaciones informáticas (EN 15827-3 2008). Sería necesario establecer si es posible aplicar estos métodos para evaluar las vibraciones que actúan sobre la tripulación de vehículos ferroviarios.

Hay que destacar también el hincapié que hace la directiva y el real decreto en controlar las vibraciones que pueden afectar a las tareas que llevan a cabo los trabajadores. En el caso del ferrocarril se concentra en la tarea de la conducción. No existe normativa que haga referencia al respecto y lo habitual es que se excluya de sus análisis.

En el sector ferroviario ya existe normativa para caracterizar el comportamiento dinámico de un vehículo (UIC 518, EN 14363 etc.). Mediante ensayos realizados en distintas condiciones del vehículo, la vía y su trazado es capaz de validar el comportamiento del vehículo para todas las vías europeas. Para ello utiliza métodos estadísticos que tienen en cuenta la naturaleza de las vibraciones en el ferrocarril. De hecho, en esta norma se establecen límites para las aceleraciones en la caja y en la cabina del maquinista, pero con otros límites y filtros a los establecidos en la normativa que tiene en cuenta la influencia de las vibraciones en la salud.

Por otro lado, también existe normativa para caracterizar el comportamiento dinámico de los asientos (EN 30326 o ISO 10326), pero estas normas no establecen límites las características dinámicas de los asientos. Esto sí sucede en normativa sobre tractores y vehículos de carga (Ahmadian et al. 2002).

Combinando las dos normativas anteriores, se podría establecer el método que garantice que la exposición a las vibraciones de un maquinista ocupando un asiento que cumpla determinados límites (en lo que se refiere a sus características dinámicas) y montado sobre un vehículo ferroviario que cumple la normativa de comportamiento dinámico, están por debajo de los límites establecidos por la normativa general.

La normativa relacionada con el mundo ferroviario posee sus características propias.

Así por ejemplo los filtros utilizados por las normas ferroviarias para establecer el efecto de las vibraciones en los humanos (por ejemplo, el confort) difieren ligeramente de los estipulados en la normativa general (véase los filtros verticales definidos en las normas ISO 2631-1 ISO 2631-4, y EN 12299),

Además, la norma EN 12299, que trata principalmente sobre el confort, define la mayor parte de sus índices como una combinación de las aceleraciones ponderadas en los tres ejes y no como el peor de los mismos. De un modo análogo a la norma UC 518 o EN 14363 que caracterizan el comportamiento dinámico del vehículo en general, la norma EN 12299 realiza un tratamiento estadístico de las señales para tener en cuenta la fluctuación de las vibraciones en el ferrocarril. Éste no es el caso de la normativa general que exige realizar las mediciones simulando la operativa cotidiana del trabajador, sin realizar ningún tratamiento posterior aparte de la ponderación de las señales por los filtros definidos.(Howarth 2004)

La norma EN 12299 también introduce conceptos como el confort ligado a las curvas de transición y a eventos discretos ya que son importantes en el ferrocarril. Estos conceptos no están desarrollados en la normativa sobre la salud (tan solo en la ISO2631-5 que parece muy complicada de utilizar (Marjanen 2005)) pero se sabe que los impactos y las vibraciones bruscas también tienen un efecto importante sobre la salud.

Por último, se ha examinado la normativa que afecta a los Bogies (EN 15827-3) ya que uno de los requisitos obligatorios para el diseño de los bogies según esta norma consiste cumplir lo indicado en la directiva 2002/44, pero sin embargo no indica cómo conseguir dicho cumplimiento. Está claro que un elemento fundamental son los asientos elegidos. Sin embargo, los asientos se pueden llegar a cambiar a lo largo de la vida del vehículo.

Tabla 3-20. Resumen de la normativa y criterios de analisis.

Objetivo	Índice de valoración	Límites	Ejes que evalúa	Filtros	velocidad	tramos de vía	evaluación	punto de medida
ISO 2631-1 1997	Evaluación de la vibración de cuerpo completo desde el punto de vista del confort, la salud y el mareo	Dos zonas de precaución en la guía para la salud correspondientes a 0.5m/s ² y 1.15 m/s ² para RMS y 8.5 y 17 m/s ² para VDV	En el peor de los ejes si es predominante En el vector suma ponderado en caso contrario	Wa general Wd horizontal Wk vertical Wc respaldo				interfaces
ISO 2631-4 (2001)	evaluación de los efectos de la vibración sobre el confort de los pasajeros y la tripulación de vehículos sobre raíles		En el peor de los ejes si es predominante En el vector suma en caso contrario. Incluye giro en torno eje x	Wa general Wd horizontal Wb vertical Wc respaldo		número suficiente de curvas y rectas para caracterizar el comportamiento del vehículo		
ISO 2631-5 (2004)	Evaluación de la exposición de los humanos a impactos múltiples para personas sentadas	Factor de riesgo de la tensión de compresión estática Sed		Valor pico de la aceleración Ak				interfaces
EN 14253:2007	Medición y cálculo de la exposición humana a la vibración en relación a la salud	EAV-RMS= 0.5m/s ² ELV-RMS= 1.15m/s ²					La duración de la medición debe asegurar que se dan los casos típicos de vibraciones a los que está expuesto el ser humano.	interfaces
Directiva 2002/44/CE de 25 de junio de 2002	disposiciones mínimas en materia de protección de los trabajadores contra los riesgos para su seguridad y su salud originados por la exposición a vibraciones mecánicas.	EAV-RMS= 0.5m/s ² ELV-RMS= 1.15m/s ² EAV-VDV= 9.1 m/s ² ELV-VDV= 21 m/s ²	En el peor de los ejes ponderados con 1.4awx, 1.4awy y 1.4awz	Wa general Wd horizontal Wk vertical Wc respaldo			Medida en periodos representativos del trabajo realizado	interfaces
ISO 10326-2	Especificación de los ensayos en laboratorios de asientos para pasajeros y tripulación . Caracterización de la transmisión de la vibración	No indica Comportamiento no lineal si H(fr1)-H(fr2)/ max>30%	En los tres ejes x, y, z	Wa general Wd horizontal Wk vertical Wc respaldo			FRF ante excitación pseudo aleatoria FRF ante frecuencia de resonancia	Suelo laboratorio interfaces
pr EN 15827-3.	Principios y procesos que se deben seguir para alcanzar un diseño satisfactorios del bogie y su validación	Igual que la directiva u otras normas NF E 90 401-2 o ENV 12299	En el peor de los ejes	Wa general Wd horizontal Wk vertical Wc respaldo	Velocidad de servicio del vehículo	vías de uso del vehículo	Medida en periodos representativos de la conducción de los vehículos examinados	interfaces
UNE-EN 14363:2007	ensayos de vehículos ferroviarios desde el punto de vista de su comportamiento dinámico.	0.5/0.75	eje y- eje z	Filtro vertical 10 Hz Filtro lateral 20 Hz	Vel 10% superior a la de servicio	Vías con rectas, curvas de radio grande, radio medio, radio pequeño y muy pequeño. Calidad QN1, QN2 y QN3	muestreo de probabilidad del 95%	Suelo cabina
UNE-ENV 12299:2000	método para la cuantificación de los efectos de los movimientos de la caja del coche sobre la comodidad de marcha de los viajeros		eje x-eje y- eje z	Wa general Wb horizontal Wd vertical Wc respaldo	Velocidad de servicio del vehículo	Teniendo en cuenta que las condiciones de funcionamiento del vehículo sean representativas	Muestreo estadístico del 95%-99% del valor rms medido cada 5 s	Suelo cabina Interfaces asiento
ISO 10055 (2001)	Medición de la vibración a la que está expuesta los pasajeros y la tripulación		eje x-eje y- eje z	Wa general Wd horizontal Wb vertical Wc respaldo			Muestreo estadístico del 95%-99% del valor rms medido cada 5 s	suelo encima de los bogies y en el centro del vehículo. Y el interface hombre asiento.

Por lo tanto, parece necesario estudiar las vibraciones que se producen en los vehículos ferroviarios desde el punto de vista de la salud para los conductores y tripulación de los mismos y poder minimizar su efecto, que es el objetivo final de este trabajo.

3.2 Estudios sobre la influencia de las vibraciones en el cuerpo humano.

En este apartado se analizan las influencias de las vibraciones desde distintos puntos de vista. Aunque no es el objetivo principal de esta tesis, se revisan los estudios sobre el confort en vehículos ferroviarios. Dada la similitud en el análisis del problema, alguna de las conclusiones de estos estudios se puede aplicar para el estudio de los efectos de las vibraciones desde el punto de vista de la salud.(Nakashima 2004)

En segundo lugar, se analizan los efectos que pueden producir las vibraciones sobre la salud en el cuerpo humano en general, incluyendo alguno de los pocos estudios epidemiológicos realizados en el sector del ferrocarril. Posteriormente se resumen los resultados de los pocos estudios encontrados que analizan las vibraciones a las que están sometidos los conductores de vehículos ferroviarios, revisando los valores típicos que se dan en las cabinas de conducción.

Por último, se analizan los estudios realizados sobre la influencia de las vibraciones en el desarrollo de la tarea que realiza el conductor, es decir en la conducción propiamente dicha.

3.2.1 Estudios sobre la influencia de las vibraciones sobre el confort en vehículos ferroviarios.

Existen numerosos estudios sobre el confort vibratorio de los viajeros en vehículos ferroviarios ya que es un parámetro fundamental a la hora de elegir este medio de transporte (Carlbon 2000; Cleon y Lauriks 1996; Corbridge y Griffin 1986; Corbridge, Griffin, y Harborough 1989; Förstberg y Ledin 1996; M. J. Griffin 2007; Kim, Y.-G 2009; Kottenhoff 1999; Koyanagi 1985; Lauriks y Förstberg 2003; Lam, Cheung, y Poon 1999; Nagai et al. 2006; Ozkaya et al. 2016; H Suzuki 1998; Hiroaki Suzuki 1998; Lam, Cheung, y Poon 1999). De hecho, la normativa en este sentido ha evolucionado bastante desde los índices de Sperling y el W_z desarrollados en los años 40 y 50 (que todavía se utilizan en algunas administraciones) hasta la última norma europea EN 12299 en las que se analiza el confort medio, en eventos discretos y curvas de transición.

Aunque el objetivo fundamental de estos estudios y normas es la evaluación de los efectos de las vibraciones sobre el confort de los pasajeros, proporcionan información sobre las características de dichas vibraciones en el ámbito ferroviario.(Griffin 2007; Howarth y Griffin 1990)

La diferencia respecto a los efectos sobre la salud radica en la forma de evaluar las vibraciones.

El movimiento en un vehículo que se desplaza sobre raíles viene caracterizado por (AEA TECHNOLOGY 1999; Garg y Dukkipati 1984):

1. Aceleraciones de translación y aceleraciones de rotación semi-aleatorias (en los tres ejes) debido a las imperfecciones en las superficies de la rueda y el carril, a desalineaciones, sobreanchos de vía y errores en la construcción, etc.
2. Movimientos más o menos periódicos debidos a problemas de inestabilidad (lazo), movimientos de la suspensión, irregularidades de la vía de gran longitud de onda, distancias entre las juntas de carril, etc.
3. Aceleraciones cuasi estáticas verticales y laterales debido a los peraltes en el paso por curvas, movimiento de lazo alrededor del eje z debido al alineamiento y el peralte, y movimientos cuasiestáticos según el eje longitudinal debido a las frenadas y aceleraciones del vehículo.

4. Movimientos intempestivos debidos a grandes defectos de la vía, golpeteo en los topes de la suspensión, desvíos o cambios en los niveles cuasiestáticos (sobreaceleraciones) por un cambio de radio en una curva con o sin curva de transición

El rango de frecuencias que influirán notablemente sobre el confort significativamente se encuentra entre los 0.1 a 2 Hz en las curvas de transición (balanceo), 0.5 a 10 Hz en las direcciones lateral y longitudinal y 0.5 Hz a 20 Hz en la dirección vertical.(Suzuki 1997)

En vehículos de alta velocidad (a partir de 250 Km/h) y trenes pendulares se pueden dar aceleraciones verticales entre 0.1 y 0.5 que pueden dar lugar a la aparición de mareo(Förstberg y Ledin 1996; Förstberg 2000).

Los movimientos de rotación son principalmente de dos tipos:

- Movimientos de muy baja frecuencia y relativamente alta amplitud que se dan al entrar o abandonar curvas peraltadas.
- Movimientos de balanceo de lado a lado debidos a la interacción entre la vía, las ruedas y la suspensión.

En las Tabla 3-21 y 3-22, así como en Figura 3.2.1 se muestra el tipo de vibraciones presentes en el ferrocarril y su comparativa respecto a otros medios de transporte u otras máquinas que pueden emitir vibraciones.

Una de las características que se observa en primera instancia es que en el ferrocarril las vibraciones más importantes se producen en el eje vertical z y el eje lateral y. No se puede considerar ninguno de los dos ejes como predominante ya que dependiendo del recorrido que realice el vehículo y el estado de la vía puede ser más importante un eje u otro.

En general las vibraciones en torno al eje x son menores, teniendo una relativa importancia solo en metros, cercanías y tranvías que aceleran y frenan numerosas veces a lo largo de un recorrido.

Las excitaciones vibratorias de los vehículos ferroviarios dependen de numerosos factores como el trazado y el estado de mantenimiento de la vía, la velocidad, el tipo y suspensión del vehículo y el asiento.

La UIC realizó numerosos estudios en los años 80 (UIC B 153 RP 18:1989-09,.; UIC B 153 RP 5, s. f.; UIC RP 16 B 153, .; UIC RP 1 B 153 1981; UIC RP 4 B 153 1985; UIC RP 6 B 153 1985; UIC RP 8 B 153 1986; UIC RP 15 B 153. 1988) para establecer la validez de la norma ISO 2631-1. Todos estos estudios se realizaron basándose en la versión de 1978, pero al final dio lugar a la ficha UIC 513 que posteriormente ha dado lugar a la EN 12299.

Tabla 3-21. Comparativa de los niveles vibratorios en el ferrocarril y otros medios o maquinaria (a_s aceleración asiento ejes traslacionales, a_{sb} respaldo del asiento, a_f suelo,)(Y. Marjanen, Mansfield, y Maeda 2006).

Machine	Study/source	X_s	Y_s	Seat Z_s	Roll	Pitch	Back-rest			Z_b	X_f	Floor Y_f	Z_f
Bus	Maeda	24	19	100	19	45	15	50	17	48	6	14	26
Bus	Griffin	45	61	100	60	42	4	84	30	47	13	11	53
Tractor #3	Marjanen	89	81	67	5	7	12	100	46	42	20	18	20
Combine	Maeda	83	56	100	49	33	12	86	26	24	45	74	52
Monorail	Maeda	30	53	100	18	43	17	62	35	45	12	26	26
Train	Griffin	37	100	97	7	1	0	89	53	35	9	13	32
Train #1	Marjanen	21	53	100	30	22	5	68	25	25	16	15	35
Train #2	Marjanen	28	46	100	32	25	6	65	21	22	12	14	32
Train #3	Marjanen	18	40	100	27	20	5	59	19	30	11	12	31

Tabla 3-22. Comparativa de los niveles vibratorios según la dirección de aplicación.

Machine	Study/source	X _s	Y _s	Seat Z _s	Roll	Pitch	Back-rest			Zb	Xf	Floor Yf	Zf
Bus	Maeda	24	19	100	19	45	15	50	17	48	6	14	26
Bus	Griffin	45	61	100	60	42	4	84	30	47	13	11	53
Tractor #3	Marjanen	89	81	67	5	7	12	100	46	42	20	18	20
Combine	Maeda	83	56	100	49	33	12	86	26	24	45	74	52
Monorail	Maeda	30	53	100	18	43	17	62	35	45	12	26	26
Train	Griffin	37	100	97	7	1	0	89	53	35	9	13	32
Train #1	Marjanen	21	53	100	30	22	5	68	25	25	16	15	35
Train #2	Marjanen	28	46	100	32	25	6	65	21	22	12	14	32
Train #3	Marjanen	18	40	100	27	20	5	59	19	30	11	12	31

Figura 3.2.1. Vibraciones de cuerpo completo de maquinaria móvil y vehículos (Eberhard 2006).

Los ensayos y estudios realizados por la UIC (UIC B 153 RP 18:1989-09, s. f.) demostraron que existen ligeras diferencias en los filtros de ponderación a utilizar en el ferrocarril (especialmente el vertical) y en el tratamiento estadístico que se realiza en los valores eficaces de las aceleraciones ponderadas. También se comprobó que, dentro del espectro vibratorio relevante dentro de los vehículos ferroviarios, los componentes con frecuencias inferiores a 1 Hz constituyen una parte significativa de la energía de la señal.

Para la evaluación del confort medio se utilizan las combinaciones de estos valores eficaces en las distintas direcciones del espacio (UIC RP 12 B 153 1988)

Para determinar la influencia de las vibraciones en el confort se han utilizado principalmente dos tipos de métodos:

- Cuestionarios en los que los viajeros valoraban el confort del vehículo (especialmente después de recorridos de 5 minutos)
- Método del botón múltiple: en el que el viajero debía presionar uno de los botones según su percepción del confort. (especialmente indicado para la valoración de las aceleraciones de muy baja frecuencia) (Förstberg y Ledin 1996; Förstberg 2000) y para la evaluación del confort debido a eventos discretos que necesitan una rápida evaluación.

Uno de los elementos fundamentales en la influencia de las vibraciones es los asientos. La normativa ISO recomienda la medición de las aceleraciones en la interfaz entre el asiento y el cuerpo humano, pero en estas medidas existen grandes desviaciones debido al posicionamiento de los acelerómetros y a los

movimientos involuntarios de los pasajeros. Por lo que se recomienda utilizar las medidas de las aceleraciones sobre el piso y las características frecuenciales de los asientos medidas en los laboratorios para obtener” las aceleraciones calculadas en la interfaz” que describan el confort. Sin embargo, los resultados obtenidos en los ensayos (UIC RP 4 B 153 1985; UIC RP 16 B 153 1988) indican que los valores calculados no se corresponden con los medidos en realidad.

En algunos informes se recomienda utilizar el método simplificado ya que existe una gran correlación entre las aceleraciones en el piso, asiento y respaldo siempre que se utilicen asientos similares a los empleados en los ensayos (UIC RP 16 B 153 1988).

Las vibraciones rotacionales son relativamente bajas o están correlacionadas con las vibraciones axiales, por lo que no parece necesario realizar ninguna medida según los ejes de rotación (UIC RP 15 B 153. 1988).

En los ensayos realizados por el ORE (UIC RP 6 B 153 1985; UIC RP 15 B 153. 1988), se demostró que la mejor correlación entre las valoraciones de los pasajeros y el valor estadístico de las vibraciones se daba para el percentil 95 de los valores eficaces.

En otros estudios se recomienda realizar las mediciones sobre una base de tiempo más larga que los cinco minutos inicialmente recomendados por la normativa o incluso sobre toda la línea para obtener unos resultados más apropiados (UIC B 153 RP 18:1989-09) dada la fluctuación de las aceleraciones ferroviarias.

Los otros factores que influyen en la percepción del confort vibratorio serían:

- Temperatura: El efecto de las vibraciones es más pernicioso a bajas temperaturas, pero en general en el ferrocarril los entornos vibratorios suelen estar acondicionados.
- Ruido: según (UIC RP 12 B 153 1988), cuando se supera un nivel acústico de 60 dB, una parte de la falta de confort vibratorio estimado por los pasajeros se puede imputar al ruido.
- Vibraciones de muy baja frecuencia.

Los estudios realizados por la UIC muestran que los componentes de la vibración lateral y de balanceo a baja frecuencia (0-1 Hz) tienen una gran influencia en el confort especialmente en el confort a de marcha momentáneo (vease Figura 3.2.2).

El análisis de las variables dentro de las vibraciones que pueden dar lugar a la falta de confort o daño a la salud lleva a la siguiente clasificación entre variables intrínsecas y extrínsecas (Mansfield, 2008).

A) Variables extrínsecas

Variables vibratorias:

- **Magnitud**, cuya influencia varía según de la ley de la potencia de Steven.
- **Frecuencia**: en general en un rango de 0.5 a 100 Hz. A bajas frecuencias (por debajo de 1 o 2 Hz) las fuerzas que actúan sobre el cuerpo son proporcionales a las aceleraciones de entrada y el mismo movimiento es transmitido al resto del cuerpo. A frecuencias un poco mayores las varias resonancias que presenta el cuerpo tienden a amplificar el movimiento produciendo falta de confort en varias partes del cuerpo (abdomen, tórax, hombros cara, etc.) Si se aumenta más la frecuencia el cuerpo es capaz de atenuar la vibración. Estas variaciones son recogidas en los contornos de confort equivalentes o isoconfort y trasladadas a la normativa por los filtros que aparecen para ponderar las aceleraciones. Los últimos estudios revelan que los contornos de isoconfort dependen de la magnitud de la vibración. Hay que tener en cuenta que la respuesta del cuerpo no es lineal ya que ante un aumento de la vibración se reduce la frecuencia de resonancia.

- **Dirección de la vibración;** la respuesta del cuerpo humano varía según la dirección de la vibración lo que lleva a utilizar distintos filtros de ponderación según la dirección. Las fases de los movimientos entre las distintas direcciones también pueden afectar al confort.
- **Duración de la vibración;** La falta de confort y los daños sobre la salud aumentan con la duración de una forma cuadrática o de la cuarta potencia según diversos estudios (Matthews 2002). También se ha demostrado la influencia de la forma de la onda vibratoria en este aspecto (no es igual una señal sinusoidal que aleatoria). En este caso habría que tener en cuenta la fatiga del cuerpo humano en periodos prolongados de exposición a las vibraciones.
- **Otras variables:** temperatura, humedad, ruido, ergonomía. (como se ha indicado anteriormente).

B) Variables Intrínsecas:

- Variabilidad en un sujeto: postura, posición, orientación.
- Variabilidad entre sujetos: Peso y tamaño. Respuesta dinámica del cuerpo, edad, género, experiencia y expectativas personales, estado físico.

Figura 3.2.2. Evolución de las aceleraciones transversales a baja frecuencia y evolución con la velocidad (UIC RP 12 B 153 1988).

Los efectos de estas vibraciones pueden dividirse en respuestas subjetivas, respuestas fisiológicas, respuestas biomecánicas, interferencias con las actividades desarrolladas y efectos sobre las capacidades según se observa en la Figura 3.2.3.

Figura 3.2.3 Rango típico de vibraciones y magnitudes de los distintos efectos de las vibraciones. (Mansfield 2004)

3.2.2 Estudios epidemiológicos sobre la influencia de las vibraciones en la salud.

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

La exposición más común a vibraciones y choques fuertes suele darse en vehículos todo terreno, incluyendo maquinaria de movimiento de tierras, camiones industriales y tractores agrícolas (Hostens y Ramon 2003).

3.2.2.1 Biodinámica.

Como todas las estructuras mecánicas, el cuerpo humano tiene frecuencias de resonancia a las que presenta una respuesta mecánica máxima. La explicación de las respuestas humanas a las vibraciones no puede basarse exclusivamente en una sola frecuencia de resonancia. Hay muchas resonancias en el cuerpo, y las frecuencias de resonancia varían de unas personas a otras y en función de la postura. Para describir el modo en que la vibración produce movimiento en el cuerpo suelen utilizarse dos respuestas mecánicas: transmisibilidad e impedancia.

La transmisibilidad indica qué fracción de la vibración se transmite, por ejemplo, desde el asiento a la cabeza. La transmisibilidad del cuerpo depende en gran medida de la frecuencia de vibración, el eje de vibración y la postura del cuerpo. La vibración vertical de un asiento causa vibraciones en varios ejes en la cabeza; en el caso del movimiento vertical de la cabeza, la transmisibilidad suele alcanzar su máximo valor en el intervalo de 3 a 10 Hz.

La impedancia mecánica del cuerpo indica la fuerza que se requiere para que el cuerpo se mueva a cada frecuencia. Aunque la impedancia depende de la masa corporal, la impedancia vertical del cuerpo humano suele presentar resonancia en torno a los 5 Hz. La impedancia mecánica del cuerpo, incluyendo esta resonancia, incide considerablemente en la forma en que se transmite la vibración a través de los asientos.

3.2.2.2 Alteraciones de las funciones fisiológicas.

Las alteraciones típicas de una “respuesta instantánea” (p. ej., aumento de la frecuencia cardíaca) se normalizan rápidamente con la exposición continuada, mientras que otras reacciones continúan o se desarrollan de modo gradual. El último aspecto puede depender de todas las características de las vibraciones, incluyendo el eje, la magnitud de la aceleración y la clase de vibración (sinusoidal o aleatoria), así como de otras variables tales como el ritmo circadiano y las características de los sujetos (Garg y Dukkupati 1984; Hasan 1970). Con frecuencia no es posible relacionar directamente las alteraciones de las funciones fisiológicas en condiciones de campo con las vibraciones, dado que ésta suele actuar conjuntamente con otros factores significativos, como

la elevada tensión mental, el ruido y las sustancias tóxicas. Las alteraciones fisiológicas son frecuentemente menos sensibles que las reacciones psicológicas (p. ej., el malestar. Hay un umbral con un límite inferior en torno a un valor eficaz de 0.7 m/s² entre 1 y 10 Hz, que aumenta hasta un valor eficaz de 30 m/s² a 100 Hz. Se han realizado numerosos estudios con animales, pero su relevancia para los humanos es dudosa. Estos límites parecen estar muy lejos de los valores que se dan en los entornos ferroviarios.

3.2.2.3 Alteraciones neuromusculares

Durante el movimiento natural activo, los mecanismos de control motor actúan como un control de información constantemente ajustado por la retroinformación adicional procedente de los sensores situados en los músculos, tendones y articulaciones.

Las vibraciones de cuerpo completo producen un movimiento artificial pasivo del cuerpo humano, condición que difiere esencialmente de las vibraciones autoinducidas por la locomoción. La ausencia de control de información durante las vibraciones de cuerpo completo es la alteración más clara de la función fisiológica normal del sistema neuromuscular. La gama de frecuencias más amplia asociada con las vibraciones de cuerpo completo (entre 0.5 y 100 Hz), comparada con la del movimiento natural (entre 2 y 8 Hz para los movimientos voluntarios, e inferior a 4 Hz para la locomoción) es otra diferencia más que ayuda a explicar las reacciones de los mecanismos de control neuromuscular a frecuencias muy bajas y a altas frecuencias.

Las vibraciones de cuerpo completo y la aceleración transitoria determinan una actividad alternante relacionada con la aceleración en el electromiograma (EMG) de los músculos superficiales de la espalda de personas sentadas que obliga a mantener una contracción. Se supone que esta actividad es de naturaleza refleja. Normalmente, desaparece por completo si los sujetos sometidos a vibraciones permanecen sentados y relajados en posición encorvada.

Los datos electromiográficos sugieren que la columna puede verse sometida a una carga mayor debido a la reducción de la estabilización muscular de la misma a frecuencias de 6.5 a 8 Hz y durante la fase inicial a un desplazamiento brusco hacia arriba. A pesar de la débil actividad EMG causada por las vibraciones de cuerpo completo, la fatiga de los músculos de la espalda durante la exposición a las vibraciones puede ser superior a la que se observa en posturas sentadas normales sin vibraciones de cuerpo completo.

Los reflejos de los tendones pueden disminuir o desaparecer temporalmente durante la exposición a las vibraciones de cuerpo completo a frecuencias superiores a 10 Hz. Las pequeñas alteraciones del control postural tras la exposición a las vibraciones de cuerpo completo son muy variables, y sus mecanismos e importancia práctica no son bien conocidos.

No existen datos fiables que indiquen que la fatiga de los maquinistas sea la causa de accidentes, y menos hoy en día con el alto grado de automatización del ferrocarril, pero existen investigadores que piensan que esta fatiga puede ser uno de los factores que contribuyen a dichos accidentes (Sussman y Coplen 2000).

3.2.2.4 Alteraciones cardiovasculares, respiratorias, endocrinas y metabólicas.

Se han comparado las alteraciones observadas que persisten durante la exposición a las vibraciones con las que se producen durante el trabajo físico moderado (es decir, aumentos de la frecuencia cardíaca, presión arterial y consumo de oxígeno), incluso a una magnitud de vibración cercana al límite de tolerancia voluntaria. El aumento de ventilación obedece en parte a oscilaciones del aire en el sistema respiratorio. Las alteraciones respiratorias y metabólicas pueden no corresponderse, lo que posiblemente sugiere una perturbación de los mecanismos de control de la respiración. Se han comunicado diversos hallazgos, en parte contradictorios, sobre alteraciones de las hormonas adrenocorticotrópicas (ACTH) y las catecolaminas.

3.2.2.5 Alteraciones sensoriales y del sistema nervioso central.

Se ha sostenido la existencia de alteraciones de la función vestibular debidas a las vibraciones de cuerpo completo sobre la base de una afectación de la regulación de la postura. Las alteraciones de la función vestibular parecen revestir mayor entidad en las exposiciones a frecuencias muy bajas o próximas a la resonancia de cuerpo completo. Se supone que una discordancia sensorial entre la información vestibular, visual y propioceptiva (estímulos recibidos en el interior de los tejidos) es un mecanismo importante que explica las respuestas fisiológicas a algunos entornos de movimiento artificial.

Se han detectado alteraciones de la función del sistema nervioso central humano al utilizar potenciales cerebrales evocados por el sistema auditivo (Seidel 1975) En los efectos influían otros factores ambientales (p. ej., el ruido), la dificultad de la tarea y el estado interno del sujeto (p. ej., activación, grado de atención hacia el estímulo).

3.2.2.6 Riesgo para la salud de la columna vertebral.

Los estudios epidemiológicos indican con frecuencia que existe un riesgo elevado para la salud en la columna vertebral de los trabajadores expuestos durante muchos años a intensas vibraciones de cuerpo completo (p. ej., trabajo en tractores o máquinas de movimiento de tierras). (Clot 2006; Bongers 1990; Seidel y Heide 1986) han realizado minuciosos estudios de la literatura. En estas revisiones se llega a la conclusión de que intensas vibraciones de cuerpo completo de larga duración puede afectar negativamente a la columna e incrementar el riesgo de molestias lumbares. Tales molestias pueden ser consecuencia secundaria de una alteración degenerativa primaria de las vértebras y discos intervertebrales.

Se descubrió que la parte afectada con más frecuencia es la región lumbar de la columna vertebral, seguida de la región torácica. El modelo matemático que define la carga a la que está sometida la columna vertebral en función de las aceleraciones de entrada al cuerpo (en el asiento) se puede definir según la Tabla 3-23, donde f_n es la frecuencia natural de la columna (Thomas 2009).

La transmisibilidad entre la aceleración en el asiento y los discos de la columna vertebral se puede describir como se indica en la Figura 3.2.4.

Tabla 3-23. Modelo matemático de la carga sobre la columna vertebral.

Aceleración media de los discos vertebrales	$E[A_{out}^2] = \int_{-\infty}^{\infty} H(\omega) ^2 PSD_{Am}(\omega) d\omega$	Ecuación 15
	$A_{out} = \pi \sqrt{f_n PSD_{Am}(f_n) \left(4\zeta^2 + \frac{1}{k^2 \zeta^2} \right)} \approx 2\pi \sqrt{\frac{f_n}{2} PSD_{Am}(f_n)}$	Ecuación 16
Fuerzas	$F_{rms} = 269.5 \sqrt{PSD_{Am}(f_n)}$ $F_{2\sigma} = 539 \sqrt{PSD_{Am}(f_n)}$ $F_{3\sigma} = 808.5 \sqrt{PSD_{Am}(f_n)}$	Ecuación 17
Tensión dinámica (Pa)	$S_{rms}(Pa) = \frac{1.5 F_{rms}}{S_d} = 202139 \sqrt{PSD_{Am}(f_n)}$ $S_{2\sigma}(Pa) = 404278 \sqrt{PSD_{Am}(f_n)}$ $S_{3\sigma}(Pa) = 606417 \sqrt{PSD_{Am}(f_n)}$	Ecuación 18

Figura 3.2.4. Curva de frecuencia frente a transmisibilidad.(Bongers 1990)

Una elevada proporción de los deterioros de la región cervical, comunicados por varios autores, parecen estar causados por una postura fija desfavorable y no por la vibración, aunque no existe ninguna evidencia concluyente de la validez de esta hipótesis. Solo en unos pocos estudios se ha considerado la función de los músculos de la espalda y se ha encontrado una insuficiencia muscular. Algunos informes señalan un riesgo sensiblemente mayor de dislocación de los discos lumbares. En varios estudios de muestras representativas (Bongers 1990) se encontraron más casos de molestias lumbares en conductores de vehículos terrestres y en pilotos de helicópteros que en trabajadores de referencia comparables. Finalmente llegaron a la conclusión de que la conducción profesional de vehículos y el pilotaje de helicópteros son factores de riesgo importantes para las molestias lumbares y los trastornos de la espalda.

Debido a la falta de datos o a la existencia de datos incompletos sobre las condiciones de exposición en los estudios epidemiológicos, no se pudieron obtener relaciones exactas entre exposición y efecto.

Algunos hallazgos indican un aumento del riesgo para la salud cuando aumenta la duración de la exposición, si bien los procesos de selección han hecho que resulte difícil detectar una relación en la mayoría de los estudios. Por lo tanto, las investigaciones epidemiológicas no permiten establecer actualmente una relación entre dosis y efecto. Consideraciones teóricas sugieren efectos marcadamente perjudiciales de las cargas pico elevadas que actúan sobre la columna durante las exposiciones con altos valores transitorios. Por lo tanto, el uso de un método de “energía equivalente” para calcular la dosis de vibración (como el de la Norma Internacional 2631 es cuestionable para exposiciones a vibraciones de cuerpo completo que contienen altas aceleraciones pico. Los efectos a largo plazo por las vibraciones de cuerpo completo dependiendo de la frecuencia de vibración no se han deducido de los estudios epidemiológicos. Las vibraciones de cuerpo completo a frecuencias de 40 a 50 Hz aplicada a través de los pies a operarios en posición de pie, fue seguida de cambios degenerativos de los huesos de los pies.

Por lo general, las diferencias entre sujetos se han pasado por alto en gran medida, aunque los fenómenos de la selección sugieren que pueden tener gran importancia (Bovenzi 2010). No hay datos claros que indiquen si los efectos de las vibraciones de cuerpo completo sobre la columna dependen del sexo.

3.2.2.7 Otros riesgos para la salud.

Estudios epidemiológicos sugieren que las vibraciones de cuerpo completo es solo uno entre un grupo de factores causales que contribuyen a otros riesgos para la salud. El ruido, la elevada tensión mental y el trabajo por turnos son ejemplos de factores importantes que se sabe están relacionados con trastornos de la salud. Con frecuencia, las investigaciones de los trastornos de otros sistemas corporales han dado resultados distintos o que indican una dependencia paradójica de la prevalencia de la patología respecto de la magnitud de las vibraciones de cuerpo completo (es decir, mayor prevalencia de efectos adversos a menor intensidad). Se ha observado un complejo característico de síntomas y alteraciones patológicas en:

- Sistema nervioso central,
- sistema musculoesquelético
- el sistema circulatorio,
- sistema digestivo,

Sistema auditivo (Schmidt 1987)

- Órganos reproductores femeninos, embarazo y sistema genitourinario masculino.

Se ha denominado a este complejo “enfermedad de las vibraciones”. La misma expresión, aunque con el rechazo de muchos especialistas, se ha utilizado a veces para describir un vago cuadro clínico causado por exposición de larga duración a vibraciones de cuerpo completo a baja frecuencia que, al parecer, se manifiesta inicialmente en forma de trastornos vegetativo-vasculares periféricos y cerebrales de carácter funcional inespecífico. De acuerdo con los datos disponibles se puede extraer la conclusión de que diferentes sistemas fisiológicos reaccionan independientemente unos de otros y que no existen síntomas que puedan servir como indicador de patología inducida por vibraciones de cuerpo completo.

- Sistema circulatorio.

Se han detectado cuatro grupos principales de alteraciones circulatorias con mayor incidencia entre trabajadores expuestos a vibraciones de cuerpo completo:(Schmidt 1987)

1. Trastornos periféricos, tales como el síndrome de Raynaud, cerca del punto de aplicación de la vibración de cuerpo completo (es decir, los pies de los operarios en posición de pie o, en menor grado, las manos de los conductores).
2. Venas varicosas de las piernas, hemorroides y varicocele.
3. Cardiopatía isquémica e hipertensión.
4. Alteraciones neurovasculares.

Existen pocos estudios que relacionan la variación de los parámetros fisiológicos del cuerpo humano como puede ser el latido del corazón la variabilidad del latido LF/HF, la actividad muscular y el pulso respiratorio debido a la respuesta de éste ante las vibraciones. Estos parámetros podrían usarse como medida del confort ya que son un indicativo del estrés que padece el sujeto.

3.2.2.8 Estudios sobre la influencia de las vibraciones en la salud en vehículos ferroviarios.

Los conductores de trenes y metros aparecen en varios estudios de esta índole, pero en general existe poca información sobre el entorno vibratorio de los maquinistas. En este caso se trata de vehículos pesados en los que se dan bajos niveles vibratorios a bajas frecuencias, pero al estar dotados de ruedas de acero sobre carriles acero también pueden darse altas frecuencias, especialmente en la transmisión de las juntas de carril y los cruces y desvíos.

La mayor parte de los estudios epidemiológicos se realizan mediante radiología (Arnautova-Bulat 1979) o cuestionarios (Hannunkari, Järvinen, y Partanen 1978) que demuestran una mayor incidencia de los dolores lumbares en este grupo de trabajo que en los grupos de control.

Debido al alto número de quejas de los conductores de metro de Nueva York (Eckardt Johanning 1991) se realizaron mediciones de las aceleraciones en el puesto de conducción según la ISO 2631-1 (1997) y la Verein Deutscher Ingenieure 2057. Las relativamente altas aceleraciones laterales y verticales, el efecto de la combinación de estas aclaraciones puede ser el origen de los problemas musculoesqueléticos de los conductores, pero habría que unirlo a problemas en la ergonomía y diseño de las cabinas y asientos, posturas forzadas, altos niveles de ruido y la organización de los turnos. Los cuestionarios realizados demostraron que

dichos conductores mostraban cierta preponderancia a sufrir dolores de espalda en la zona del cuello y la zona lumbar. Los modelos estadísticos daban una ratio de 3.9 (95 ~70 CI 1.7--8.6)(Eckardt Johanning 1991).

En otros estudios se han realizado encuestas sobre los riesgos cardiovasculares (Eckardt Johanning 1991) sobre conductores de más 45 años con 15 años de trabajo en el sector, siendo los resultados ligeramente mayores que el grupo de control (15.1 % frente al 14%).

En un estudio realizado en USA sobre 2500 conductores de locomotoras (Johanning 2004) se indica que la aparición de dolor de espalda lumbar entre los conductores era de un 75% de los casos frente al 41% del grupo de control. También era importante el número de quejas de dolores de hombro.

En otros estudios (Cooperrider y Gordon 2008) realizados en Norteamérica valorando las medidas realizadas en 90 locomotoras según se indica en la norma ISO 2631-5 utilizando los métodos VDV y el método de la tensión de la espina dorsal se ha llegado a la conclusión que existe una probabilidad de riesgo para la salud relativamente bajo. En este caso el método VDV parece más restrictivo que el método de la tensión de la espina dorsal.

En Nueva Zelanda (Wigley, Groot, y Walls 2007) se han realizado encuestas y cuestionarios basados en un instrumento estandarizado para el análisis de síntomas musculoesqueléticos realizado a 516 conductores de diferentes tipos de locomotoras, trenes, circulando por todo tipo de vías. El grupo de control era de 1032 personas. El predominio del dolor de espalda lumbar era similar entre los conductores ferroviarios (85.8%) y el grupo de control (85.25%). Sin embargo, el dolor de cuello era más importante en el grupo de conductores (72,5 %) que en el grupo de control (59,6%).

En medidas realizadas sobre pasajeros se han detectado cambios en la composición de la sangre según se observa en Tabla 3-24 después de un viaje de 5 h en un tren intercity ($a z \max = 0.24 \text{ m/s}^2$ at $f = 1.25 \text{ Hz}$ a una velocidad de 114 km/h).

Tabla 3-24. Valores medios en la sangre (Azlis-Sani et al. 2015). (train passengers, total exposure time =5 h)

	Before travel	After travel	% Change
CPK(U/ml)	5,43	7,05	30
Creatinin (mg/dl)	0,83	0,87	5
Lactic Acid (mg/dl)	11,36	13,54	19
Cortisol (µg/dl)	15,67	12,41	21
ESR(mm/h)	5,25	8,13	55

Según las encuestas realizadas en los ensayos llevados a cabo por la SCNF (Clément y Mirot 2005) el reparto por zonas de los dolores experimentados por los maquinistas como se observa en Figura 3.2.5 se concentra en el cuello hombro y la zona lumbar de la espalda.

cartographie des douleurs et vibrations	Raideur/tension	Picotelements	engourdissements	total
1) Nuque	7	1	1	9
2) Epaule gauche	2	1	1	4
3) Epaule droite	1	0	0	1
4) Bras et avant bras gauches	0	1	0	1
5) Bras et avant bras drois	0	0	1	1
6) Haut du dos	3	0	1	4
7) Main et/ou poignet gauche	1	1	0	2
8) Main et/ou poignet droit	0	0	1	1
9) Bas du dos	7	0	2	9
10) assise	1	1	2	4
11) haut de la cuisse	2	0	1	3
12) bas de la cuisse	0	0	1	1
13) pied	0	1	1	2
14) Yeux	0	0	0	0
15) Tête	1	0	0	1

tableau 10 : répartition des douleurs ressenties par les agents de conduite à la fin de leur journée de travail.

Figura 3.2.5. Reparto de la zona de dolores en los conductores.(Clément y Mirot 2005)

En una encuesta realizada a 200 individuos en busca de enfermedades musculoesqueléticas (de la espalda, cuello, tendones etc...) las condiciones de trabajo y de ergonomía el estrés psicológico los resultados

indicaban que las quejas sobre el dolor de espalda, cuello y hombros eran el doble que para el caso del grupo de control (E. Johanning et al. 2002)

La conclusión es que, aunque en los entornos ferroviarios las vibraciones son menores que en otros entornos, parece que, si producen un cierto aumento de las patologías comparados con otros grupos de control, aunque los resultados no son concluyentes.

Hay que tener en cuenta que en estos estudios se han valorado todo tipo de conductores y vehículos, incluso aquellos de diseño antigua y con un mantenimiento lejos del óptimo.

Parece necesario realizar un control de las vibraciones para evitar la aparición de esta patología aplicando las medidas necesarias para reducir el nivel de vibraciones al que está expuesto un conductor de vehículos ferroviarios. Dado los distintos tipos de vehículos y vías por las que estos circulan, los efectos de las vibraciones son muy variables entre unos estudios y otros. La patología más común es el dolor lumbar, ya que el resto de patologías se dan a niveles más agresivos de la vibración.

En Estados Unidos existe jurisprudencia en la que la justicia ha condenado a pagar fuertes sumas a la empresa por lesiones espinales debido a largas exposiciones a las vibraciones de los conductores de vehículos ferroviarios. (Sullivan 2009; Andres 2017)

3.2.3 Estudios sobre la influencia de las vibraciones en el desarrollo de tareas en vehículos ferroviarios.

Las vibraciones pueden deteriorar la adquisición de información (p. ej., por los ojos), la salida de información (p. ej., mediante movimientos de las manos o de los pies) o los procesos centrales complejos que relacionan la entrada con la salida (p. ej., aprendizaje, memoria, toma de decisiones). Los mayores efectos de las vibraciones de cuerpo completo se producen en los procesos de entrada (principalmente la visión) y en los de salida (principalmente el control continuo de las manos).

Los efectos de las vibraciones sobre la visión y el control manual están causados principalmente por el movimiento de la parte del cuerpo afectada (es decir, el ojo o la mano). Dichos efectos pueden aminorarse reduciendo la transmisión de vibraciones al ojo o a la mano, o haciendo que la tarea esté menos sujeta a alteraciones (p. ej., aumentando el tamaño de una pantalla o reduciendo la sensibilidad de un mando). Con frecuencia, los efectos de las vibraciones sobre la visión y el control manual pueden reducirse considerablemente diseñando de nuevo la tarea.

Según parece, a las tareas cognitivas simples (p. ej., el tiempo de reacción simple) no les afectan las vibraciones, a diferencia de lo que ocurre con los cambios de excitación o motivación o con los efectos directos en los procesos de entrada y salida de información. (Akerstedt 1999)

Lo mismo puede ocurrir con algunas tareas cognitivas complejas. Sin embargo, la escasez y diversidad de los estudios experimentales no excluye la posibilidad de efectos cognitivos reales y significativos de las vibraciones (Schust, Blüthner, y Seidel 2006). Las vibraciones pueden influir en la fatiga, pero hay poca evidencia científica relevante y ninguna que apoye la forma compleja del “límite de la capacidad reducida por fatiga” propuesto en la versión antigua de la norma 2631 (ISO 1974, 1985).

El objetivo del conductor es el de transportar los pasajeros y mercancías en las mejores condiciones de seguridad, tiempo y confort. Estos objetivos pueden ser trasladados a los de tener cuidado de una circulación segura, respetar los horarios y llevar una conducción económica.

Las actividades llevadas a cabo por un conductor de vehículos ferroviarios se pueden enmarcar dentro de tres grandes dominios:

- Captación de información: de la vía fundamentalmente, de las señales instaladas en la vía, o de los sistemas de información instalados en la locomotora (señalización, diagnosis etc.)

- Deducir las acciones a realizar (reflexión).
- Llevar a cabo estas acciones (como norma general en el manejo del acelerador o freno, accionamiento de botones o del sistema de diagnosis).
- Comunicaciones con el puesto de mando, el jefe de tren y la tripulación o los pasajeros.

Según la secuencia podría dividirse las tareas en:

- Comprobaciones y puesta en servicio de la máquina de conducción.
- La actividad de conducción propiamente dicha.
- El apagado, bloqueo y cierre de la máquina.

La tarea de conducción propiamente dicha consiste en controlar el desplazamiento del tren o locomotora accionando los elementos que permiten acelerar o frenar., respetando la señalización y controlando mediante los sistemas de diagnosis lo que sucede en el vehículo. También se debe tener en cuenta en Europa el accionamiento del sistema hombre muerto.

Dependiendo del sistema de señalización, el conductor debe reconocer alguna de las señales accionando señales. (KVB, ERTMS, y ASFA).

Puede darse el caso también que se tenga que cambiar de pantógrafo sobre la marcha mediante el accionamiento de varios de los botones disponibles en el pupitre, o la apertura de disyuntor al paso por zonas neutras. Por último, puede utilizar la radio para comunicarse con el puesto de mando o utilizar alguna de las 2 bocinas.

La información necesaria para conducir la recibe por un lado de la vía (semáforos, punto kilométrico, indicación de zona peligrosa) por otro lado de su propia percepción (de la velocidad, de los movimientos de la locomotora) y por último de los indicadores de control y sistema de diagnosis del vehículo (velocímetro, señalización de freno, voltímetros etc.)

En los ensayos realizados por la UIC en 1988 (UIC RP 12 B 153 1988) se estudió el efecto de la vibración en el caso de la captación de la información (vía y sistemas de diagnosis) y sobre el accionamiento de la palanca de aceleración freno reproduciendo las vibraciones existentes en las cabinas o en la cabina trasera de una locomotora.

De las pruebas realizadas con pantallas LCD no se puede concluir que se cometan más errores al interpretar datos bajo el efecto de las vibraciones (existen otros efectos predominantes) pero sí que se tarda más en reconocer las cifras y letras. El tiempo de reacción está relacionado con el valor R.M.S.

Como resumen para una aceleración R.M.S. de 0.4 m/s^2 aumenta el tiempo de lectura entre un 8-10% independientemente de la duración de la vibración.

En los ensayos destinados a determinar la influencia de las vibraciones sobre el accionamiento de elementos de la cabina, se midió la reacción sobre la palanca eléctrica de las locomotoras eléctricas de la DB comprobando la precisión de la regulación. Se estudió la posición de las manos si estaban apoyadas sobre el pupitre o libres sin apoyarse en nada.

En este caso la dispersión de los resultados tampoco permite sacar conclusiones, aunque como en el caso anterior parece que existe un mayor retardo en la respuesta de la conducción cuanto mayor es el nivel vibratorio.

Dentro del proyecto VIBSEAT se realizaron ensayos sobre las locomotoras eléctricas BB22200, BB2600 por parte de la SCNF (Clément y Mirot 2005) para determinar la influencia de la aceleración y desplazamientos laterales sobre la capacidad de controlar el vehículo del conductor, desarrollando un protocolo para las pruebas en simuladores de cabina (SIMUFER) y asientos con suspensión.

Cuando se instala un asiento con suspensión debe haber un compromiso entre la absorción de las vibraciones laterales por parte del asiento y el desplazamiento permitido que garantice que el conductor pueda desarrollar sus actividades.

Las hipótesis demostradas indicaban que las aceleraciones laterales deterioran las actividades de control del conductor ya que:

- Son una fuente de falta de confort que conducen a numerosos movimientos por parte del conductor para buscar una posición más cómoda.
- Deteriora la calidad de las tareas que requieren una realización precisa (accionamiento de palancas o botones,). Suponen una carga mental y física adicional para el conductor.
- Interfieren con el proceso de adquisición de datos retrasándolo, especialmente cuando se requiere una visualización precisa.

Sometiendo a varios conductores a distintos niveles de vibraciones con la suspensión activada o desactivada, circulaban por recorridos simulados con ciertos eventos. Uno de los factores más importantes resultado ser el hecho de conocer la línea por la que se circula. Los conductores estimaban que es mucho más cansado conducir en el caso en el que la suspensión estaba bloqueada. (Véase la Figura 3.2.6).

Figura 3.2.6. Localización de la falta de confort (Clément y Mirot 2005).

Se puede observar que cuando la suspensión está bloqueada (escenario 3) la falta de confort es más notoria en el tronco que en la parte inferior del cuerpo. Si no existe suspensión lateral y el asiento está libre, se pueden producir grandes desplazamientos lo produce una falta de confort en la parte de las piernas, muslos y pies.

Según las entrevistas realizadas después de los ensayos las respuestas de los maquinistas (véase Tabla 3-25) cuantificando la dificultad de cada tarea y comparándola con la de entrenamiento entre 1 (sin dificultad) y 4 (difícil), de lo que se deduce que en el escenario 3, con la suspensión bloqueada, el desarrollo de las tareas empeora notablemente.

Para el caso de la visualización de los monitores interiores la Figura 3.2.7 indica que lo más difícil de leer son los velocímetros, voltímetros y el plan de horario del tren (en algunos casos los conductores se inclinan para leer estos valores).

Para el caso de la visualización de la monitorización exterior también parece que el asiento sin suspensión transversal posee una peor puntuación, aunque los conductores estimaban que en la conducción en el simulador la percepción de las distancias es peor (véase la Figura 3.2.8).

En este caso, dependiendo del tipo de escenario una de las tareas puede ser realizadas con mayor o menor dificultad, pero no existe un escenario peor que otro, ya que los asientos con suspensión presentan mayores movimientos que los asientos fijos.

Para corroborar estos datos parece necesario realizar ensayos en locomotoras reales y no en un simulador. Parece que la situación ideal es la del asiento con la suspensión activada, aunque no posee el menor R.M.S. en desplazamientos ni en aceleraciones, pero es el mejor compromiso.

Tabla 3-25 Nivel de dificultad de las tareas de conducción según los escenarios (Clément y Mirot 2005).

	Type of task	Scenario 1 (free)	Scenario 2 (damped)	Scenario 3 (locked)	Maximum theoretical (4*9 sujets)
Interior visual monitoring	Train schedule sheet reading	24	22	32	36
	Brake manometers	16	13	21	36
	Clock	16	13	18	36
	KVB indicator	11	12	15	36
	Speed indicator	25	20	33	36
	Motors ammeters & lines voltmeters	25	20	33	36
External visual monitoring	Signalisation lights	16	14	20	36
	Kilometric point	13	12	18	36
	Other obstacles	13	11	17	36
	Hold/ push feet DSD	26	13	19	36
Gestures and actions	Radio pad handing	26	18	30	36
	Traction control handing	10	9	14	36
	Brake control handing	11	9	12	36
	Horn handing	12	9	13	36
	Pantograph/tension selector handing	9	9	11	36
	Levers box handing	20	20	32	36
	Push button handing	14	14	20	36
	Total per scenario	287	238	358	612

Nivel de dificultad de varias tareas en relación a la visualización de los monitores interiores

Nivel de dificultad de varias tareas en relación a la visualización de los monitores exteriores

Figura 3.2.7 Nivel de dificultad de varias tareas en relación con la visualización de los monitores interiores y exteriores (Clément y Mirot 2005).

Figura 3.2.8. Nivel de dificultad de varias tareas en función de las posturas y acciones (Clément y Mirot 2005).

Existen otros estudios que han determinado la influencia de las vibraciones en el desarrollo de las actividades de los pasajeros (leer, escribir, comer, trabajar con un portátil) cuyas conclusiones podrían ser aplicables a los conductores (Nakagawa y Suzuki 2005; Sundström 2007; Ågren y Westberg 2002). Se demuestra que los picos de aceleración lateral se encuentran entre los 1 a 2 Hz. Las vibraciones estacionarias son las que causan mayores problemas a la hora de desarrollar actividades, aunque presenten menores amplitudes. Los filtros actuales utilizados en la normativa ISO y EN infravaloran el efecto de las vibraciones en el rango entre 2 y 5 Hz. Para obtener una mejor valoración del confort de actividades sería necesario modificar los filtros laterales ponderando más las vibraciones alrededor de los 3 Hz. (véase la Figura 3.2.9).

Figura 3.2.9. Nivel iso-dificultad para realizar tareas y funciones de transferencia para leer en un portátil y escribir (Harrell 1990).

3.2.4 Estudios sobre la influencia de las vibraciones en la salud de conductores de vehículos ferroviarios.

En este apartado se revisan los resultados obtenidos en distintos estudios, ensayos y medidas realizados en vehículos ferroviarios, tanto en el suelo de la cabina como en los asientos.

3.2.4.1 Valores medidos en Europa.

La UIC realizó numerosos estudios en los años 80 (UIC B 153 RP 5, 1985.; UIC RP 16 B 153 1988) para establecer la validez de la norma ISO 2631-1. Todos estos estudios se realizaron basándose en la versión de la ISO de 1978, pero la conclusión de estos estudios dio lugar a la ficha UIC 513 específica para la evaluación del confort en el ferrocarril que posteriormente ha dado lugar a la EN 12299. En estos estudios se

realizaron medidas para comprobar la validez de la normativa para valorar los efectos de las vibraciones sobre la salud y el desarrollo de tareas en la conducción.

Los ensayos realizados se llevaron a cabo sobre 4 tipos de vehículos diferentes (tren rápido de pasajeros, tren de mercancías, trenes suburbanos, y metro según la Tabla 3-26) en 6 redes a distintas condiciones de explotación en las cabinas de conducción. Se registraron entre 4 y 5 horas.

Tabla 3-26. Características de los ensayos realizados en Francia (UIC B 153 RP 18:1989-09).

	Tipo de tren	Velocidad	Estado de la vía	Rail	Duración
Ensayo 1	Tren de viajeros Locomotora Co-Co	200 km/h	Muy Bueno	Seco	5 h 10
Ensayo 2	Tren de mercancías Locomotora Co-Co	80 km/h	Muy Bueno	Seco parcial	4 h 50
Ensayo 4	Tren de suburbano Locomotora Bo-Bo	120 km/h	Bueno	Seco parcial	4 h 30
Ensayo 4	Tren de suburbano Locomotora Bo-Bo	120 km/h	Bueno	Seco parcial	4 h 30

Se calcularon los valores eficaces, valores eficaces ponderados según la ISO 2631, y el valor RMQ ponderado de Griffin (similar al VDV definido en la normativa). Los resultados finales muestran que esta diferencia de tratamiento de las señales no afecta a las conclusiones de estas pruebas.

Los resultados de la dosis de vibración definida en la norma ISO 2631-1 (límite 50.00) se observan en la Tabla 3-27.

Tabla 3-27. Dosis de vibración según la ISO 2631-1 (UIC RP 17 B 153 1989).

Dirección		DV _x	DV _y	DV _z	DV Total	Duración
Línea 1	Test 1	1	106	5587	5694	+ de 5 h 00
	Test 2		61	456	517	4h 50
	Test 3		115	2090	2205	4h 30
	Test 4	5	15	479	499	4h 30
Línea 2	Test 1	466	302	1547	2315	1h 00
	Test 2	79	15	92	186	1h 00
	Test 3	755	122	190	1067	1h 40
Línea 3	Test 1	2	202	1736	1940	5h 00
	Test 2	3	956	4265	5224	4h 10
	Test 3	1	182	1840	2023	4h 40
Línea 4	Test 1	1	14	112	127	1h 10
	Test 2	-	6	1174	1180	1h 50

Direction		DV _x	DV _y	DV _z Seme project	DV _{xd}	DV Total	Duree
Línea 5	Test 1 Suelo	53	3512	2723		6208	2h 00
	Asiento	50	5271	1597	290	7208	2h 00
	Test 2 Suelo	46	5046	2884		7976	2h 00
	Asiento	35	4864	1543	189	6631	2h 00
Línea 6	Test 3 Suelo	55	6944	10905		17904	4h 00
	Asiento	52	10914	9659	373	20998	4h 00

En un primer análisis se observa que la dosis de la vibración en las direcciones vertical y transversal son las más importantes. En cuanto a la aceleración longitudinal, la vibración inducida es relativamente baja e inferior a un 5% de la dosis total. En cualquier caso, la dosis es inferior a los límites establecidos en la norma.

Se sugiere utilizar la aproximación para calcular el RMQ a partir del R.M.S. y despreciar la aceleración longitudinal. Se recomienda la realización de medidas en el piso de las cabinas y utilizar la función de transferencia de los asientos determinadas en los laboratorios. Respecto a la duración de la medida recomienda realizar las mediciones en toda la jornada laboral para evitar conclusiones erróneas. (Véase Figura 3.2.10).

Diferentes R.M.S. en dirección vertical

Diferentes R.M.S. en dirección lateral

Figura 3.2.10. Medida de los valores R.M.S. según distintos criterios (UIC RP 17 B 153 1989).

También se han calculado los valores R.M.S. (véase Tabla 3-28) para los distintos ensayos obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 3-28. Niveles R.M.S. medidos en distintos ensayos en 4 líneas distintas (UIC RP 17 B 153 1989).

Filtro		0,5-40 Hz			0,5-40 Hz 150		
Accelerations		X	Y	Z	X	Y	Z
Línea 1	Test 1	.18	.22	.88	.06	.15	.34
	Test 2	.09	.25	.27	.03	.11	.20
	Test 3		.25	.38		.13	.30
	Test 4	.09	.13	.28	.07	.11	.17
Línea 2	Test 1	.33	.37	.55	.22	.35	.36
	Test 2	.28	.28	.27	.10	.19	.16
	Test 3	.30	.23	.27	.17	.19	.16
Línea 3	Test 1	.15	.29	.39	.06	.23	.29
	Test 2	.14	.40	.52	.07	.37	.41
Línea 4	Test 3	.10	.26	.39	.04	.24	.30
	Test 1	.11	.18	.28	.05	.12	.19
	Test 2	-	.13	.39	-	.08	.29

Tabla 3-29b. Niveles R.M.S. medidos en distintos ensayos en 4 líneas distintas (UIC RP 17 B 153 1989).

Filter 0,5 a 40 Hz			Sin ponderation			con ponderation		
Axe			X	Y	Z	X	Y	Z
Línea 1	Test 1	Moyenne	.17	.21	.84	.04	.14	.33
		Ecart-type	.04	.08	.15	.02	.08	.13
		Maxium	.30	.60	1.50	.16	.54	.94
	Test 2	Moyenne	.69	.24	.24	.03	.11	.18
		Ecart-type	.03	.10	.15	.02	.05	.10
		Maxium	.22	.66	1.24	.14	.34	.82
	Test 3	Moyenne	.11	.22	.34	.06	.10	.25
		Ecart-type	.13	.12	.18	.16	.08	.15
		Maxium	1.74	.84	1.12	1.96	.60	.88
	Test 4	Moyenne	.07	.11	.23	.04	.08	.14
		Ecart-type	.06	.08	.15	.06	.07	.09
		Maxium	.72	.68	1.00	.64	.68	.58
Línea 2	Test 1	Moyenne	.23	.32	.49	.15	.29	.31
		Ecart-type	.24	.19	.25	.17	.18	.19
		Maxium	1.18	.88	1.53	.30	.88	1.03
	Test 2	Moyenne	.27	.27	.25	.09	.17	.17
		Ecart-type	.08	.08	.08	.05	.07	.06
		Maxium	.63	.58	.53	.43	.48	.38
	Test 3	Moyenne	.26	.21	.24	.13	.17	.14
		Ecart-type	.15	.09	.12	.10	.09	.08
		Maxium	.88	.73	.78	.73	.68	.48

Por último, la variación de la dosis con el tiempo se representa en la Figura 3.2.11.

En los ensayos de la SCNF (Clément 2003) para el proyecto VIBSEAT se utilizaron las normas francesas NF E 90 401-2, y la UIC 513 para valorar las aceleraciones. Las mediciones se realizaron sobre las locomotoras BB 8700 en el tramo entre CHAMBÉRY – MODANE con una calidad media de vía como se indica en la Tabla 3-30.

Figura 3.2.11. Variación de la dosis de vibración según el tiempo de exposición (UIC RP 17 B 153 1989).

Tabla 3-30. Calidad de las vías utilizadas en los ensayos de la SCNF (Clément 2003).

Journey	Appendix	Levelling		Lining		Qualifications
		QN1	QN2	QN1	QN2	
CHAMBERY-SJM	3/ f1 to 4	7,5%	3,7%	2,6%	0,8%	Good
SJM-MODANE	3/f5 et 6	17%	7,7%	7%	2,3%	Medium
MODANE-SJM	3/f7 et 8	3,1%	1,5%	1,5%	0,8%	Good
SJM-CHAMBERY	3/ f9 to 12	3,4%	1,7%	2,9%	0,9	Good

Journey	Appendix	Levelling		Lining		Qualifications
		QN1	QN2	QN1	QN2	
EPERNAY-REIMS	4 F1	16,2%	7,5%	3,5%	0,9%	MEDIUM
REMIS-RETHEL	4 F2	13,5%	4,6%	2,7%	1,8%	MEDIUM
RETHEL-REIMS	4 F3	33,8%	6,6%	4,8%	1,8%	MEDIUM

Las medidas realizadas demuestran un peor comportamiento en la aceleración vertical que en las aceleraciones horizontales siendo el confort para el maquinista relativamente malo.

Zone number	NVD(floor)	NVA(seat)	Appendix sheet nº(standing/seated)
Zone 1	3,6	7,2	17/21
Zone 2	1,9	3,4	18/22
Zone 3	2,6	5,1	20/24

Figura 3.2.12. Valoración del confort del maquinista (Clément 2003).

En los ensayos repetidos en 2005 en la vía ÉPERNAY to RETHEL (Clément 2005a) con las locomotoras BB 17000 y BB 17094 con un asiento GRAMMER "DRIVER SEAT MSG 95AL/741 con suspensión 3D con y sin optimizar neumáticamente en la dirección vertical y con suspensión mecánica en las direcciones horizontales mostraron que el confort para el conductor según la UIC 513 sigue siendo relativamente bajo (véase Figura 3.2.13).

Run n° 1 : Épernay - Rethel				
Speed: 100 km/h				
Zone n°	PK	N _{VD}	N _{VA}	Appendix n° (standing / seated)
Zone 1	162,1 to 170	4,0	8,0	5-1 / 5-2
Zone 2	66 to 73,4	3,6	8,1	5-6 / 5-7
Zone 3	73,5 to 81	3,6	7,6	5-11 / 5-12

Run n° 3 & 9 : Épernay - Rethel				
Speed: 100 km/h				
Zone n°	PK	N _{VD}	N _{VA}	Appendix n° (standing / seated)
Zone 1	143.2 to 161	3.9	6.8	5-16 / 5-17
Zone 2	161 to 169.5	3.9	7.0	5-21 / 5-22
Zone 3	143.1 to 151.7	3.3	7.2	5-26 / 5-27
Zone 4	143.2 à 151.8	3.4	7.3	5-31 / 5-32

Figura 3.2.13. Valoración del confort del maquinista (Clément 2005a).

Ha de notarse que en este caso los resultados son peores que en los ensayos anteriores principalmente debido a que la calidad de la vía es bastante peor. Por lo que, aunque se utilicen asientos con suspensión la calidad de la vía es un parámetro más importante como causa de las vibraciones a las que está sometido el maquinista.

Para determinar la importancia de la vibración en cada uno de los e ejes se ha dividido los resultados anteriores según los tres ejes x, y, z según Tabla 3-31.

En estos ensayos la transmisibilidad medida entre el piso y los diferentes partes del asiento indica el buen aislamiento en de la suspensión vertical y el mal funcionamiento en la dirección longitudinal como se observa en la Tabla 3-32.

Tabla 3-31. Descomposición de las aceleraciones según la dirección (Clément 2005a). Asiento 2 suspensión vertical activa NVA 7.3

Parametro	Appellation complete	50 %	95%	Max.	Nmv Parcial
AVc en m/s ²	Ace vert caja	0,623	0,876	1,122	5,255
ATas en m/s ²	Ac trasnv. conductor	0,034	0,048	0,055	0,288
AVas en m/s ²	Ace vert conductor	0,035	0,045	0,050	0,270
Alas en m/s ²	Ace long conductor	0,641	1,117	1,231	6,704

Parametro	Appellation complete	50%	95%	Max.	Nmv Parcial
AVc en m/s ²	Acc vert caja	0,602	0,906	1,061	5,438
AT as en m/s ²	Ac trasnv. conductor	0,029	0,050	0,065	0,299
AVas en m/s ²	Ace vert conductor	0,078	0,133	0,148	0,795
Alas en m/s ²	Acc long conductor	0,512	0,858	0,948	5,151

Tabla 3-32. Transmisibilidad de los asientos y sus componentes.

	Susp. rigidez minina vertical			Susp. rigidez media todas dir.		
	Lateral	Vertical	Horizontal	Lateral	Vertical	Horizontal
Nmv placa / Nmv suelo	1.09	1.10	1.55	1.11	1.05	1.94
Nmv cojin / Nmv placa	1.10	0.49	1.22	0.98	0.57	0.95
Nmv conductor / nmv cojin	1.13	0.17	2.80	0.17	0.08	4.06
Nmv conductor / Nmv suelo	1.35	0.09	5.28	0.18	0.05	7.51

A priori parece existir algún error en los resultados publicados. La transmisibilidad en la dirección vertical es sorprendentemente baja y sin embargo la transmisibilidad en la dirección longitudinal es

sorprendentemente alta. Son muy diferentes a las transmisibilidades observadas en otros estudios (Nawayseh y Griffin 2005).

Respecto a la salud, los resultados más críticos provienen de las aceleraciones verticales existiendo límites de 2.2 horas que conducirían a acciones (véase Tabla 3-33).

Tabla 3-33. Límite de exposición a la vibración, y límite que da lugar a una acción (European Directive 2002/44/EC).

Test nº1 – Seat configuration 1 / HLP.Chambéry-SJM(R1A1). 80- 100 km/h

Parameter	Limit of exposure triggering the action (h)	Absolute limit of exposure (h)
Avc	4,3	69,1
Avas	16,8	>100

Test nº3 – Seat configuration 2. Chambéry-PK 200 (R3A1). 85- 95 km/h

Parameter	Limit of exposure triggering the action (h)	Absolute limit of exposure (h)
Avc	2,2	34,6
Avas	8,4	>100

Test nº6 – Seat configuration 3. PK 200—Modane (R3A4). 75- 80 km/h

Parameter	Limit of exposure triggering the action (h)	Absolute limit of exposure (h)
Avc	5,8	93,3
Avas	2,3	37,5

En estos estudios (y en general en casi todos los revisados) no se ha contemplado la posibilidad de transmitir vibraciones parasitarias a través del pedal, pero sí que podría tener su influencia sobre la salud en el sistema circulatorio o en los músculos de las piernas.

Respecto al estudio en el dominio de la frecuencia de las vibraciones, los asientos parecen filtrar muy bien las vibraciones más allá de los 3 Hz según se observa en la Figura 3.2.14. Pero se da un pico alrededor de los 2 Hz en todas las direcciones y en todas las configuraciones. En la dirección transversal la transmisibilidad es cercana a 1 y en la vertical depende de la rigidez del asiento existiendo atenuación o amplificación de la vibración dependiendo de la velocidad.

Mientras que para el caso de asientos con suspensión y su optimización el espectro en frecuencia registrado se puede deducir que los asientos reducen las vibraciones por debajo de los 10 Hz mejor que el caso anterior aunque no atenúan demasiado por encima de esta zona (por ejemplo se observa en la Figura 3.2.15 que la resonancia de la rueda a los 8 Hz y de su armónico a los 16 Hz no son amortiguados por el asiento con suspensión).

Figura 3.2.14. Análisis en frecuencia de las aceleraciones en la caja y el asiento (Clément 2003).

En los casos en los que se bloquean las suspensiones la vibración es transmitida directamente y solo el cojín es el que asegura parte del amortiguamiento de las mismas.

En los ensayos realizados por la SCNF (Clément y Mirot 2005) para determinar la ergonomía de las cabinas la distribución espectral de la aceleración lateral presenta resonancias a las frecuencias de 1 Hz, 2 Hz y 4 Hz, que se sitúan en la zona de mayor influencia sobre la salud (véanse las Figura 3.2.16 y Figura 3.2.18).

En Turquía (Birlik 2009) se han realizado mediciones sobre metros suburbanos ($n=10$ y velocidad de 30–100 km/h) y trenes intercitys ($n=5$ velocidad de 93–114 km/h). Una vez más en los trenes intercity los valores y y z son similares.

La valoración de las vibraciones se realiza de acuerdo a la ISO 2631-1 y la directiva 44/2002 en metros suburbanos, donde el maquinista conduce de pie, y en trenes intercitys donde los maquinistas conducen sentados, un número de horas superior a los anteriores. (Véase Tabla 3-34).

En este caso los valores de cresta son inferiores a 6.

Los valores en los trenes intercitys superan los límites establecidos en la directiva y en la ISO 2631-1 en la dirección vertical.

Aunque los valores se calculan para la base de 40h en Turquía los conductores pueden llegar a conducir hasta 75 h a la semana.

Figura 3.2.15. Análisis en frecuencia de las aceleraciones en la caja y el asiento para los asientos optimizados (Clément 2005a).

Power spectral density – Transversal acceleration - (m/s^2)²/Hz
 Black : floor / Red : Damper on / Green : Free (Damper removed) / Blue : Suspension locked

Power spectral density – Transversal displacement – (mm)²/Hz

Black : floor / Red : Damper on / Green : Free (Damper removed) / Blue : Suspension locked

Figura 3.2.16. Análisis en frecuencia de las aceleraciones y desplazamientos utilizada en el simulador (Clément 2005b).

Tabla 3-34. Ensayos realizados en Turquía.(Birlik 2009)

Weighted acceleration values (m/s²) (Intercity train-driver seat)					Weighted acceleration values (m/s²) (Suburban train-cabin floor)				
	1.4 a _x	1.4 a _y	a _z	a _v		1.4 a _x	1.4 a _y	a _z	a _v
Min	0.37	0.42	0.59	0.85	Min	0.01	0.18	0.13	0.23
Max	0.46	0.72	0.72	1.12	Max	0.08	0.36	0.32	0.49
Mean	0.41	0.55	0.65*	0.95	Mean	0.05	0.28*	0.23	0.36
SD	0.03	0.12	0.05	0.11	SD	0.02	0.06	0.07	0.09

Daily exposures—Intercity train (Total daily exposure=5 h)					Daily exposures—Suburban train (Total daily exposure=6 h)				
	x axis	y axis	z axis	Daily vibration exposure		x axis	y axis	z axis	Daily vibration exposure
A(8) (m/s²)	0.31	0.45	0.52	0.52	A(8) (m/s²)	0.1	0.3	0.2	0.3
eVDV (m/s ^{1.75})	9.6	14.1	15.9	15.9	eVDV (m/s ^{1.75})	1.7	8.8	7.6	8.8

Los anteriores datos indican que en estos casos es necesario un programa de vigilancia de la salud, investigando el estado de la columna vertebral de los conductores y la reducción de la jornada de trabajo o al menos de las horas extras.

En Finlandia (Sorainen y Rytkönen 1999) las medidas se realizaron sobre locomotoras eléctricas (a 140 km/h) y diésel (a 120 km/h) en los ferrocarriles finlandeses del este.

La valoración de las vibraciones se realiza de acuerdo a la norma ISO 2631-1 de 1985.

La vibración en el asiento estaba cercana al límite de fatiga con disminución de eficiencia definido en la ISO 2631-1 de 1985, en la dirección lateral en las bandas de un tercio de octava de 1 a 1.6 Hz.

3.2.4.2 *Ensayos y medidas en UK.*

Según (Evans 2004) el método VDV tiende a acentuar el efecto de los valores extremos y es menos sensible al tiempo de exposición ya que utilizar la cuarta potencia y la raíz cuarta. En UK es el método preferido, pero en el resto de Europa se utiliza el R.M.S. o A (8) ya que es más simple.

Según los estudios y las pruebas realizadas por AEA Technology (Evans 2004) siguiendo la normativa británica BS 6841 los ferrocarriles se pueden dividir en cuatro categorías:

1. Vehículos con bogies de pasajeros, incluyendo trenes autopulsados eléctricos y Diesel: la vibración en estos vehículos es improbable que alcance el valor de exposición que da lugar a una acción. Para el caso de vehículos con suspensión neumática el VDV varía entre $2.0 \text{ m/s}^{1.75}$ y $8.0 \text{ m/s}^{1.75}$, como valores extremos.
2. Railbuses de dos ejes: estos vehículos pueden sobrepasar el valor de exposición que da lugar a una acción, pero no el límite de exposición. En este caso el VDV varía entre $4.7 \text{ m/s}^{1.75}$ y $9.45 \text{ m/s}^{1.75}$ dependiendo de la ruta en la que se ha medido.
3. Locomotoras, incluyendo cabezas motrices: estos vehículos pueden sobrepasar el valor de exposición que da lugar a una acción, pero no el límite de exposición. En el caso estudiado de las locomotoras tipo clase 87 y cabezas motrices el VDV varía entre $7.3 \text{ m/s}^{1.75}$ y $15.8 \text{ m/s}^{1.75}$.
4. Maquinaria de vía: estos vehículos pueden sobrepasar el límite de exposición, por lo que se requieren asientos con suspensión para reducir la vibración. Aún en este caso puede que se sobrepase el valor que da lugar a una acción. En este caso el VDV varía entre $6.5 \text{ m/s}^{1.75}$ y $12.9 \text{ m/s}^{1.75}$ para el caso de los asientos y $13.4 \text{ m/s}^{1.75}$ y $27.6 \text{ m/s}^{1.75}$ a nivel de suelo. En este caso es de notar el buen grado de aislamiento de los asientos con suspensión.

De lo anteriormente expuesto se deduce que los vehículos de las categorías 2 a 4 debería ser sometidos a un análisis de riesgos con las conclusiones necesarias para reducir el impacto de las vibraciones en la salud (métodos de trabajos alternativos, mejoras en los vehículos –asientos con suspensión, mejoras en la suspensión de los vehículos- o limitación de la duración a la exposición a la vibración).

El grupo de normalización ferroviaria inglés “GM/RT2160 - Issue 3 Ride Vibration and Noise Environment inside Railway Vehicles” reduce el límite VDV a $15 \text{ m/s}^{1.75}$ que está entre los límites ELV y EAV de la directiva.

Teniendo en cuenta las diferencias entre el método de valoración de la directiva (equivalente al ISO 2631-1) y los utilizados en el ferrocarril en gran Bretaña se puede concluir que:

- las aceleraciones verticales serán un 10-20% mayor debido al uso de distintos filtros,
- Para ferrocarril en vía de no muy alta calidad (ratio 3:2 entre aceleraciones verticales y laterales) se obtendrán valores VDV similares,
- Cuando predominen las aceleraciones laterales, estas serán un 40% mayor debido al factor multiplicador de 1.4.

Para comparar si es más restrictivo el valor VDV o el A(8) AEA Technology realizó medidas sobre un vehículo CWR y una vía con juntas obteniendo (véase Tabla 3-35).

Por lo que la conclusión sería que es más recomendable utilizar el método VDV para el valor que lleva a una acción y el A(8) para el límite total de la exposición a las vibraciones. Sin embargo, teniendo en cuenta los problemas de armonización con el resto de Europa podría ser preferible el método A(8) para ambos límites.

Las vibraciones son importantes en todos los ejes, y aunque las mayores vibraciones se dan en el eje vertical también son importantes las vibraciones en el eje lateral. Las vibraciones en los vehículos ferroviarios

dependen del vehículo (suspensión) y del estado de la vía (lo cual no depende del operador y sí de la ruta que se esté explotando) (Evans 2004).

Tabla 3-35. Medidas según los ensayos de AEA Technology. (Evans 2004)

Time to reach limit	VDV	A(8)
Exposure Limit Value	10.1 hours	11.4 hours
Group Standard	2.6 hours	n/a
Exposure Action Value	0.4 hours	2.2 hours

Los conductores en UK tienen unas jornadas de trabajo variables, que según el caso pueden ser desde unas 30 horas a 60 horas a la semana conduciendo. (Según otros estudios conducen entre el 31% y el 51% de la jornada de trabajo que puede variar entre las 4 y las 12 horas). La recomendación de realizar medidas durante una hora o tramos de 5 minutos no parece adecuada para valorar las valoraciones a lo largo de toda una ruta. Las vibraciones de mano brazo se dan principalmente en maquinaria de vía y vehículos de mantenimiento, siendo despreciables las vibraciones para los conductores de locomotoras y trenes.

3.2.4.3 Ensayos realizados en Norteamérica

En los estudios realizados en USA en 22 locomotoras siguiendo la ISO 2631-1 (1997) los valores obtenidos se pueden resumir en la Tabla 3-36 (Johanning, Landsbergis, et al. 2006).

Estos estudios demuestran el alto contenido de impactos, en todas las direcciones. La vibración en la dirección lateral es comparable a las verticales en contraposición con los vehículos de maquinaria. Los asientos no parecen adecuados para reducir las vibraciones, incluso los de nuevo diseño.

En otros estudios del mismo autor se llega a conclusiones similares ya que aunque los datos varían se mantienen las mismas proporciones (Johanning et al. 2002) (véase Tabla 3-37).

Tabla 3-36. Valores medidos según los ensayos (Johanning, Landsbergis, et al. 2006).

Valores R.M.S.				
Axis	X	Y	Z	Vector sum
(n)	51	51	51	51
Mean	0.14	0.22	0.28	
Min	0.05	0.05	0.09	0.13
Max	0.72	0.71	0.50	1.44
SD	0.14	0.12	0.08	0.22
Mode	0.07	0.14	0.32	N/A

Indicadores de impacto (según ISO 2631-1)

Crest Factor			MTVV/a _w			VDV/a _w T ^{1/4}		
X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
15.95	10.91	14.42	7.37	6.12	5.59			
6.60	3.80	6.30	3.20	2.90	2.10	1.44	1.44	1.44
67.26	28.07	45.74	26.16	14.38	10.29	4.27	2.48	2.09
11.39	4.94	7.03	4.15	2.11	1.75			
7.90	8.30	9.30	4.70	N/A	4.40			

Tabla 3-37. Valores medidos en 50 locomotoras en USA (Johanning et al. 2002).

Test No./Axis	Seat Level(a _w)			Vector Sum	Seat Mounting Point(a _w)			SEAT ^A			Crest Factor			MTVV/aw			VDV/awT1/4		
	X	Y	Z		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
1	0.13	0.15	0.32	0.42	0.12	0.18	0.37	1.3	1.1	0.9	13.8	12.1	14.9	7.1	6.7	7.03			
2	0.15	0.23	0.5	0.63	0.18	0.18	0.32	1.5	0.8	1.6	8.1	7.4	15.1	5.3	7.7	7.1			
3	0.07	0.14	0.16	0.27	0.05	0.11	0.18	1.1	1.3	0.9	9.4	11.2	9.6	4	5.7	3.3	1.42	1.53	1.42
4	0.21	0.24	0.25	0.51	0.12	0.18	0.27	1.8	1.3	0.9	7.9	6.9	9.4	4.3	5.3	3.9			
5	0.13	0.24	0.38	0.54	0.13	0.2	0.27	1.3	1.2	1.1	8.9	7.6	5.6	3.8	4.1	4.6	1.32	1.33	1.38
6	0.12	0.3	0.1	0.61	0.07	0.26	0.34	1.2	1.2	0.8	8.5	6.5	9.5	3.2	4.6	4.3			
7	0.19	0.17	0.4	0.54	0.14	0.14	0.35	1.9	1.2	1.1	11.9	8.5	11.7	5.3	5.2	5.6	1.91	1.51	1.79
8	0.11	0.37	0.31	0.62	0.16	0.3	0.34	1.1	1.0	0.9	7.9	5.2	7.0	4.1	3.8	3.2	1.56	1.38	1.41
9	0.39	0.53	0.36	0.99			0.32			1.1	17.1	8.3	9.3	10.7	4.4	4			
10	0.14	0.34	0.25	0.56	0.09	0.3	0.28	1.1	1.1	0.9	6.7	3.8	7.4	3.5	2.9	3.6	1.52	1.37	1.44
11	0.43	0.51	0.29	0.98			0.3			1.0	10.5	7.8	10.6	5.4	4.8	5.5			
12	0.12	0.39	0.32	0.65	0.12	0.36	0.33	1.2	1.1	1.1	6.6	4.0	6.3	4.2	3.6	3.5	1.52	1.38	1.45
13	0.72	0.71	0.26	1.44							7.9	5.6	11.2	4.4	3.9	4.6			
14	0.08	0.14	0.14	0.27	0.06	0.12	0.23	1.3	1.2	0.6	9.9	8.3	7.9	5.6	5	4	2.3	1.61	1.48
15	0.25	0.26	0.3	0.55			0.21			1.1	14.5	11.4	9.8	8.3	7.6	4.4			
16	0.1	0.22	0.3	0.45	0.06	0.2	0.34	1.7	1.1	0.9	7.9	6.4	7.2	4.7	4.5	4.2			
17	0.07	0.18	0.24	0.36	0.07	0.15	0.23	1.0	1.2	1.1	7.3	5.4	8.4	3.6	4.9	3.7	1.6	1.63	1.57
18	0.07	0.23	0.39	0.55	0.06	0.19	0.43	1.3	1.2	0.9	11.7	8.9	13.1	6.0	4.7	5.4	1.54	1.57	1.63
19	0.11	0.11	0.3	0.46	0.11	0.1	0.33	1.1	1.1	1.1	15.1	17.0	17.6	5.8	6.8	5.2	1.73	1.69	1.86
20	0.08	0.2	0.3	0.47	0.06	0.18	0.32	1.2	1.2	1.1	10.7	8.5	11.7	6.8	5.1	5.2	1.72	1.47	1.71
21	0.11	0.23	0.4	0.54	0.06	0.2	0.54	1.1	1.1	0.9	9.4	9.9	11.7	4.4	5.0	4.8	1.44	1.57	1.61
22	0.12	0.18	0.38	0.51							9.9	12.5	20.1	5.5	6.2	8.6	1.62	1.74	1.75
Mean	0.18	0.28	0.32	0.59	0.08	0.2	0.31	1.4	1.2	1.1	10.1	8.3	10.7	5.2	5.1	4.8			
Median	0.12	0.2	0.3	0.54	0.09	0.18	0.32	1.3	1.2	1.1	9.4	8.1	9.7	5	4.9	4.5			
Mode	0.07	0.23	0.25	NA	0.13	0.18	0.32	1.3	1.2	0.9	7.9	8.3	11.7	5.3	NA	4			
Minimum	0.07	0.14	0.14	0.27	0.05	0.1	0.18	1.0	0.8	0.6	6.6	3.8	5.6	3.2	2.9	3.2	1.32	1.33	1.38
Maximum	0.72	0.71	0.5	1.44	0.12	0.36	0.54	1.9	1.3	1.1	17.2	17.0	20.1	10.7	7.7	8.6	2.3	1.7	1.85
SD	0.15	0.14	0.09	0.26	0.02	0.08	0.08	0.3	0.1	0.2	2.8	3.1	3.7	1.76	1.25	1.36			

La densidad espectral de las medidas realizadas se muestra en la Figura 3.2.17 así como la función SEAT del asiento dotado con suspensión.

Figura 3.2.17. Densidad espectral y Factor SEAT (Johanning et al. 2002).

En (Larson, Raasch, y Pierce 2006) se realizaron medidas en 23 locomotoras siguiendo las indicaciones de la ISO 2631-1 (1997) y en 11 de ellas se realizaron medidas en 23 puntos de los asientos circulando por diferentes rutas. En la Figura 3.2.18 se resumen los resultados frente los límites establecidos en la ISO 2631.

Figura 3.2.18. Medidas de vibración frente a límites ISO 2631 (Larson, Raasch, y Pierce 2006).

En cualquiera de las locomotoras analizadas el nivel vibratorio está por debajo de los límites establecidos y son comparables a los de vehículos de carretera. En estas mediciones los valores VDV variaban entre $4.6 \text{ m/s}^{1.75}$ y $6.1 \text{ m/s}^{1.75}$ lo que supone estar por debajo de los límites de la ISO 2631-1, las directivas europeas ($9.1 \text{ m/s}^{1.75}$ y $21 \text{ m/s}^{1.75}$) la BS 6841 ($15 \text{ m/s}^{1.75}$) para los impactos múltiples. (Larson 2006)

En (Johanning, Fischer, et al. 2006) realizando 50 medidas sobre 20 locomotoras se ha llegado a la misma conclusión, pero indica que otros datos y experiencias sugieren una infraestimación del problema si se tiene en cuenta este factor (véase Tabla 3-38). En este caso los valores obtenidos son utilizando la ISO 2631-1 (1997) y la ISO 2631-5. Como se puede observar se excede en algunos casos los valores indicados en la ISO 2631-1.

En las mediciones realizadas en 19 locomotoras de mercancías (Cooperrider y Gordon 2008) que transitan en corredores entre California y nueva York con una velocidad media 21 y 54 mph y turnos entre 187 y 497 minutos, el valor VDV variaba entre 2.68 y $9.33 \text{ m/s}^{1.75}$. En todos los casos (excepto uno) los valores verticales eran superiores a los laterales. La dosis estática de compresión estática diaria equivalente variaba de 0.123 y 0.434 MPa., mientras que el límite está en 0.5 MPa. En la Figura 3.2.19 se muestra los valores VDV y S_{ed} de las 19 medidas. Se observa una cierta linealidad. Mientras el valor S_{ed} se encuentra por debajo de los límites establecidos en la normativa, el VDV lo supera en ciertas ocasiones.

Tabla 3-38. Valores medidos en 20 locomotoras en USA (Johanning, Fischer, et al. 2006).

	X	Y	Z
Aw (R.M.S.)	0,07-0,19	0.13-0,4	0,14-0,5
Vector suma		0,27-0,65	
MTVV/aw	3.2-7.6,	2.9- 9.4	3.3-10
VDV/(aw · T ^{1/4})	1.44-2.3	1.37-1.71	1.44-1.94
Sed		0.11 to 0.79,(media 0.32)	
R-factor		0.12 to 0.92 (media 34)

Figura 3.2.19. Valores VDV y SED (Cooperrider y Gordon 2008).

En los ensayos realizados en el Metro de Montreal por el IRSST (P.-E. Boileau et al. 2005) originado por las quejas de los conductores las frecuencias fundamentales se encuentran en el entorno de los 6 Hz y alrededor de frecuencia vertical de la caja a 2.1 Hz. Según se observa en Tabla 3-39 y en la Tabla 3-40 el nivel vibratorio aumenta considerablemente con el aumento de la ovalización de las ruedas por el bajo mantenimiento. Por encima de los 60 km / h se excita un modo de vibración del bogie que empeora todavía más las vibraciones globales medidas.

En la Tabla 3-40 se puede mostrar la variabilidad de las señales, de distintos vehículos circulando por la misma vía pero con distintas condiciones de servicios. En el mismo punto la aceleración eficaz ponderada puede variar entre 0.35 y 0.92 m/s² Aunque los puntos críticos suelen serlo para todos los vehículos.

Por otro lado, para un mismo vehículo la variación dentro de la misma línea puede ir de los 1.107 a los 0.352, por lo que se deduce que dependiendo de qué tramo se utilice para la evaluación podría encontrarse dentro o fuera de los límites establecidos en la normativa (véase Figura 3.2.20).

Tabla 3-39. Medidas de aceleraciones en las líneas de Metro de Montreal sobre las locomotoras MR 63 y MR73(P.-E. Boileau et al. 2005).

Linea/ motriz	Aw(ms ⁻²)							SEAT
	x-asiento	y-asiento	z-asiento	x-suelo	y-suelo	z-suelo	x-respaldo	
Linea 1								
MR63-1a	0,09±0,01	0,19±0,02	0,44±0,07	0,06±0,02	0,16±0,02	0,37±0,06	0,26±0,04	1,19
MR63-1b	0,09±0,01	0,17±0,02	0,54±0,14	0,07±0,01	0,16±0,02	0,51±0,14	0,34±0,07	1,06
MR73-1a	0,08±0,01	0,19±0,02	0,40±0,03	0,06±0,01	0,17±0,02	0,38±0,03	0,16±0,02	1,05
MR73-1b	0,08±0,01	0,19±0,02	0,43±0,04	0,06±0,01	0,17±0,02	0,40±0,03	0,18±0,02	1,08
Linea 2								
MR63-1a	0,08±0,01	0,18±0,02	0,42±0,08			0,35±0,07	0,27±0,04	1,20
MR63-1b	0,09±0,01	0,18±0,02	0,54±0,14			0,50±0,16	0,32±0,07	1,08
MR73-1a	0,08±0,02	0,18±0,02	0,39±0,04			0,38±0,04	0,17±0,04	1,03
MR73-1b	0,07±0,01	0,17±0,02	0,41±0,04			0,39±0,04	0,17±0,02	1,05
Linea 4								
MR63-1a	0,11±0,007	0,19±0,02	0,51±0,03	0,09±0,004	0,17±0,02	0,45±0,04	0,30±0,03	1,13
MR63-1b	0,11±0,004	0,18±0,02	0,74±0,10	0,09±0,002	0,17±0,02	0,74±0,14	0,39±0,03	1,0
MR73-1a	0,08±0,006	0,20±0,03	0,45±0,03	0,06±0,004	0,18±0,03	0,43±0,03	0,16±0,01	1,05
MR73-1b	0,08±0,01	0,19±0,03	0,45±0,03	0,06±0,01	0,17±0,04	0,43±0,03	0,16±0,01	1,05
Linea 5								
MR63-1a	0,08±0,01	0,16±0,02	0,38±0,08			0,34±0,08	0,26±0,04	1,12
MR63-1b	0,09±0,01	0,16±0,02	0,50±0,14			0,50±0,16	0,29±0,06	1,0
MR73-1a	0,08±0,01	0,17±0,01	0,37±0,04			0,34±0,04	0,16±0,03	1,09
MR73-1b	0,07±0,01	0,16±0,02	0,36±0,04			0,35±0,03	0,17±0,04	1,03

Tabla 3-40. Aceleración eficaz según los distintos puntos del recorrido (Boileau et al. 2005).

Description				Accélération efficace globale pondérée a_w (m/s ²)																										$\bar{a}_w$	S	
Charge	Motrice et état	Direction	Localisa- motrice	Interruption																												
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26			
Pointe	MR63-1a	HB→Anggrignon	Queue	0,397	0,312	0,309	0,356	0,387	0,296	0,375	0,259	0,420	0,397	0,355	0,313	0,337	0,319	0,291	0,337	0,390	0,424	0,471	0,533	0,414	0,379	0,400	0,337	0,503	0,347	0,387	0,06	
Pointe	MR63-1a	Anggrignon→HB	Tête	0,385	0,513	0,384	0,396	0,506	0,429	0,444	0,389	0,380	0,595	0,619	0,417	0,361	0,373	0,326	0,434	0,403	0,411	0,401	0,373	0,438	0,465	0,398	0,399	0,418	0,402	0,439	0,06	
Pointe	MR63-1b	HB→Anggrignon	Queue	0,493	0,415	0,415	0,604	0,606	0,384	0,456	0,369	0,693	0,731	0,456	0,393	0,375	0,409	0,409	0,371	0,455	0,501	0,779	0,551	0,420	0,516	0,443	0,376	0,668	0,424	0,528	0,12	
Pointe	MR63-1b	Anggrignon→HB	Tête	0,309	0,437	0,460	0,465	0,450	0,569	0,436	0,282	0,599	0,654	0,360	0,416	0,355	0,344	0,267	0,367	0,376	0,623	0,595	0,663	0,755	0,522	0,532	0,527	0,595	0,607	0,526	0,14	
Pointe	MR63-2a	HB→Anggrignon	Queue	0,636	0,433	0,451	0,536	0,516	0,371	0,452	0,402	0,593	0,543	0,374	0,421	0,407	0,436	0,350	0,413	0,501	0,543	0,531	0,535	0,375	0,417	0,460	0,457	0,648	0,399	0,490	0,08	
Pointe	MR63-2a	Anggrignon→HB	Tête	0,381	0,395	0,418	0,476	0,574	0,426	0,520	0,332	0,398	0,441	0,379	0,432	0,384	0,364	0,348	0,455	0,451	0,693	0,573	0,514	0,468	0,501	0,478	0,680	0,545	0,624	0,490	0,10	
Pointe	MR63-2b	HB→Anggrignon	Queue	0,722	0,462	0,407	0,544	0,586	0,382	0,553	0,361	0,509	0,522	0,515	0,444	0,510	0,534	0,374	0,371	0,444	0,492	0,876	1,077	0,455	0,387	0,497	0,596	0,956	0,469	0,584	0,16	
Pointe	MR63-2b	Anggrignon→HB	Tête	0,491	0,667	0,539	0,654	0,661	0,459	0,659	0,536	0,838	0,648	0,547	0,500	0,417	0,418	0,509	0,495	0,438	0,523	0,707	0,512	0,398	0,548	0,544	0,720	0,882	0,472	0,589	0,12	
Hors pointe	MR63-1a	HB→Anggrignon	Queue	0,379	0,339	0,361	0,365	0,420	0,368	0,445	0,262	0,424	0,369	0,431	0,384	0,397	0,441	0,397	0,418	0,482	0,497	0,533	0,661	0,493	0,536	0,541	0,486	0,641	0,508	0,466	0,09	
Hors pointe	MR63-1a	Anggrignon→HB	Tête	0,387	0,454	0,392	0,403	0,471	0,441	0,459	0,411	0,443	0,535	0,529	0,430	0,414	0,396	0,346	0,455	0,424	0,504	0,497	0,510	0,463	0,536	0,480	0,421	0,434	0,385	0,459	0,05	
Hors pointe	MR63-1b	HB→Anggrignon	Queue	0,511	0,670	0,560	0,732	0,801	0,514	0,754	0,365	0,692	0,774	0,600	0,396	0,369	0,373	0,358	0,421	0,561	0,703	0,672	0,648	0,550	0,535	0,531	0,532	0,797	0,540	0,619	0,14	
Hors pointe	MR63-1b	Anggrignon→HB	Tête	0,338	0,523	0,412	0,543	0,493	0,368	0,436	0,304	0,540	0,610	0,329	0,399	0,406	0,429	0,350	0,350	0,351	0,588	0,603	0,473	0,671	0,580	0,472	0,512	0,695	0,512	0,512	0,12	
Hors pointe	MR63-2a	HB→Anggrignon	Queue	0,431	0,513	0,505	0,400	0,396	0,447	0,535	0,329	0,592	0,439	0,391	0,387	0,346	0,364	0,328	0,452	0,518	0,475	0,470	0,643	0,493	0,476	0,453	0,376	0,584	0,571	0,474	0,08	
Hors pointe	MR63-2a	Anggrignon→HB	Tête	0,385	0,423	0,452	0,453	0,478	0,486	0,397	0,341	0,440	0,445	0,361	0,408	0,365	0,389	0,356	0,436	0,422	0,473	0,539	0,637	0,442	0,472	0,493	0,506	0,571	0,628	0,465	0,07	
Hors pointe	MR63-2b	HB→Anggrignon	Queue	0,536	0,662	0,523	0,508	0,456	0,532	0,505	0,395	0,576	0,607	0,458	0,491	0,462	0,478	0,466	0,519	0,739	0,590	0,829	0,765	0,444	0,493	0,473	0,443	1,129	0,621	0,607	0,16	
Hors pointe	MR63-2b	Anggrignon→HB	Tête	0,466	0,455	0,689	0,645	0,529	0,794	0,778	0,616	0,927	0,643	0,720	0,621	0,423	0,427	0,378	0,509	0,576	0,582	0,678	0,958	0,465	0,723	0,908	0,798	0,682	0,634	0,686	0,17	
Pointe	MR73-1a	HB→Anggrignon	Queue	0,419	0,329	0,323	0,366	0,362	0,319	0,348	0,396	0,344	0,373	0,348	0,383	0,418	0,421	0,412	0,396	0,365	0,388	0,404	0,389	0,352	0,363	0,375	0,347	0,361	0,347	0,374	0,02	
Pointe	MR73-1a	Anggrignon→HB	Tête	0,389	0,389	0,377	0,418	0,408	0,359	0,374	0,350	0,438	0,454	0,416	0,411	0,390	0,402	0,392	0,401	0,428	0,448	0,433	0,431	0,375	0,369	0,409	0,404	0,399	0,395	0,406	0,02	
Pointe	MR73-1b	HB→Anggrignon	Queue	0,474	0,438	0,393	0,371	0,356	0,340	0,370	0,351	0,358	0,364	0,353	0,393	0,404	0,444	0,390	0,438	0,415	0,450	0,446	0,378	0,420	0,426	0,373	0,361	0,379	0,397	0,396	0,03	
Pointe	MR73-1b	Anggrignon→HB	Tête	0,419	0,470	0,428	0,466	0,461	0,430	0,427	0,393	0,454	0,465	0,447	0,515	0,508	0,472	0,488	0,482	0,428	0,444	0,455	0,428	0,438	0,432	0,451	0,450	0,433	0,439	0,450	0,02	
Pointe	MR73-2a	HB→Anggrignon	Queue	0,459	0,360	0,358	0,423	0,407	0,350	0,341	0,363	0,421	0,394	0,367	0,393	0,397	0,417	0,378	0,495	0,470	0,495	0,411	0,448	0,460	0,453	0,444	0,457	0,445	0,432	0,424	0,424	0,04
Pointe	MR73-2a	Anggrignon→HB	Tête	0,434	0,450	0,445	0,431	0,446	0,461	0,511	0,364	0,438	0,586	0,591	0,621	0,474	0,500	0,420	0,460	0,448	0,473	0,443	0,453	0,558	0,553	0,464	0,452	0,442	0,442	0,479	0,05	
Pointe	MR73-2b	HB→Anggrignon	Queue	0,434	0,338	0,317	0,395	0,369	0,353	0,398	0,359	0,377	0,370	0,350	0,412	0,437	0,444	0,416	0,446	0,420	0,427	0,426	0,442	0,393	0,434	0,412	0,408	0,420	0,358	0,400	0,03	
Pointe	MR73-2b	Anggrignon→HB	Tête	0,377	0,420	0,412	0,427	0,460	0,511	0,432	0,332	0,436	0,479	0,438	0,497	0,449	0,429	0,428	0,456	0,455	0,463	0,441	0,436	0,410	0,413	0,407	0,423	0,427	0,428	0,436	0,03	
Hors pointe	MR73-1a	HB→Anggrignon	Queue	0,453	0,405	0,380	0,379	0,363	0,301	0,366	0,328	0,396	0,410	0,401	0,424	0,428	0,431	0,390	0,362	0,368	0,408	0,389	0,444	0,413	0,410	0,376	0,351	0,404	0,385	0,393	0,03	
Hors pointe	MR73-1a	Anggrignon→HB	Tête	0,396	0,401	0,395	0,440	0,421	0,369	0,453	0,388	0,396	0,396	0,397	0,435	0,402	0,392	0,383	0,426	0,459	0,437	0,423	0,400	0,413	0,402	0,413	0,386	0,428	0,451	0,411	0,02	
Hors pointe	MR73-1b	HB→Anggrignon	Queue	0,397	0,347	0,316	0,390	0,401	0,356	0,392	0,381	0,396	0,418	0,423	0,440	0,424	0,422	0,390	0,367	0,368	0,458	0,475	0,432	0,405	0,497	0,412	0,390	0,426	0,425	0,411	0,04	
Hors pointe	MR73-1b	Anggrignon→HB	Tête	0,384	0,422	0,391	0,461	0,471	0,459	0,435	0,378	0,474	0,479	0,423	0,434	0,433	0,436	0,427	0,399	0,436	0,493	0,491	0,465	0,463	0,469	0,463	0,424	0,460	0,444	0,447	0,03	
Hors pointe	MR73-2a	HB→Anggrignon	Queue	0,463	0,388	0,332	0,452	0,408	0,362	0,392	0,406	0,402	0,448	0,519	0,520	0,477	0,493	0,496	0,528	0,536	0,457	0,472	0,455	0,499	0,583	0,495	0,440	0,469	0,450	0,458	0,05	
Hors pointe	MR73-2a	Anggrignon→HB	Tête	0,432	0,626	0,533	0,465	0,448	0,449	0,432	0,339	0,436	0,531	0,489	0,516	0,507	0,492	0,403	0,511	0,466	0,452	0,466	0,572	0,485	0,419	0,423	0,441	0,472	0,626	0,479	0,06	
Hors pointe	MR73-2b	HB→Anggrignon	Queue	0,476	0,419	0,409	0,438	0,419	0,349	0,378	0,413	0,419	0,399	0,379	0,424	0,489	0,512	0,436	0,466	0,412	0,411	0,420	0,416	0,408	0,470	0,419	0,361	0,415	0,478	0,443	0,03	
Hors pointe	MR73-2b	Anggrignon→HB	Tête	0,416	0,418	0,408	0,469	0,458	0,426	0,365	0,415	0,465	0,467	0,471	0,399	0,416	0,426	0,454	0,438	0,519	0,525	0,446	0,465	0,460	0,457	0,420	0,457	0,478	0,443	0,639	0,43	

Motriz	$A_{wz, \text{ siege}} \text{ (ms}^{-2}\text{)}$		
	Lignes 1 et 2	Ligne 4	Ligne 5
MR 63-a	0,44±0,03	0,52±0,01	0,40±0,02
MR 63-b	0,57±0,04	0,71±0,04	0,51±0,01
MR 73*	0,42±0,02	0,48±0,04	0,38±0,02

Motriz	$a_{wx, \text{ siege}} \text{ (ms}^{-2}\text{)}$	$a_{wy, \text{ siege}} \text{ (ms}^{-2}\text{)}$	$a_{wx, \text{ dossier}} \text{ (ms}^{-2}\text{)}$
MR 63-a	0,09±0,01	0,18±0,01	0,30±0,04
MR 63-b	0,10±0,01	0,18±0,01	0,34±0,05
MR 73*	0,08±0,01	0,18±0,02	0,18±0,02

Figura 3.2.20. Características de las aceleraciones en las líneas (Boileau et al. 2005).

En este estudio no se analizan las aceleraciones longitudinales. La eficacia de los transportines es muy baja como se observa en la Figura 3.2.21 por lo que se han sustituido por asientos (con suspensión helicoidal y de barra de torsión). Esto consigue reducir las vibraciones por debajo de los 6 Hz, pero no las de 3.5 Hz, por lo que se recomienda la utilización de asientos con suspensión neumática.

Figura 3.2.21. Transmisibilidad del transportín (P. Boileau 2004)

3.2.5 Ergonomía y reducción de la vibración.

Una de las principales causas del dolor de espalda además de las vibraciones de cuerpo completo es la postura. De ahí que un diseño ergonómico de la cabina contribuirá notablemente a la reducción de la incidencia del dolor de espalda dentro de las enfermedades de los conductores.

La posición y el tipo de montaje de los asientos contribuyen notablemente a la ergonomía pudiendo provocar estrés postural.(Goonetilleke 2016) Adicionalmente existe una cierta relación entre las actividades realizadas fuera del puesto de trabajo como el levantamiento de objetos pesados y el dolor de espalda.

3.2.5.1 *Dinámica ferroviaria*

El ambiente dinámico ferroviario se caracteriza por poseer una marcada influencia de la aceleración lateral además de la vertical. Adicionalmente existen frecuentes impactos múltiples y eventos que suelen ser impredecible.(Grabarek 2002). Dado que el ambiente vibratorio varía a lo largo de una ruta, se ha llegado a la conclusión de los niveles de vibración en las locomotoras dependen principalmente de la velocidad, por lo que es recomendable medir conjuntamente la velocidad del tren o locomotora (Larson, Raasch, y Pierce 2006).

3.2.5.2 *Asientos*

La función de transferencia de los asientos en las cabinas de las locomotoras americanas estudiadas se muestra en la

Tabla 3-41, de lo que se deduce que los asientos amplifican las vibraciones transmitidas en las direcciones horizontales (un 21% en la dirección lateral) mientras que reduce ligeramente la vibración en la dirección vertical. Basándose en encuestas realizadas sobre un gran número de maquinistas en Estados Unidos (véase Tabla 3 41) se ha obtenido una clasificación de cuáles son las características de los asientos de locomotora

Tabla 3-41. Funcion de transferencia (SEAT) de las locomotoras americanas.(Johanning, Fischer, et al. 2006)

n	42	42	42
	X	Y	Z
Mean	<u>1.43</u>	<u>1.21</u>	<u>0.97</u>
Min	1.00	1.03	0.61
Max	2.32	1.51	1.56
SD	0.32	0.11	0.17

Incluso los asientos de nuevo diseño no parecen apropiados para reducir la vibración y proporcionar un correcto apoyo.

Los asientos con suspensión proporcionan un aislamiento principalmente en el sentido vertical, aunque recientes proyectos como el VIBSEAT financiados por la Unión Europea se han concentrado en el empleo de la suspensión horizontal. Para el caso del ferrocarril lo más importante sería reducir la vibración lateral.

Tabla 3-42. Características de asientos de locomotoras (Johanning, Fischer, et al. 2006)

	Locomotive operator		Control		χ^2	P(χ^2)
	(%)	N	(%)	N		
Arm rest	82.3	1011	89.1	313	8.29	0.004
Any back support	78.7	1043	90.3	310	21.24	<0.001
Adjustable back support	30.5	1026	14.7	299	29.33	<0.001
Air cushion system	11.1	1026	37.4	297	112.55	<0.001
Round seat pad(toad stool)	20.0	985	23.1	303	1.36	0.244
Footrest available?	34.1	954	5.6	305	94.83	<0.001

En los ensayos en laboratorio realizados por Gunston y Griffin a partir de excitaciones obtenidas en ensayos en locomotoras se llegan a obtener los siguientes valores SEAT para asientos de ferrocarril (véase Figura 3.2.22).

Subject mass (kg)	Run 1	Run 2	Run 3	Mean
99	1.06	1.06	1.07	1.06
53	1.15	1.16	1.15	1.16

Figura 3.2.22 Valores SEAT de transmisibilidad (Gunston y Griffin 2004)

En las locomotoras finlandesas la función de transferencia de los asientos era según la Figura 3.2.23.

Las FRF del asiento indican que éste no reduce la vibración lateral a bajas frecuencias (debido en principio a los juegos en el montaje del asiento) por lo que se debería usar un amortiguador activo. La vibración lateral aumenta con la velocidad, pero a bajas frecuencias por lo que no influyen los elementos rotativos de la locomotora (motores etc.) sino más bien la vía, las ruedas y la suspensión del vehículo.

En USA el Air Force Research Laboratory ha realizado estudios sobre la transmisibilidad de los asientos probándolos en laboratorios a partir de las señales medidas en locomotoras (Smith 2006). El origen del estudio solicitado por la FRA y Amtrak es la queja de los conductores de locomotoras sobre molestias en la espalda. Los datos obtenidos se utilizaron para evaluar el peligro potencial de las vibraciones sobre la salud de los conductores según la ANSI S3.18-2002) y la ISO 2631: 1997. Uno de los principales objetivos es el análisis multiaxial de las vibraciones y la transmisibilidad cruzada de las mismas para establecer las medidas adecuadas que reduzcan dichas vibraciones. Mediante el uso de la matriz de transferencia del sistema se pretendía predecir la respuesta del sistema multiaxial en el cojín y el respaldo para aplicar después la normativa sobre la valoración de la salud y confort de los maquinistas.

Figura 3.2.23. Forma de la función de transferencia en las locomotoras finlandesas (Sorainen y Rytönen 1999). Línea de puntos: 80 km/h. Línea de trazos: 100 km/h. Línea de trazos largos: 120 km/h. Línea continua: 140 km/h

$$\begin{bmatrix} P_{xz} \\ P_{yz} \\ P_{zz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{xx} & P_{xy} & P_{xz} \\ P_{yx} & P_{yy} & P_{yz} \\ P_{zx} & P_{zy} & P_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_1 \\ H_2 \\ H_3 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} H(\omega) &= P_{zz}(\omega) / P_{zz}(\omega) \\ C(\omega) &= |P_{zz}(\omega)|^2 / P_{zz}(\omega) P_{zz}(\omega) \end{aligned} \quad \text{Ecuación 19}$$

Los resultados obtenidos no permiten concluir que este método sea adecuado. Tan solo sirve para determinar factores como el SEAT que en este estudio alcanza valores de 1.3 para X, 1.0 para Y, y 1.3 para Z.

En este estudio se utiliza el valor VTV (Vibration Total Value) calculado como el vector suma de los valores eficaces, siendo la media de 0.74, lo que supone que está por encima de la zona de precaución para la salud.

Se ha demostrado que existe poca correlación entre la vibración transmitida a ejes distintos del de la vibración de entrada, con la excepción de la aceleración vertical que produce movimiento en el sentido longitudinal de la cabeza.

El análisis de las vibraciones en las cabinas de las locomotoras muestra una concentración de las mismas por debajo de los 10 Hz, especialmente entre los 1.5 a 2 Hz. Se probaron distintos tipos de asientos, con suspensión, con una suspensión no adecuada, asientos rígidos (los únicos que mostraban un comportamiento lineal) y asientos de locomotoras de mercancías. (Véase Figura 3.2.24).

Figura 3.2.24. Análisis en frecuencia de las vibraciones en locomotoras (Smith, y Bowden 2008).

Se recomienda realizar un estudio de las vibraciones de las locomotoras en distintas condiciones (curvas grandes, pequeñas, distintas velocidades) para extrapolar estas conclusiones.

Las resonancias en el eje X se dan entre los 2 y 3 Hz, en el eje Z entre los 2 y 3.5 Hz dependiendo bastante entre el tipo de asiento utilizado.

La transmisibilidad de los asientos puede considerarse lineal cuando se somete a una vibración pura, pero cuando se somete a una vibración aleatoria como la presente en las locomotoras se pierde esta linealidad como se observa en la Figura 3.2.25.

Se puede concluir que la transmisibilidad es mayor cuando se conduce con la espalda apoyada en el respaldo, que cuando se conduce con una postura sobre el pupitre.

3.2.6 Conclusiones

No existen numerosos estudios publicados sobre las aceleraciones presentes en las cabinas y los asientos de conductores de vehículos ferroviarios.

Los estudios revisados están muy espaciados en el tiempo y la ubicación, por lo que las normas que se han seguido para realizar la evaluación varían de unos estudios a otros. Incluso utilizando la misma norma varían las versiones utilizadas, lo que hace complicada la comparación.

La normativa más utilizada, como se observa en Tabla 3-43, es la ISO 2631-1 pero sin tener en cuenta características típicas del ferrocarril como la variabilidad de las señales (no utilizan métodos estadísticos) o los filtros definidos en otras normas ISO.

Figura 3.2.25. Transmisibilidad de los asientos en locomotoras y coherencias (Smith 2006).

Tabla 3-43. Resumen de los estudios analizados

Autor y año	Tipo de vehículo	Normativa	N	Índice	Valor medido en asiento
Johanning et al. (2002)	Locomotoras	ISO 26311 (1997)	22	a_w (media) VTV	0.18 (x), 0.28 (y), 0.32 (z) m/s^2 0.59 m/s^2
Azlis-Sani et al. (2015)	Vehículo ligero	ISO 2631-1 (1997)	8	A(8)	1.4 m/s^2 -1.8 m/s^2
Clément (2005)	Locomotoras	NF E90-401-2 (2001) UIC 513 (1994)	6	a_w	0.1-0.8 m/s^2 (x) respaldo 0.1-0.23 m/s^2 (y) 0.05-0.1 m/s^2 (z)
UIC B 153 RP 5 (1985) (ORE_RP_5_B_153, 1985)	Trenes de pasajeros Trenes de mercancías Metro	ISO 2631-1 (1978) UIC 513 (1994)	14	a_w	0.02-0.15 m/s^2 (x) 0.09-0.33 m/s^2 (y) 0.14-0.38 m/s^2 (z)
Sorainen and Rytönen (1999)	Locomotoras eléctricas y Diesel	ISO 2631-1 (1985)	30 0	Habilidad disminuida por fatiga EAV	8 horas 2.2 hasta 100h
Clément (2003)	Locomotoras	NF E90-401-2 (2001) ISO 2631-1 (1997)	8	a_w	0.13-0.31 m/s^2 (x) (respaldo) 0.24-0.3 m/s^2 (x) 0.22-0.76 m/s^2 (z)
(DiFiore et al. 2012)	Locomotoras	ISO 2631-1 (1997)	2	a_w	0.08 (x), 0.08 (y), 0.19 (z) m/s^2 0.08 (x), 0.08 (y), 0.27 (z) m/s^2
Evans (2004)	Trenes de pasajeros Tranvías Locomotoras Maquinaria de vía	ISO 2631-1 (1997) BS 6841 (1987) GM/RT2160 (2000)		VDV	Trenes pasajeros 2.8 $m/s^{1.75}$ Tranvías 4.7-9.45 $m/s^{1.75}$ Locomotoras 7.3-15.8 $m/s^{1.75}$ Maq. vía 6.5-12.9 $m/s^{1.75}$
Boileau et al. (2005)	Metro	ISO 2631-1 (1997)	12 8	a_w	0.18-0.34 m/s^2 (x) respaldo 0.07-0.16 m/s^2 (x) 0.16-0.22 m/s^2 (y) 0.33-0.61 m/s^2 (z)
Johanning, Fischer, et al. (2006)	Locomotoras	ISO 2631-1 (1997) ISO 2631-5 (2004)	50	A(8) a_w VTV	0.35-0.58 m/s^2 0.07-0.19(x);0.13-0.04(y);0.14-0.5(z) m/s^2 0.27-0.65 m/s^2
Johanning, Landsbergis, et al. (2006)	Locomotoras	ISO 2631-1 (1997) BS 6841 (1987) ISO 2631-5 (2004)	51	a_w (media) VTV	0.13 (x), 0.23 (y), 0.29 (z) m/s^2 0.48 m/s^2
Ismail (2010)	Trenes de pasajeros	ISO 2631-1 (1997)	3	A(8)	0.288-0.374 m/s^2
Larson, Raasch, and Pierce (2006)	Locomotoras	ISO 2631-1 (1997) BS 6841 (1987) European Directive (2002/44/EC)	11	VDV	4.6 $m/s^{1.75}$ (media) 6.1 $m/s^{1.75}$ (máxima)
Cooperrider and Gordon (2008)	Locomotoras	ISO 2631-1 (1997) ISO 2631-5 (2004)	19	VDV	2.68-9.33 $m/s^{1.75}$ (z)
Smith, and Bowden (2008)	Locomotoras (Medidas en laboratorio)	ANSI S3.18 (2002) ISO 2631-1 (1997)		VTV	0.74 m/s^2
Birlik (2009)	Trenes intercity	ISO 2631-1 (1997) Directiva (2002/44/EC)	5	a_w (media) VTV A(8)	0.41 (x), 0.55 (y), 0.65 (z) m/s^2 0.95 m/s^2 0.31 (x), 0.45 (y), 0.52 (z) m/s^2
Raffler et al. (2017)	Locomotoras	ISO 2631-1 (1997) European Directive (2002/44/EC)		a_w A(8)	0.1 m/s^2 (x) 0.15 m/s^2 (y) 0.18 m/s^2 (z) 0.22

AUTOR	INSTITUCION	AÑO	PAIS	NORMATIVA
ORE RP 5 B 153	UIC	1985	Francia Italia Alemania	ISO 2631-1 (1978) UIC 513
Sorainen,E	Finnish institute of occupational Health	1999	Finlandia	ISO 2631-1 (1985)
Evans Jerry	Aea Technology /RSSB	2003	UK	ISO 2631-1 (1997) BS 6841 GM/RT2160
Clément, P	SCNF	2003	Francia	NF E 90 401-2, UIC 513
Clément, P	SCNF	2005	Francia	NF E 90 401-2, UIC 513 directiva 2002
Boileau, P	IRSST	2005	CANADA	
Johanning1.E	Occupational and Environmental Health Science; Mount Sinai School of Medicine;	2002	USA	ISO 2631-1 (1997)
Johanning1.E		2006	USA	ISO 2631-1 (1997) BS 6841 ISO 2631-5
Larson RE		2006	USA	ISO 2631-1 (1997)
Larson RE		2006	USA	ISO 2631-1 (1997) BS 6841
Cooperrider, N		2008	USA	ISO 2631-1 (1997) ISO 2631-5
Smith, S	Air Force Research Laboratory	2006	USA	ANSI S3.18-2002) ISO 2631: 1997
Birlik, G		2009	Turquia	ISO 2631-1 (1997) directiva 44/2002
(Azlis-Sani et al. 2015)	Universiti Tun Hussein Onn Malaysia	2015	Malasya	ISO 2631-1 (1997)

Dada la variedad de vehículos dentro del sector ferroviario y de las vías por las que circulaban cuando se han realizado las mediciones se tienen resultados dispersos.

Las cabinas de vehículos ferroviarios se pueden calificar como un entorno vibratorio de magnitudes relativamente bajas, especialmente si se compara con otros entornos de conductores profesionales. Pero según que estudios en algunos casos se puede llegar sobrepasar los límites inferiores definidos en las normativas. Por lo que no se puede despreciar el efecto de las vibraciones en los conductores.

En general para casi todos los estudios se han utilizado el valor eficaz o R.M.S. Sin embargo, otros estudios indican que este factor no tiene en cuenta los golpes e impactos. En algunos de los estudios se utilizan el Vibration Dose Value VDV que caracteriza mejor las vibraciones con altos contenidos en impactos. (Cooperrider y Gordon 2008) Los factores definidos en la ISO 2631-5 (Sed) calculados en ciertos ensayos han arrojado valores muy bajos. Parece que el método de la cuarta potencia o de la dosis de Vibración VDV es el ideal ya que tiene en cuenta los impactos y no exige mucho esfuerzo en el cálculo. En su contra, es un método

que solo se utiliza en los países anglosajones y no en el resto de Europa, ya que tiene una interpretación más difícil.

En casi todos los estudios se han realizado las medidas en los tres ejes del espacio (no hay medidas de las aceleraciones de rotación). Solo en algunos estudios se tienen en cuenta las aceleraciones laterales y verticales únicamente. En la mayor parte de los estudios se considera que las aceleraciones longitudinales son de menor importancia.

Para comparar frente a los límites establecidos se suele tomar el eje más desfavorable como indica la norma, pero también existen estudios que utilizan el vector suma ya que consideran que se debe tener en cuenta las aceleraciones laterales y verticales al mismo tiempo. Dependiendo de la aplicación (vía y velocidad a la que se circule) los valores pueden ser mayores en un eje o en el otro.

En alguno de los estudios se puede comparar el comportamiento de vehículos similares, pero circulando por vías de distinta calidad. La conclusión de dicha comparación es que la calidad de la vía tiene una enorme influencia en las vibraciones a las que está sometido el maquinista.

Los valores obtenidos se resumen en la Tabla 3-44.

El análisis de la frecuencia de las señales medidas en los pisos de las cabinas y en los asientos muestra que la mayor parte de la energía transmitida al cuerpo humano se encuentra por debajo de los 20 Hz y sobre todo por debajo de los 10 Hz. Dependiendo de la dirección de aplicación de la vibración y del tipo de vehículo y de asiento las resonancias se encuentran entre los 1 y los 5 Hz.

La transmisibilidad de los asientos varía según la aplicación, pero en algún caso puede ser del orden de 2, por lo que un asiento mal diseñado puede amplificar una aceleración al doble.

Tabla 3-44. Valores característicos en los estudios analizados

REF	NORMATIVA	FACTOR	VALOR	FRECUENCIA
ORE RP 5 B 153	ISO 2631-1 (1978) UIC 513	DV	500-2000	
		R.M.S.	0.16-0.41 m/s ² en Z 0.08-0.37 m/s ² en Y	
	ISO 2631-1 (1985)	R.M.S.		1.6-2 Hz (z)
Sorainen,E	ISO 2631-1 (1997) BS 6841 GM/RT2160	VDV	V. Pasajeros VDV 2-8 m/s ^{1.75}	
		A(8)	Railbus VDV 4.7-9.45 m/s ^{1.75} Locomotoras VDV 7.3-15.8 m/s ^{1.75} Maq. de via VDV 6.5-12.9 m/s ^{1.75}	
Evans Jerry	NF E 90 401-2, UIC 513	NVA	3.7-7.2	1 Hz en y 2.5 Hz en z
Clément, P	NF E 90 401-2, UIC 513 directiva 2002	NVA	6.8-8.0	2,8 y 16 Hz en y
		EAV	2.1-7.2 horas	2,8 y 16 Hz en z
Clément, P		R.M.S.	0.07-0.11 (x) 0.16-0.2(y) 0.42-0.57 (z)	6 Hz y 2.1 Hz (z) 0.8 y 3 Hz (y)
Boileau, P	ISO 2631-1 (1997)	R.M.S.	0.18 (x) 0.28(y) 0.32 (z) m/s ²	
		Sum	0.59 m/s ²	
		R.M.S.	10.1 (x) 9.3(y) 10.7 (z)	
		CF, MTVV/aw	5.26 (x) 5.12(y) 4.81 (z)	
Johanning1.E	ISO 2631-1 (1997) BS 6841 iso 2631-5	R.M.S.	0.14 (x) 0.22(y) 0.28 (z) m/s ²	
		Sum	0.13-0.44 m/s ²	
		R.M.S.	15.95 (x) 10.91(y) 14.42 (z)	
		CF, MTVV/aw	7.37 (x) 6.12(y) 5.59 (z)	
Johanning1.E	ISO 2631-1 (1997)	aw	0.1-0.2 (x) 0.1-0.5(y) 0.2-0.3 (z)	
(Larson, Raasch, y Pierce 2006)	ISO 2631-1 (1997) BS 6841			
Larson RE	ISO 2631-1 (1997) ISO 2631-5	VDV	2,68-9.33 m/s ^{1.75}	
		Sed	0.123 - 0.434 MPa	
Cooperrider, N	ANSI S3.18-2002) ISO 2631: 1997	VTV	0.74 m/s ²	2 - 3 Hz, (x) 2 - 3.5 Hz, (z)
Smith, S	ISO 2631-1 (1997) directiva 44/2002	A(8)	0.31 (x) 0.45(y) 0.52 (z)	
		VDV	0.6 (x) 14.1(y) 15.9 (z)	
Birlik, G	ISO 2631-1 (1997)	A(8)	1.4 m/s ² -1.8 m/s ²	

4 SISTEMA DINÁMICO ASIENTO CONDUCTOR Y MODELOS DE REDES NEURONALES.

En este capítulo se describen los asientos y sus componentes, considerándolos como un sistema dinámico junto con el conductor. Englobado dentro del estudio general de las vibraciones a las que está sometido el conductor, el asiento puede ser considerado como un elemento más para la reducción de las vibraciones. La solución adoptada debe ser económicamente viable a la vez que eficaz a la hora de aislar lo máximo posible al conductor de las vibraciones.

Como se describe a lo largo del capítulo, las características dinámicas del sistema asiento - conductor no permite la utilización de modelos lineales para predecir el comportamiento en vía. Las no linealidades que presentan los distintos componentes del asiento y el cuerpo humano hacen inviable la utilización de modelos clásicos. Estos modelos han sido muy útiles para el estudio del comportamiento de los asientos y el proceso de optimización.

Pero el objetivo en esta tesis es buscar un sistema que permita predecir las aceleraciones en el interfaz cojín - conductor para poder utilizar las medidas obtenidas en el proceso de certificación del vehículo ferroviario. Por eso se propone la utilización de un modelo de redes neuronales que ha sido utilizado en otros campos de la ingeniería con éxito. Utilizando las medidas realizadas con el cojín puede realizarse el proceso de aprendizaje de la red. Con este modelo se pueden utilizar los datos de la certificación (aceleraciones en el piso de cabina) para calcular las aceleraciones en el asiento.

4.1 *El sistema dinámico asiento - conductor.*

4.1.1 Descripción de los asientos.

En general, en la industria ferroviaria las series de producción de trenes o locomotoras con sus correspondientes cabinas son muy bajas comparadas con otras industrias como la fabricación de autobuses, camiones o tractores.

Por esta razón los asientos desarrollados por los fabricantes están enfocados a los campos indicados anteriormente. Sin embargo, el ferrocarril presenta unas características específicas como se ha enumerado en capítulos anteriores.

La consecuencia es que en el ferrocarril se emplean asientos derivados de la industria de la automoción para evitar elevados costes de desarrollo (Figura 4.1.1). Pero la implantación de estos asientos en los vehículos ferroviarios debe tener en cuenta las especificidades del sector.

El asiento no es un componente caro si se compara con el precio total de una locomotora / cabeza motriz. Sin embargo, puede tener una gran influencia en la salud de los conductores y por tanto en las bajas laborales, las quejas y la función de conducción.

En general el desarrollo histórico de los asientos de conductor ha ido unido al diseño de los elementos resorte - amortiguador. En un principio, los asientos consistían en una chapa soporte sin cojín unido a un muelle de láminas sin amortiguamiento. En este caso, además de la falta propia de confort del asiento, éste aumentaba las vibraciones del vehículo, ya que la frecuencia propia del asiento era demasiado cercana a la del vehículo y no existía amortiguamiento.

fahrzeuge Sitze MÖVE	MSG 90.3 Lok GRAMMER	Rail Star Pro Cleemann Sitzsysteme GmbH	Air 714 KAB

Be-Ge 26-Series BE-GE Industri AB	Driver seat Baultar	ISRI 6860/875 NTS ISRINGHAUSEN GMBH	Ergo Viking BG 940 GL ERGO VIKING

Figura 4.1.1. Asientos comerciales aplicados en el ferrocarril.

Con la introducción de cojines (bien sea de muelles o de espuma) en los asientos se mejoró el confort de los mismo, ya que dicho cojín presentaba una rigidez menor y un cierto coeficiente de amortiguamiento de modo que era capaz de aislar pequeños impactos y vibraciones. En este caso existían resonancias a frecuencias entre 3 y 4 Hz con factores de amplificación de hasta el 200% (Smith 2006).

Los cojines por sí mismos atenúan las vibraciones a partir de frecuencias de 10-15 Hz pero pueden amplificarlas por debajo de los 5 Hz (Hauck 2001), lo cual afecta a la zona de mayor sensibilidad del cuerpo humano. Cojines más suaves pueden dar lugar a mayores aceleraciones que los más duros. La forma y el material del cojín pueden ser diseñados de forma que se reduzca la rotación de la pelvis.

A medida que ha ido aumentando la velocidad y masa de los vehículos ha ido mejorando el diseño de los asientos y se han introducido mecanismos de tipo paralelogramo con muelles helicoidales. En este caso las frecuencias de resonancia se situaban en torno a los 2 Hz y el factor de amplificación era de un 130%.

Se utilizaban amortiguadores hidráulicos para reducir la frecuencia de resonancia (Rakheja, Boileau, y Wang 2016) incluso con un mecanismo para ajustar la pretensión del muelle (Figura 4.1.2). Debido al diseño de la cinemática del asiento se producía un aumento de la vibración en la dirección horizontal. Esto se pudo eliminar mediante la introducción del diseño en forma de tijera. Cuando la altura disponible no era suficiente se aplicaban soluciones de guías de rodillos.

Para evitar que se acoplen las frecuencias de resonancia del vehículo y del asiento, la frecuencia de este último debe ser entre 0 y 0.5 veces la frecuencia propia del vehículo.

En un sistema linealizado y fijado la masa del sistema, esto se consigue reduciendo la flexibilidad del muelle (Figura 4.1.3). Sin embargo, el sistema presenta un límite en el recorrido de la suspensión. Muelles demasiado flexibles agotarían rápidamente el recorrido de la suspensión dando lugar a impactos en los topes,

debido a movimientos dinámicos o simplemente por el descenso estático de la suspensión. Para conseguir frecuencias propias bajas se debe aumentar la longitud del muelle, lo cual supone un problema constructivo en los muelles de acero.

Figura 4.1.2. Transmisibilidad de los asientos según la suspensión (Smith, Smith, y Bowden 2008).

Figura 4.1.3. Descenso estático de la suspensión en función de la frecuencia propia en sistemas pasivos (Kauß 1981).

Cambios en la masa suspendida (por accionamiento de pedales como el hombre muerto o cambios de postura) producen cambios en la posición media estática. Una regla general es que el recorrido del muelle debe ser 1.5 veces el desplazamiento debido al peso propio del conductor. Esto hace necesario realizar un pretensado del muelle (Raab 1992).

Si se utilizan muelles muy flexibles, las fuerzas de rozamiento adquieren mayor importancia, provocando pequeños repiqueteos y un comportamiento no lineal del asiento como se verá más adelante. De este modo pierde su capacidad de aislamiento al disminuir el amortiguamiento.

Los asientos de suspensión se empezaron a utilizar en tractores, donde la carrera del asiento no era muy crítica (hasta 150 mm), aunque hoy en día ya se instalan en camiones, autobuses, locomotoras y trenes. El recorrido de la suspensión debe ser ajustado para cada aplicación (para ello existen asientos de suspensión baja o compacta).

Figura 4.1.4. Desarrollo histórico de los asientos y capacidad de aislamiento de las vibraciones(Kauß 1981).

A principios de los años 80 (véase la Figura 4.1.4) se comenzó a implantar un diseño de asiento con suspensión de aire, especialmente en el caso de autobuses y camiones. Además del elemento muelle amortiguador vertical (Figura 4.1.5) se instala un elemento de suspensión en dirección longitudinal y horizontal. La desventaja de este método es que es necesario el suministro de aire comprimido.

Figura 4.1.5. Mecanismo de tijera con muelle neumático incluido.(Hauck 2001)

Comercialmente se han utilizado también suspensiones semiactivas, mediante fluidos magnetoreológicos.

El siguiente paso para aumentar el grado de aislamiento es la utilización de elementos de suspensión activos. Solo existen algunos ejemplos de asientos con suspensión activa en el mercado de la maquinaria pesada y tractores.

Para el diseño de sistemas de regulación activa como se muestra en la Figura 4.1.6 se han desarrollado numerosas representaciones y procesos de dimensionamiento y forma de disposiciones en el dominio de la frecuencia (Kauß 1981; Hauck 2001). Los sistemas utilizados en la práctica son actuadores hidráulicos, elementos ajustables neumáticos y/o actuadores electromecánicos.

Figura 4.1.6. Función de transferencia para suspensiones activas (Matthew 2004)

4.1.2 Componentes de los asientos.

4.1.2.1 Mecanismos de suspensión y anclajes.

Las suspensiones se dividen según el mecanismo que guía el asiento respecto al suelo de la cabina, el tipo de muelle y el amortiguador.

Existen tres grupos principales de suspensión según se observa en la Figura 4.1.7: la suspensión paralela (tipo 4 u 8), la suspensión en X o de tijera (tipo 1 o tipo 7) y la suspensión de brazo basculante soportado en una columna trasera (tipo 3). Las más utilizadas hoy en día son las suspensiones de tijera y las paralelas.

Todos los mecanismos de la suspensión suelen estar cubiertos para evitar el atrapamiento de las manos por parte del conductor. Los asientos presentan generalmente mecanismos de suspensión en la dirección vertical y esta es la que más se ha desarrollado.

Sin embargo, el asiento también puede flexionar bajo cargas laterales. Esta flexibilidad debe ser tenida en cuenta en ambientes con fuertes cargas laterales, que como se ha visto anteriormente es el caso del ferrocarril.

En los últimos desarrollos se están introduciendo suspensiones laterales y longitudinales como se puede observar en la Figura 4.1.8, constituidas por un resorte y amortiguador. Existen ya soluciones comerciales para instalar debajo del asiento o debajo de la base.

Existen mecanismos que permiten bascular al asiento lateralmente que reducirían las aceleraciones cuasiestáticas a las que se ve sometido el conductor cuando circula por curvas por encima de la velocidad de equilibrio.

4.1.2.2 Muelles de suspensión.

Existen varios tipos de muelles empleados en las suspensiones:

- Muelles helicoidales (en las suspensiones de tijera o en asientos en voladizo) que proporcionan baja rigidez y se necesita poco volumen.
- Barras de torsión, especialmente en diseños más antiguos.
- Muelles de goma, en algunos casos torsionales, que a su vez proporcionan amortiguamiento.

- Muelles neumáticos, que presentan grandes ventajas para equilibrar los distintos pesos del conductor, pero necesitan de un compresor que alimente el aire, y suelen presentar un gran volumen.
- Muelles magnéticos, cuya característica se puede controlar eléctricamente, pero que se han introducido de modo experimental.

Figura 4.1.7. Representación esquemática de las suspensiones en los asientos (Smith 2006).

Suspensión lateral y longitudinal

Mecanismo de pendulación

Figura 4.1.8. Suspensiones laterales y pendulación (P. Boileau 2004)

Los muelles neumáticos presentan unas curvas características no lineales con histéresis (Figura 4.1.9), y el amortiguamiento puede variar según disponga o no de un volumen de aire auxiliar y el diámetro del estrangulamiento entre ambos depósitos (Krettek y Grajnert 1992).

Figura 4.1.9. Curva esfuerzo desplazamiento de muelle neumático (Krettek y Grajnert 1992)

En los ensayos llevados a cabo por (Boileau 2004) se puede observar en la variación de las características del asiento según el asiento elegido.

Figura 4.1.10 Características de los muelles y amortiguadores de la suspensión de asientos de muelles y neumáticos (P. Boileau 2004).

Las rigideces y la fuerza de rozamiento se pueden calcular como la diferencia entre la curva fuerza desplazamiento a compresión y a tracción. Para asientos con suspensión de muelles la rigidez permanece constante a lo largo de recorrido. Para el resto la rigidez aumenta con el desplazamiento siguiendo una curva polinómica de tercer grado. Un aumento de la carga produce una disminución de la rigidez.

4.1.2.3 Amortiguadores.

El amortiguador es un elemento crucial en la suspensión. Suele estar montado, bien en la columna trasera del asiento (Suspensión paralela) bien debajo del asiento (Suspensión de tijera). El nivel de amortiguamiento se reduce cuando se comprime la suspensión (indeseable para no alcanzar los topes de la suspensión).

Los amortiguadores por rozamiento de coulomb utilizados antiguamente han sido remplazados por amortiguadores viscosos telescópicos de simple y doble tubo. Estos pueden ser fijos, activables o de regulación continua (mediante servoválvulas, fluidos electrorreológicos o magnetorreológicos).

Se recomienda el uso de amortiguadores de fin de carrera con una curva fuerza velocidad progresiva (Figura 4.1.1). Los amortiguadores cuya fuerza de amortiguamiento depende del recorrido para carreras

pequeñas pueden tener un efecto positivo en el aislamiento de las vibraciones ya que presentan un pequeño amortiguamiento fuera de la zona de resonancia, mientras que en la zona de resonancia aumenta la carrera, aumentándose la fuerza de amortiguamiento.

Figura 4.1.11. Curva esfuerzo - desplazamiento de amortiguador de asiento.(Stayner 2000)

Los últimos desarrollos están empezando a utilizar amortiguadores de característica controlable (Raab 1992) como pueden ser los amortiguadores magnetoreológicos, cuya fuerza de amortiguamiento varía según la corriente que circula por la bobina(Wang y Meng 2005; Falah, Clark, y Phule 1998; Stayner 2000; Wu y Griffin 1997) como se puede observar en la Figura 4.1.12.

Figura 4.1.12. Curva Amortiguador magnetoreológicos RD-1005-1, Lord Corporation.(Falah, Clark, y Phule 1998)

Sin embargo, estos desarrollos tienen sentido para entornos vibratorios más agresivos, con un mayor potencial de reducción de la vibración que en el ferrocarril. El coste de este tipo de suspensión así como de los sensores y procesadores (ver Figura 4.1.13) necesarios para controlarlo es demasiado elevado. Cuando todos sus elementos sean más comerciales se puede plantear el uso en el ámbito del ferrocarril.

Figura 4.1.13. Sistema de control de la suspensión del asiento (Hauck 2001) Ajustes del asiento.

Una de las características exigidas por ergonomía al asiento es la capacidad de ser ajustado en su posición y de ajustarse al peso del conductor. La rigidez del muelle debe ser la misma independientemente del peso del conductor por lo que la frecuencia natural de los conductores más pesados será menor (Smith 2006).

En los asientos con muelles helicoidales se consigue mediante la variación de la precarga del muelle. En los asientos con muelles neumáticos se consigue introduciendo más aire en el muelle.

El asiento debería permitir ajustes de posición en el sentido lateral y longitudinal, así como en la inclinación del asiento y en apoyo lumbar. También son recomendables reposabrazos regulables en altura e inclinación.

Esta capacidad de ajuste reduce la tensión, la fatiga y ciertas enfermedades musculoesqueléticas.

Un buen apoyo para las piernas mejora la circulación sanguínea, que es vital para mantener la alerta del conductor.

4.1.2.4 Topes de la suspensión.

Suelen ser bloques de material elastómero moldeado (la característica se puede observar en la Figura 4.1.14). Se utiliza más el tope inferior que el superior (incluso en algunos casos se omite). En el diseño se debe alcanzar un compromiso entre una rigidez baja que no altere excesivamente la suspensión en el impacto y un tamaño reducido para dejar más recorrido libre a la suspensión. (Wu y Griffin 1996)

En aplicaciones con grandes movimientos se deber elegir la suspensión con el mayor recorrido posible, el mayor amortiguamiento y topes con una rigidez suave al principio (Rebelle 2004). Este caso raramente se da en vehículos ferroviarios, pero es característico de vehículos agrarios.

En las señales analizadas en los diversos ensayos llevados a cabo no se ha encontrado casos en los que el asiento haya llegado al tope de la suspensión.

Figura 4.1.14 Características de la rigidez de los topes (Rebelle 2004).

4.1.2.5 Cojín.

El cojín y el respaldo en el asiento tienen dos funciones: el apoyo postural y el efecto como parte de la suspensión. El material de los cojines suele ser espuma de poliuretano recubierto por una tapicería. Este material tiene una gran capacidad de amortiguamiento, pero ésta se ve muy reducida por el pequeño espesor (20-30 mm) y la compresión a la que está sometido bajo el peso del conductor. (Valero et al. 2007; M. Griffin y Ebe 1995)

Las espumas de poliuretano presentan dos grandes problemas: no se ajustan a todos los tamaños y pesos del conductor, y se degradan con el tiempo. De hecho, deben ser reemplazadas según algunos planes de mantenimiento. La curva de la rigidez del cojín presenta una cierta histéresis, aumentando con la carga (Boileau 2004), disminuye al aumentar la amplitud de la excitación y tiende a aumentar con el aumento de la frecuencia, como se observa en la Figura 4.1.16.

El coeficiente de amortiguamiento aumenta en función de la carga aplicada, disminuye con el aumento de la frecuencia de excitación y prácticamente no varía con la amplitud de la frecuencia de excitación.

Figura 4.1.15. Características de la rigidez de los cojines. (Boileau 2004)

Últimamente se están introduciendo cojines de aire para reducir la presión sobre las piernas del conductor. Tienen un gran efecto para reducir la presión sobre las tuberosidades isquiales, la pelvis y el tejido que lo rodea. Un buen asiento debería presentar una distribución de presiones entre 60 y 120 mmHg (correspondiente a la presión sistólica). La Figura 4.1.16 muestra la distribución del peso de una persona sentada.

Figura 4.1.16. Distribución de peso de una persona sentada (Matthew 2004).

Cuando se introduce el factor de tiempo la presión exigida debe ser menor para mantener los tejidos sanos, La Figura 4.1.17 muestra la relación entre la presión y el tiempo separándolo en dos zonas, aceptable y no aceptable.

Figura 4.1.17. Relación entre presión y duración (Matthew 2004).

Este aspecto puede ser muy relevante para los conductores de ferrocarril, que tienen turnos de conducción de varias horas en los que no se pueden levantar del asiento. Si el conductor se siente cómodo, no intentará recolocar su posición, concentrándose en la conducción. La Figura 4.1.18 muestra las diferentes presiones según el cojín que se utilice.

Figura 4.1.18. Distribución de presión según el tipo de cojín (Matthew 2004).

Para medir esta distribución de presiones se utiliza el factor $PcR.M.S.$ y su variación que están relacionados con el valor $R.M.S.$ medido en el asiento.

$$Pc_{rms} = \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \left[\left(\frac{dP}{dt} \right)^2 dt \right] \right\}^{1/2} \quad aPc_{rms} = \sum_{i=1}^n Pc_{rms_i} A_i W_i \quad \text{Ecuación 20}$$

Como resumen de todo lo analizado en cuanto a la suspensión de los asientos se llega a las siguientes conclusiones:

- La suspensión se debe ajustar al peso del conductor.
- La frecuencia propia del asiento considerando la masa del conductor debe ser como máximo la mitad de la frecuencia dominante del vehículo.
- Para frecuencias propias suficientemente pequeñas se puede utilizar amortiguadores muy flexibles. Para vibraciones variables distintos niveles de vibración se puede utilizar amortiguadores ajustables o con curvas progresivas.
- Para garantizar conducciones seguras la carrera de la suspensión del asiento no debe ser mayor de 120 mm.
- Los toques final de carrera se deben diseñar dentro de lo posible con una fuerza de retorno pequeña aunque se deben evitar el impacto del asiento.
- Las fuerzas de rozamiento deben ser lo más bajas posible.

4.1.3 Modelos para asientos.

Varios estudios muestran que el sistema musculoesquelético posee una cierta respuesta resonante, cuando se excita a través de la interfaz asiento conductor, siendo amplificada a ciertas frecuencias, y en ciertas partes del cuerpo. En concreto, las mayores vibraciones se transmiten bajo excitación sinusoidal alrededor de 5 Hz, especialmente en la zona lumbar superior y región torácica inferior de la columna vertebral.

El rango de baja frecuencia (2-8 Hz) es crucial para la buena comodidad del conductor y la salud y la eficiencia en el trabajo (Klooster 2004). El sistema de suspensión de un asiento es más probable que haga tope en los buffers si se excita a su frecuencia de resonancia. Lo anterior indica que la simplificación más sencilla es un modelo de un grado de libertad como se puede observar en la Figura 4.1.19.

Figura 4.1.19. Representación del modelo de un grado de libertad (amortiguador muelle)(Wei y Griffin 1998).

4.1.3.1 Modelo de un grado de libertad.

El principio de funcionamiento del sistema de suspensión se puede aproximar a un modelo de un grado de libertad con un muelle y amortiguador. Daría lugar a una vibración armónica amortiguada que se rige por

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{cs + k}{ms^2 + cs + k} \quad \omega_d = \sqrt{\omega_n^2 - \left(\frac{c}{2m}\right)^2} \quad \text{Ecuación 21}$$

La frecuencia propia amortiguada se observa en la Figura 4.1.20.

El uso del amortiguador reducirá el pico de la resonancia. Sin embargo, al aumentar el amortiguamiento también se aumenta la transmisibilidad del asiento a mayores frecuencias. El comportamiento dinámico del asiento está influenciado por varios parámetros dependiendo de la magnitud de la excitación.

En el caso del muelle influye no solo la rigidez. La fricción del muelle adquiere una relevancia especial, ya que hace que el sistema sea poco lineal. En el caso del amortiguador, posee una amortiguación viscosa que proporciona la amortiguación ideal y el amortiguamiento de coulomb (de fricción) generado por las juntas y el pistón que confiere un comportamiento no lineal. A altas frecuencias los amortiguadores se rigidizan transmitiendo las vibraciones directamente al conductor.

Figura 4.1.20. Frecuencia de resonancia de un modelo de 1 GDL.(M. J. Griffin 2012)

Rakheja (Rakheja, Boileau, y Wang 2016) utilizó un modelo de asiento con suspensión linealizado, y encontró que la fricción de Coulomb es más influyente que amortiguamiento viscoso y que los coeficientes de ambas deben reducirse para mejorar el comportamiento dinámico.

En el modelo de (Gunston y Griffin 2000) las conclusiones fueron que la reducción de amortiguamiento viscoso tiene un efecto insignificante en el comportamiento del asiento en magnitudes bajas, un pequeño efecto en magnitudes moderadas (cambio del 50% del amortiguamiento resulta en una mejoría <5%), y un gran efecto perjudicial en altas magnitudes (hasta el 150% peor) debido a una mayor incidencia y gravedad de los impactos con los topes fin de carrera. La reducción de amortiguamiento de fricción es beneficioso a bajas y moderadas excitaciones (reducción de 50% da una mejora de hasta el 40%), pero perjudicial a altas magnitudes.

Según Gunston lo ideal sería que la fricción debe reducirse tanto como sea posible en la práctica, y el amortiguamiento viscoso se debe utilizar para controlar la ocurrencia de los impactos con los topes fin de carrera.

El sistema de suspensión mecánica trabaja con un conjunto integrado de resortes. Estos resortes se hacen generalmente de acero. Por medio de ajuste de la tensión inicial (precarga), el paquete de muelles se puede ajustar con el peso del conductor actual para colocar el asiento en posición media. Los amortiguadores de presión de aceite (tipo telescópica hidráulica) son los encargados de la amortiguación en este sistema mecánico. La solución ideal sería diseñar el conjunto para tener la frecuencia lo más bajo posible. Cuanto menor es la frecuencia de resonancia, más estrecha es la base del pico resultante y más rápido se atenúan las vibraciones a frecuencias más altas. Aunque para ello se necesitan carreras totales más largas. Por esto las frecuencias típicas de los asientos se encuentran alrededor de los 1.5 Hz.

Otros modelos se utilizan para los asientos con suspensión neumática que se rigen por la siguiente ecuación:

$$F_{airspring} = \frac{P_0 V_0^\kappa A}{V_{(x,y)}^\kappa} - (P_A)A \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde P es la presión de aire, V es el volumen de aire correspondiente de x e y, κ el calor específico, P_0 la presión inicial, V_0 el volumen inicial, A el área efectiva de la cámara de aire, P_A la presión ambiente y g la gravedad de la tierra.

Este sistema proporciona mejor confort a los conductores y se ha adoptado en entornos de alto contenido vibratorio (debido al comportamiento no lineal del muelle de aire que permite menores amortiguamientos de fricción en el amortiguador viscoso).

4.1.3.2 Modelos de varios grados de libertad.

A partir del modelo de un grado de libertad, del cual se puede extraer mucha información sobre el comportamiento dinámico de los asientos, el modelo se puede completar para intentar obtener resultados en la simulación similares a resultados reales.

En la Figura 4.1.21 se muestra el modelo simplificado de dos grados de libertad.

Figura 4.1.21 Modelo de dos grados de libertad incluyendo el modelado de los topes (Boileau 2004).

Para completar el modelo habría que incluir el modelo del maquinista, que puede ser simulado en el laboratorio mediante un dummy antropométrico.

En las Figura 4.1.22 y Figura 4.1.23 se muestra el modelo desarrollado por (Gunston y Griffin 2004) teniendo en cuenta la linealización del cuerpo del maquinista y las ecuaciones de movimiento.

Figura 4.1.22. Modelo de varios grados de libertad según (Gunston y Griffin 2000).

$$F_{bb} = \begin{pmatrix} fd_{bb1} \cdot z_{bb}^5 + fd_{bb2} \cdot z_{bb}^4 + fd_{bb3} \cdot z_{bb}^3 \\ + fd_{bb4} \cdot z_{bb}^2 + fd_{bb5} \cdot z_{bb} + fd_{bb6} \end{pmatrix} \cdot n_{bb}$$

$$\text{otherwise: } F_{bb} = 0$$

$$ll = \sqrt{b_h^2 + b_v^2}$$

$$\theta_c = \arcsin\left(\frac{b_v + \frac{travel}{2}}{ll}\right)$$

$$\theta = \arcsin\left(\frac{b_v + offset + z_{sb}}{ll}\right)$$

$$z_{tb} = \cos(\theta_c) \cdot ll - \cos(\theta) \cdot ll$$

Ecuación 23

Figura 4.1.23. Ecuación del movimiento del modelo de varios grados de libertad (Gunston y Griffin 2000).

$$\text{otherwise:}$$

$$F_c = -(m_1 + m_0) \cdot g$$

$$\phi = \arctan\left(\frac{d_v + offset + z_{sb}}{d_h}\right)$$

$$\dot{z}_d = \dot{z}_{sb} \cdot \sin(\phi)$$

$$F_{ks} = k_s \cdot z_{sb} + k_d \cdot z_{sb} \cdot \sin(\phi)$$

$$\text{if } \dot{z}_d < 0.1:$$

$$F_{cs} = (c_{s1} \cdot |\dot{z}_d|^2 + c_{s2} \cdot |\dot{z}_d|^3) \cdot \text{sgn}(\dot{z}_d)$$

$$\text{otherwise:}$$

$$F_{cs} = ((|\dot{z}_d| - 0.1) \cdot c_{s3} + c_{s4}) \text{sgn}(\dot{z}_d)$$

$$z_{bb} = -\left(\frac{travel}{2} + offset\right) - z_{sb}$$

$$\text{if } z_{bb} > 0:$$

Ecuación 24

$$\ddot{f}_{mag} = (f_{rs} + f_{r_{dup}} \cdot \sin(\phi)) \cdot \text{sgn}(\dot{z}_{sb})$$

$$\text{otherwise:}$$

$$\ddot{f}_{mag} = (f_{rs} + f_{r_{ddn}} \cdot \sin(\phi)) \cdot \text{sgn}(\dot{z}_{sb})$$

$$\text{if } |F_{reqlock} - F_{s2}| > f_{mag}:$$

$$F_s = F_{s2} - f_{mag} \text{ if}$$

$$\text{otherwise: } F_s = F_{reqlock}$$

Ecuación 25

$$\ddot{x}_s = \frac{F_s}{m_s}$$

$$\ddot{x}_0 = \frac{F_c - F_1}{m_0}$$

$$\ddot{x}_1 = \frac{F_1}{m_1}$$

Estos modelos sirven para el estudio de los fenómenos que se producen en el asiento ocupado por el conductor como se observa en la Figura 4.1.24, cuando son excitados por vibraciones controladas en un laboratorio.

Figura 4.1.24. Respuesta del asiento medida (sólido) y calculada (discontinua) en ensayos (Smith, y Bowden 2008).

El modelo es capaz de predecir la transmisibilidad del asiento SEAT con un error del 16% en todas las magnitudes. Tiende a sobreestimar el efecto de la fricción y subestimar los impactos moderados con los topes fin de carrera.

Stein y otros (Rakheja y Boileau 2003; Stein y Ballo 1991; Stein, Mucka, y Clément 2004; Stein, Záhoranský, y Múčka 2004; Stein y Múčka 2005) han estudiado en detalle las no linealidades del modelo asiento conductor especialmente el modelo vertical utilizando los modelos de conductor sentado definidos en la norma ISO 5982 (2001) y la norma DIN 45676 (2003) (véase Figura 4.1.25 y Figura 4.1.26). La conclusión es que los modelos biodinámicos lineales dan peores resultados que la masa inerte cuando se comparan las medidas de ensayos contra los parámetros calculados, aunque se obtienen buenas correlaciones. Sin embargo, los modelos utilizados sirven para optimizar el confort del maquinista y poder mejorar los asientos por parte del fabricante.

Figura 4.1.25. Modelo del Asiento /con amortiguamiento viscoso y de fricción)- conductor según (a) ISO 5982; (b) DIN 45676 (c) Masa inerte.(Stein y Ballo 1991)

Figura 4.1.26. Resultado de la simulación vs datos medidos en ensayos (a) ISO 5982; (b) DIN 45676 (c) Masa inerte.(Stein, Mucka, y Clément 2004)

Tabla 4-1. Valores simulados de RMS y SEAT según distintas normativas.(Rakheja y Boileau 2003)

Test #							
Human body model	Mean	Inert mass	DIN 45676	ISO 5982	Mean	Inert mass	DIN 45676
RMS a_b (m/s ²)	0.954	0.954	0.954	0.954	1.064	1.064	1.064
a_{wb} (m/s ²)	0.688	0.688	0.688	0.688	0.769	0.769	0.769
RMS a_s (m/s ²)	0.631	0.593	0.510	0.464	0.627	0.616	0.541
a_{ws} (m/s ²)	0.421	0.392	0.331	0.309	0.414	0.404	0.348
SEAT factor (1)	0.613	0.569	0.480	0.449	0.539	0.526	0.453
E (%)	-	-7.7	-27.7	-36.5	-	-2.5	-19.0
D_{zext} (mm)(2s)	44.48	45.09	41.80	40.90	64.28	60.33	55.59
ϵ (%)	-	+1.4	-6.4	-8.7	-	-6.5	-15.6
RMS D_z (mm)	4.09	4.02	3.74	3.68	5.21	4.67	4.38

4.1.4 Conclusiones sobre el sistema dinámico asiento- conductor.

En este capítulo se han revisado los asientos que se pueden utilizar en las cabinas de los vehículos ferroviarios.

Los componentes utilizados en el diseño de estos asientos, mecanismos de suspensión y anclajes, los muelles de suspensión los amortiguadores, los topes de la suspensión y propio cojín presentan comportamiento no lineal.

Existen modelos matemáticos que han servido para la optimización de asientos y un perfeccionamiento del diseño de los mismos.

Algunos estudios coinciden en que las medidas realizadas sobre asientos en laboratorios no son una buena base para predecir el comportamiento en campo (Hauck 2001). Las razones pueden ser debidas a las no linealidades debidas a la fricción (para magnitudes de vibración bajas) y a los impactos con los topes final de carrera.

Wu y Griffin (Wu y Griffin 1997)definieron 5 estados de la suspensión dependiendo de la magnitud de la vibración:

1. Estado 1 Magnitud baja, el asiento está bloqueado.
2. Estado 2: cuando la magnitud crece el asiento se libera produciéndose pequeñas sacudidas que aumentan la transmisibilidad y el factor SEAT.
3. Estado 3: cuando la vibración es mayor, se reduce la importancia del rozamiento y la transmisibilidad y el factor SEAT decrecen.
4. Estado 4: al continuar aumentando la magnitud de la vibración se agota la carrera de la suspensión, alcanzando el tope.
5. Estado 5; se agota la pequeña carrera del tope disparándose los valores del factor SEAT y la transmisibilidad.

Parece necesario buscar un método alternativo que permita extrapolar resultados de campo a partir de un modelo que calcule la aceleración en el asiento a partir de las aceleraciones en el piso de la cabina.

4.2 Modelo de redes neuronales para el sistema dinámico asiento conductor.

Si se consigue definir un modelo que simule el comportamiento dinámico del sistema “asiento-conductor” los datos de las aceleraciones medidas en el piso de la cabina vibración en el piso de la cabina podrían ser utilizados para demostrar cual será en nivel de vibraciones que sufrirá un conductor de un vehículo ferroviario en su turno de trabajo, eliminando los importantes factores de aleatoriedad.

Principalmente el peso de los distintos conductores que realizan las pruebas, y el comportamiento de los mismos, (movimientos impulsivos, modificación de la posición en el asiento) producen alta variabilidad en las medidas. En ocasiones se pueden confundir con impactos y choques. Así mismo podría servir para realizar el análisis de riesgos que requiere la directiva 2002/44 para cada uno de los recorridos y cada uno de los vehículos que emplea un operador sin que fuera necesario llevar a cabo las costosas pruebas que serían requeridas en todos estos casos.

Este enfoque ha sido tratado por algunos autores (Matthew 2004; Ji 2015; Guclu y Gulez 2008) con resultados que pueden ser utilizados para el proceso de diseño. Sin embargo, aunque existen estudios que han pretendido modelizar matemáticamente el comportamiento del asiento, en general no se han obtenido buenos resultados a la hora de comparar las mediciones reales en vía mediante cojines con acelerómetros y los cálculos realizados mediante simulaciones que puedan servir para obtener conclusiones de cara a la certificación. Uno de los principales problemas deriva del comportamiento altamente no lineal de los asientos debido a la geometría de la suspensión del asiento, los rozamientos existentes, las holguras, los topes y cierto tipo de amortiguadores. Por ello, puede resultar interesante utilizar otro método que permita calcular las aceleraciones que se dan en la interfaz asiento- conductor, a partir de las aceleraciones que se presenten en el piso de la cabina.

En la literatura se comprueba que las redes neuronales se utilizan, entre otras aplicaciones, para la detección de fallos en sistemas en los que tanto las características temporales o espectrales de algún parámetro del sistema bajo estudio, así como sus límites admisibles, pueden medirse o conocerse con suficiente exactitud, bien cualitativa, bien cuantitativamente. Así, por ejemplo, las redes neuronales se utilizan en la detección de fallos en sistemas vibratorios (por ejemplo, rodamientos o cojinetes), donde la firma espectral –medida en órdenes respecto a la velocidad de giro del árbol- de la vibración axial o radial en caso de fallo es fácilmente determinable. También se utilizan en el control de calidad en líneas de producción, donde también es asumible

la determinación de la firma temporal o espectral de algún parámetro clave del producto, como la composición química o dimensiones características, en caso de fallo. Se utilizan también, por ejemplo, en la detección de eventos en aceleradores de partículas o el reconocimiento de voz, donde también es posible una comparación de parámetros medidos con parámetros patrón.

Por ello, parece razonable pensar que en aplicaciones como la que aborda esta tesis también puedan utilizarse. Se investiga, pues, la posibilidad de utilización de redes neuronales para la predicción de la vibración recibida en el asiento del conductor, entrenadas a partir de la selección y tratamiento de datos de vibración en el piso de la cabina obtenidos en el proceso de homologación dinámica del vehículo.

4.2.1 Redes neuronales. Fundamentos teóricos.

Debido a su constitución y a los fundamentos en los que se basa, las redes neuronales artificiales presentan un gran número de características similares a las del cerebro como se observa en la Figura 4.2.1. Por ejemplo, estas redes son capaces de aprender de la experiencia, de generalizar a partir de casos ya aprendidos y aplicar los conocimientos a casos nuevos, o de poder extraer características esenciales a partir de entrada que representen información irrelevante. Las ventajas que proporcionan este tipo de técnica es el de la aprendizaje adaptativo, auto organización, tolerancia a fallos y operación en tiempo real; además debido al enorme volumen de datos que se tienen de los ensayos dinámicos de homologación, las técnicas basadas en redes neuronales constituyen un método ideal para el tratamiento de estos datos (Hilera y Martinez Hernando 1995)

Figura 4.2.1 Concepto de red neuronal (Hilera y Martinez Hernando 1995).

Las redes neuronales se organizan en una serie de capas (entrada, salida y capas ocultas) compuestas a su vez de un número determinado de neuronas en función de los datos a obtener.

Cada neurona es una entidad matemática compuesta de unas entradas (inputs), unos pesos sinápticos amplificadores o atenuantes de dichas entradas, un operador suma o producto de entradas, un offset y una función de transferencia que da como resultado una señal de salida (outputs). Esta señal de salida se compara con la señal correcta introducida previamente y se calcula el error cuadrático medio cometido hasta llegar a unas condiciones de convergencia determinadas en la fase de entrenamiento de la red.

Las técnicas basadas en redes neuronales utilizan distintos algoritmos para la obtención de los modelos deseados en función de los datos disponibles y del entrenamiento de la red. El algoritmo Backpropagation, usado para la obtención de las redes neuronales en este caso, es un método clásico de entrenamiento de redes cuando se trata de un caso de aprendizaje con supervisión. El error cuadrático medio se considera como función de los pesos, y por ello se calculan las derivadas de la función error con respecto a ellos.

Una vez que se ha aplicado un patrón a la entrada de la red como estímulo, este se propaga desde la primera capa a través de las capas superiores de la red, hasta generar una salida. La señal de salida se compara con la salida deseada y se calcula una señal de error para cada una de las salidas. Las salidas de error se propagan hacia atrás, partiendo de la capa de salida, hacia todas las neuronas de la capa oculta que contribuyen directamente a la salida. Sin embargo, las neuronas de la capa oculta solo reciben una fracción de la señal

total del error, basándose aproximadamente en la contribución relativa que haya aportado cada neurona a la salida original. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido una señal de error que describa su contribución relativa al error total.

La importancia de este proceso consiste en que, a medida que se entrena la red, las neuronas de las capas intermedias se organizan a sí mismas de tal modo que las distintas neuronas aprenden a reconocer distintas características del espacio total de entrada. Después del entrenamiento, cuando se les presente un patrón arbitrario de entrada que contenga ruido o que esté incompleto, las neuronas de la capa oculta de la red responderán con una salida activa si la nueva entrada contiene un patrón que se asemeje a aquella característica que las neuronas individuales hayan aprendido a reconocer durante su entrenamiento.

En este apartado se van a describir las técnicas de análisis y simulación de datos basadas en redes neuronales, los cuales se van a utilizar para la simulación de las vibraciones a las que se ven sometidos los conductores de vehículos ferroviarios en su puesto de trabajo. Este método de evaluación y simulación se plantea como una alternativa a los ensayos dinámicos en laboratorio de los asientos, suponiendo esto un gran ahorro en costes al poder aprovechar para la medición de estas aceleraciones las tomadas durante la homologación de los vehículos con el fin de poder conocer estos niveles vibratorios en cualquier tramo por el que se circula.

4.2.1.1 Ventajas de las redes neuronales.

Debido a su constitución y a los fundamentos en los que se basa, las redes neuronales artificiales presentan un gran número de características similares a las del cerebro. Por ejemplo, estas redes son capaces de aprender de la experiencia, de generalizar a partir de casos ya aprendidos y aplicar los conocimientos a casos nuevos, o de poder extraer características esenciales a partir de entrada que representen información irrelevante. Debido a esto, las redes neuronales artificiales (RNA) ofrecen numerosas ventajas que hacen que esta tecnología se esté aplicando en varias áreas del conocimiento y que también son la razón por la cual se han utilizado en este trabajo.

Entre estas ventajas se encuentran:

Aprendizaje adaptativo

Las redes son capaces de aprender a realizar tareas basadas en un entrenamiento o en una experiencia inicial. Como las redes neuronales son capaces de aprender a diferenciar patrones mediante ejemplos y entrenamientos, no es necesaria la elaboración previa de modelos ni la necesidad de especificar funciones de distribución de probabilidad.

Las redes neuronales son sistemas dinámicos autoadaptativos, debido a la capacidad de autoajuste de los elementos procesadores (neuronas) que componen el sistema y a que son capaces de estar sufriendo constantes cambios para poder adaptarse a las nuevas condiciones.

En el proceso de aprendizaje, los enlaces ponderados de las neuronas se ajustan de manera que se consigan unos resultados específicos; las RNA no necesitan un algoritmo que les permita resolver un problema, ya que pueden generar su propia distribución de pesos en los enlaces mediante una etapa de aprendizaje.

La responsabilidad del diseñador recae por tanto en la introducción de los inputs necesarios para desarrollar un buen algoritmo de aprendizaje.

Auto-organización.

Las RNA emplean su capacidad de aprendizaje adaptativo para organizar por de manera automática la información que reciben durante el entrenamiento. Mientras que el aprendizaje consiste en la modificación de

cada elemento procesador, la auto-organización es la modificación de la red neuronal completa para llevar a cabo un objetivo específico.

Cuando las redes tienen misiones de reconocimiento de patrones, organizan automáticamente la información usada. Por ejemplo, esto ocurre en las llamadas redes backpropagation, utilizadas en esta tesis para la simulación de las vibraciones.

Esta capacidad de organización es la responsable de que las RNA puedan generalizar de manera que puedan responder apropiadamente ante situaciones a las que no habían sido expuestas anteriormente.

Esta característica es muy importante cuando se tienen que solucionar problemas en los cuales la información de entrada no es muy clara e incluso permite que el sistema pueda dar una solución, aunque la información de entrada este especificada de una forma incompleta como es el caso de los modelos no lineales.

4.2.1.2 Elementos constitutivos de una red neuronal artificial.

De la misma manera que el cerebro está constituido por neuronas, la unidad básica constituyente de la red neuronal es el nodo (neurona o elemento de procesado). Un nodo es un elemento de cálculo interconectado con otros muchos elementos, imitando las sinapsis nerviosas. A un nodo llegan conexiones desde otras muchas neuronas y en general proporcionan una única salida.

De acuerdo con los valores que pueden tomar las neuronas, se clasifican en dos tipos principales:

- Neuronas binarias. Las cuales solo pueden tomar valores dentro del intervalo (0 ,1) o (-1, 1).
- Neuronas reales. Pueden tomar valores dentro del rango [0 ,1] o [-1, 1].

En la siguiente figura se muestra un esquema representativo de una neurona artificial:

Figura 4.2.2 Neurona artificial.(Hilera y Martinez Hernando 1995)

Los elementos que forman las neuronas son los siguientes:

- Entradas (x_i). La neurona trata a los distintos valores de entrada como si fueran uno solo, el cual recibe el nombre de entrada global. Estas entradas simples se combinan con los pesos sinápticos de la neurona posteriormente.

- Enlaces de conexión. Parametrizados por los pesos sinápticos (w_{ij}).

Dependiendo de si el peso es positivo o negativo, la conexión puede ser excitadora o inhibidora respectivamente.

- Sumador. Suma las componentes de las señales de entrada ponderadas con los pesos w_{ij} . Se denomina también función de entrada y pueden ser de un tipo distinto al sumatorio, como puede ser el productorio de las entradas ponderadas o el máximo de las entradas ponderadas.

- Umbral (θ_i). Desplaza la entrada una determinada cantidad.

- Función de transferencia (f). Se necesita una regla que combine las entradas con el estado actual de la neurona para producir un nuevo estado de salida. Esta función produce un nuevo estado a partir del existente y de la combinación de las entradas con los pesos de las conexiones.

4.2.1.3 Arquitectura de una red neuronal

La topología de una red neuronal consiste en la organización y disposición de las neuronas en la misma, formando capas o agrupaciones de neuronas más o menos alejadas de la entrada y la salida de dicha red. En este sentido los parámetros fundamentales de la arquitectura de la red son el número de capas, el número de neuronas por capa, el grado de conectividad y el tipo de conexiones entre neuronas.

La distribución de las neuronas en una red se realiza formando niveles o capas, con un número determinado de dichas neuronas en cada una de ellas, como se refleja en la Figura 4.2.3.

- Salidas (y_i). Son los valores que arroja la neurona en su última etapa. Si la función de transferencia está por debajo un umbral determinado, ninguna salida se transmite a la neurona siguiente.

Figura 4.2.3. Capas existentes en una red neuronal. (Hecht-nielsen 1992)

A partir de su situación dentro de la red, se pueden distinguir tres tipos de capas:

- Capa de entrada. Es la capa que recibe directamente la información del exterior de la red.
- Capas ocultas. Son capas internas de la red y no tiene contacto directo con el entorno exterior. El número de capas ocultas puede ser variable o incluso no existir y las neuronas pertenecientes a esta pueden estar conectadas de distintas maneras, lo que determina las distintas topologías de las redes neuronales.
- Capa de salida. Transfieren la información de la red hacia el exterior.

Hay que señalar que el número de conexiones entre neuronas es mayor que el número de neuronas en sí; en ese sentido, se dice que una red está totalmente conectada cuando todas las salidas de un nivel llegan a todos y cada uno de los nodos del nivel siguiente.

4.2.1.4 Conectividad entre neuronas.

La conexión entre los nodos de una red neuronal está relacionada en que las salidas de las neuronas están canalizadas para convertirse en las entradas de las demás neuronas o de ellas mismas (retroalimentación).

Estas conexiones tienen asociado un peso que es el encargado de que la red adquiera conocimiento. Una neurona recibe un conjunto de señales que le informan del estado de todas las neuronas a las que se encuentra conectada.

La conexión de esta neurona con las demás está ponderada por unos pesos w_{ij} (que representa la sinapsis entre la neurona i y la neurona j) y la entrada es la suma del producto de cada señal individual por el valor de la sinapsis w_{ij} que conecta ambas neuronas.

En la figura, W es una matriz que recoge todos los pesos y es un conjunto formado por elementos positivos, negativos y nulos; según el valor que adquieran estos pesos (positivos, negativos o nulos) significa que la conexión entre neuronas es excitadora (peso positivo), inhibidora (negativo) o que no existe conexión entre neuronas (peso nulo).

4.2.1.5 Estructura de los datos.

En general se pueden clasificar los datos de entrada a una red neuronal en dos grupos:

- Concurrentes. Los datos se introducen al mismo tiempo sin seguir una secuencia particular; por lo que el orden de introducción no es importante.
- Secuenciales. Los datos forman parte de una serie temporal y por tanto el orden sí que influye a la hora de introducir estos.

Figura 4.2.4. Ejemplo de conexión entre neuronas en una RNA de tres capas. Entrenamiento de una red neuronal. (Demuth et al. 2014)

La parte más importante de una red neuronal artificial es el aprendizaje, ya que este determina el tipo de problema que la red será capaz de resolver. Los sistemas de aprendizaje están basados en ejemplos, por lo que la capacidad de la red estará ligada de alguna forma al tipo de ejemplos de los que dispone en el proceso de aprendizaje.

El conjunto de ejemplos debe de poseer las siguientes características:

- Ser significativos. Debe de tener un número suficiente de ejemplos para que los pesos se adapten de una forma eficaz.

- Ser representativos. Debe de haber el mismo número de ejemplos de cada tipo para que la red se adapte de forma general. Si se le introduce un mayor número de ejemplos de un cierto tipo, la red se especializa en ese subconjunto y pierde generalidad. A este fenómeno se lo conoce como “sobreentrenamiento” (overfitting).

El aprendizaje de una red trata fundamentalmente en ajustar los valores de los pesos precisos para todas sus conexiones; para ello se introducen ejemplos y se ajustan los pesos hasta llegar a un cierto criterio de convergencia. Este criterio adoptado dependerá del problema y de la red y su finalización se puede determinar mediante los siguientes parámetros:

- Número de ciclos. Se decide cuántas veces serán introducidos los ejemplos; una vez hecho, se detiene el proceso y se da por aceptada la información resultante.

- Error cometido. En un primer momento se define una función de error, se decide un valor aceptable para este y el proceso solo se detiene cuando la red produce un valor de error menor al prefijado.

- Relevancia en la modificación de pesos. Existen modelos de redes neuronales en los cuales las conexiones entre neuronas se van modificando cada vez con menor intensidad, hasta llegar a un momento en el que no se producen variaciones de los valores de los pesos sinápticos. En este momento la red converge y se detiene el proceso de aprendizaje.

Un aspecto importante de la etapa de aprendizaje de las redes neuronales es saber cómo se modifican los valores de los pesos, es decir, cuáles son los criterios que se siguen para cambiar el valor asignado a las conexiones cuando se quiere que la red aprenda una nueva información. La fórmula general del cambio de valor de los pesos sinápticos es la forma:

$$w_{ij}(t + 1) = w_{ij}(t) + \Delta w_{ij}(t) \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde t hace referencia a la etapa de aprendizaje y $(t + 1)$ al valor actualizado. En cuanto a los métodos de aprendizaje de la red, existen dos tipos claramente diferenciados: el aprendizaje supervisado y el no supervisado.

Otro criterio que se puede utilizar para diferenciar las reglas de aprendizaje se basa en considerar si la red puede aprender durante su funcionamiento habitual (aprendizaje on line) o si el aprendizaje supone la desconexión de la red hasta que el proceso termina (aprendizaje off line).

Cuando el aprendizaje es off line, se distingue entre una fase de entrenamiento y una fase de operación, existiendo un conjunto de datos de entrenamiento y un conjunto de datos de prueba que serán utilizados en la correspondiente fase. Además, los pesos de las conexiones permanecen fijos posteriormente a la finalización de la etapa de entrenamiento de la red. Debido a su carácter estático, estos sistemas no presentan problemas de estabilidad en su funcionamiento.

4.2.1.6 Aprendizaje supervisado.

En este tipo de aprendizaje las entradas se introducen como pares de datos (inputs y targets) y de esta forma las salidas de la red se comparan con los targets, ajustando los pesos y los umbrales hasta que las salidas se acerquen lo máximo a dichos targets. Este tipo de aprendizaje se subdivide en otros tres, cuya diferencia radica en cómo se lleva a cabo esta supervisión:

- Aprendizaje por corrección del error. Algoritmo backpropagation.
- Aprendizaje por refuerzo.
- Aprendizaje estocástico.

El aprendizaje por corrección de error es el modo más común de aprendizaje de las redes neuronales. Cada caso del conjunto está constituido por las variables de entrada (inputs) y la salida o salidas que se desean de la red (variables objetivo o targets). El ajuste de los pesos se realiza en función de la diferencia entre los valores deseados y los que se obtuvieron en la salida de la red.

La regla delta generalizada modifica los nodos cada vez que una observación, que será elegida de un modo aleatorio, es presentada a la red, y lo hace siguiendo un orden determinado, empezando por los nodos que conectan la última capa oculta con la capa de salida y finalizando en los que unen la capa de entrada con la primera capa oculta.

En la Figura 4.2.5 se muestra un esquema del proceso de aprendizaje:

Figura 4.2.5. Diagrama de flujo de entrenamiento. (Hilera y Martinez Hernando 1995)

La modificación de los pesos busca disminuir la función de error hasta hallar un mínimo de dicha función. Si el error es una función lo suficientemente suave, basta con buscar un mínimo local. Se modifican los pesos en función de la derivada del error con respecto al peso que se desea actualizar.

Aprendizaje de propagación hacia atrás (Backpropagation)

Esta es la primera regla de aprendizaje que permitió realizar cambios sobre los pesos en las conexiones de la capa oculta. Este algoritmo es la generalización de la regla de entrenamiento delta aplicada a redes de múltiples capas y funciones de transferencia no lineales, por lo que es interesante para el problema vibratorio no lineal que ocurre en los asientos de los vehículos ferroviarios, ya que las redes backpropagation con los umbrales, una función de transferencia sigmoidea seguida por una salida lineal es capaz de aproximar cualquier función con un número finito de discontinuidades.

Se trata de un aprendizaje supervisado por corrección del error y consiste en tratar de minimizar una cierta función del error que comete la salida proporcionada por la red con respecto al valor deseado de la variable objetivo, por regla general proporcional al error cuadrático medio. Para ello se busca un extremo relativo de esa función, considerada como función de los pesos, esto es, un punto donde todas las derivadas parciales de la función error respecto a los pesos se anulan.

El algoritmo de Backpropagation es un método clásico de entrenamiento de redes cuando se trata de un caso de aprendizaje con supervisión. El error cuadrático medio se considera como función de los pesos, y por ello se calculan las derivadas de la función error con respecto a ellos.

Una vez que se ha aplicado un patrón a la entrada de la red como estímulo, este se propaga desde la primera capa a través de las capas superiores de la red, hasta generar una salida. La señal de salida se compara con la salida deseada y se calcula una señal de error para cada una de las salidas. Las salidas de error se propagan hacia atrás, partiendo de la capa de salida, hacia todas las neuronas de la capa oculta que contribuyen directamente a la salida. Sin embargo, las neuronas de la capa oculta solo reciben una fracción de la señal total del error, basándose aproximadamente en la contribución relativa que haya aportado cada neurona a la salida original. Este proceso se repite, capa por capa, hasta que todas las neuronas de la red hayan recibido una señal de error que describa su contribución relativa al error total.

La importancia de este proceso consiste en que, a medida que se entrena la red, las neuronas de las capas intermedias se organizan a sí mismas de tal modo que las distintas neuronas aprenden a reconocer distintas características del espacio total de entrada. Después del entrenamiento, cuando se les presente un patrón arbitrario de entrada que contenga ruido o que esté incompleto, las neuronas de la capa oculta de la red responderán con una salida activa si la nueva entrada contiene un patrón que se asemeje a aquella característica que las neuronas individuales hayan aprendido a reconocer durante su entrenamiento.

4.2.1.7 Aplicaciones de las redes neuronales.

Las redes neuronales pueden utilizarse en un gran número y variedad de aplicaciones, desde ámbitos comerciales hasta militares ya que estas pueden ser desarrolladas en periodos de tiempo razonables y tiene la capacidad de realizar tareas concretas mejor que otras tecnologías.

Existen muchos tipos diferentes de redes neuronales, cada uno de los cuales tiene una aplicación particular más apropiada; algunas aplicaciones comerciales son:

- Biología
 - Investigación de las funciones cerebrales
 - Obtención de modelos de la retina
- Empresa
 - Selección de personal
 - Explotación de bases de datos
 - Reconocimiento de caracteres escritos
- Medio ambiente
 - Analizar tendencias y patrones
 - Previsión del tiempo
- Finanzas
 - Previsión de la evolución de los precios
 - Valoración de riesgo en los créditos
 - Identificación de falsificaciones
 - Interpretación de firmas
- Medicina
 - Analizadores del habla para la investigación de la audición para sordos.
 - Diagnóstico y tratamiento a partir de síntomas o datos analíticos
 - Monitorización en cirugías
 - Predicción de reacciones adversas en los medicamentos
 - Entendimiento de la causa de los ataques cardíacos
- Militares
 - Clasificación de las señales de radar
 - Optimización de recursos
 - Reconocimiento y seguimiento de objetivos
- Industria
 - Modelado de sistemas para automatización y control
 - Robótica industrial (visión artificial, sensorización, etc.)
 - Control de producción en líneas de procesos
 - Inspecciones de calidad

- Modelos no lineales

La mayoría de estas aplicaciones consisten en realizar un reconocimiento de patrones, como puede ser buscar un patrón en una serie de ejemplos, clasificación de patrones, completar una señal a partir de valores parciales o reconstruir el patrón correcto a partir de uno distorsionado. Sin embargo, está creciendo el uso de redes neuronales en distintos tipos de sistemas de control.

Desde el punto de vista de los casos de aplicación, la ventaja de las redes neuronales reside en el procesamiento de datos paralelo, adaptativo y no lineal.

Existen otros estudios y tesis en las que se han utilizado redes neuronales para modelar el comportamiento de asientos y obtener el resultado de las vibraciones del asiento a partir de las medidas en el suelo (Kolic 2004; Ji, Eger, y Dickey 2015).

5 ANALISIS EXPERIMENTAL DEL ENTORNO VIBRATORIO Y PARAMETROS DE INFLUENCIA EN LAS ACELERACIONES EN CABINA.

En los capítulos anteriores se ha demostrado que la normativa es interpretable debido a la variabilidad de los resultados obtenidos. En este capítulo se analizará el efecto de esta variabilidad de forma cuantitativa. Se observa una gran dispersión de medidas reales y cuáles serían las causas de esta dispersión.

Para ello se ha medido la aceleración en el piso de la cabina de conducción de diversas locomotoras circulando por distintas líneas y a distintas velocidades.

Se analizarán las distintas cuestiones planteadas en el capítulo 2 al considerar la normativa existente para valorar las aceleraciones desde el punto de vista de la salud.

Aunque las conclusiones no son extrapolables directamente a la aceleración que sufre el conductor de vehículos ferroviarios, las aceleraciones medidas en el piso de la cabina es la entrada al sistema dinámico formado por el asiento y el conductor. Teniendo en cuenta el comportamiento de este sistema dinámico se puede deducir como serán las aceleraciones en la interfase asiento conductor.

Según los factores SEAT y la transmisibilidad indicada en el capítulo 4, en el que se observa que es cercana a 1, se puede considerar que las aceleraciones en el cojín serán al menos del mismo orden de magnitud que las aceleraciones medidas en el piso de cabina.

En el capítulo 7 se validará esta hipótesis, pero las conclusiones de este capítulo servirían para extrapolar cuales son las características y los parámetros de influencia de las vibraciones en el puesto de conducción excluyendo el asiento.

5.1 Metodología empleada

Para análisis realizado en este capítulo se han tomado medidas de las aceleraciones presentes en las cabinas de conducción de diferentes locomotoras. En muchas de las ocasiones se han aprovechado las salidas de pruebas realizadas en la homologación de los vehículos para adquirir estas señales.

En general se trata de cabezas motrices eléctricas para remolcar pasajeros que pueden circular a altas velocidades siempre y cuando la calidad de la vía se corresponda con la velocidad,

La cadena de medida está compuesta por acelerómetros 8304B2 de KISTLER que están unidos mediante alargaderas a una estación central de adquisición central tipo SAT 2000. Los giros que se miden mediante giróscopos y en algunos casos están calculados a partir de las señales de dos acelerómetros situados en el mismo plano.

Figura 5.1.1 Posicionamiento de los acelerómetros en el piso de cabina

La Figura 5.1.2 da una visión de la cadena de medida, adquisición y procesamiento de las diferentes magnitudes medidas durante los ensayos.

Figura 5.1.3 Esquema de la cadena de medida, adquisición y procesamiento de las señales.

El sistema de coordenadas empleado en las cabezas motrices es el definido en la norma UNE-EN-14363 (Figura 5.1.4).

La velocidad es medida a partir de la señal de pulsos del equipo de antibloqueo y las curvas a partir de un giróscopo situado en el una de las rodaduras de los coches intermedios.

Amplificación y filtrado

Todas las señales son filtradas antes de la adquisición digital por lo menos a la mitad de la frecuencia de muestreo. Los acondicionadores son de propósito general, los cuales proporcionan la alimentación al transductor, acondicionan la señal, y tienen filtros de salidas de 4 polos de Butterworth a 10 Hz y otro paso alto a 0.4 Hz. También han sido utilizados filtros adicionales externos de 4 polos de Butterworth con frecuencias de corte 250, Hz, utilizados normalmente en las medidas para la homologación dinámica. Según lo indicado en el capítulo 3, para el análisis de las vibraciones desde el punto de vista de la salud es suficiente ya que la mayor parte de las aceleraciones que producen efecto en la salud se encuentran en el rango entre 0 y 20 Hz.

Figura 5.1.4. Ejes de coordenadas.

Registro de las señales medidas

Todas las señales medidas son registradas digitalmente con un sistema de registro por disco duro. El registro se efectuó con una frecuencia de muestreo de 250 Hz. Salida de las señales medidas en registradores en línea. Una parte de las señales medidas se registraron en papel, en línea, utilizando registradores del tipo Gould TA-11, Gould TA-4000 y YOKOGAWA OR1400. Los registradores en papel fueron usados solo para evaluaciones durante la ejecución de los ensayos. Las evaluaciones documentadas en este informe final no utilizan dichos registros en papel.

Calibración

La cadena de medición consta de partes calibradas. Los amplificadores y el sistema de registro fueron configurados de acuerdo a los valores de sensibilidad obtenidos en dichas calibraciones. El procesamiento de los datos se realizó con el programa de análisis DATATEST desarrollado específicamente por la compañía Cetecom (Málaga, España), usando como plataforma el programa HP-VEE de Hewlett-Packard. Posteriormente mediante el uso de programas desarrollados en MATLAB 7.0 se han filtrado las señales según los filtros indicados en la normativa ISO, UIC o EN, y se han calculado los estadísticos estipulados en estas normativas.

5.2 Tramos medidos y localización de los ensayos.

Las pasadas de ensayo utilizadas en el presente análisis se han realizado en las líneas y tramos indicados en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1 Líneas de ensayo

Tipo vehículo	LINEA							Total
	1	2	3	4	5	6	7	
Vehículo 3		12			1	7	15	35
Vehículo 2			26		12			38
Vehículo 1	14	79		197	60	16		366
Total	14	91	26	197	73	23	15	439

Línea 1 (Figura 5.2.1): es una línea de velocidad de 220 km/h con una calidad entre media y buena y bastante rectas. El ancho de vía es de 1668 mm. En la Figura 5.2.1 se muestra un ejemplo de la velocidad en cada punto kilométrico y las curvas medidas mediante un giróscopo según el eje vertical

Figura 5.2.1. Línea 1: perfil de velocidad y curvas por punto kilométrico (elaboración propia)..

Línea 2 (Figura 5.2.2): este tramo se caracteriza por poseer numerosas curvas de entre 400 y 600 metros de radio y de ancho 1668 mm. La calidad de vía según las distintas partes del tramo puede ser QN1, QN2, QN3 aproximándose razonablemente a lo recomendado en la ficha UIC 518, anexo E (50%, 40%, 10%) para el análisis de la calidad de marcha. La velocidad de la vía es de 120km/h.

Figura 5.2.2. Línea 2: perfil de velocidad y curvas por punto kilométrico (elaboración propia).

Línea 3 (Figura 5.2.3): es una línea de Alta Velocidad, En este tramo se puede analizar el comportamiento del vehículo en rectas y las curvas de radio muy grande. El ancho de la vía es 1435 mm. Se pueden alcanzar velocidades de hasta 350 km/h. La calidad de la vía es muy buena, calificándose como QN1.

Figura 5.2.3. Línea 3: perfil de velocidad y curvas por punto kilométrico (elaboración propia).

Línea 4 (Figura 5.2.4): En este tramo se pueden analizar las rectas y curvas de radio grande para el ancho 1668 mm. La calidad de vía según las distintas partes del tramo puede ser QN1, QN2, QN3 aproximándose razonablemente a lo recomendado en la ficha UIC 518, anexo E (50%, 40%, 10%) para el análisis de la calidad de marcha. La velocidad de la vía es de 220 km/h.

Figura 5.2.4. Línea 4: perfil de velocidad y curvas por punto kilométrico (elaboración propia).

Línea 5 (Figura 5.2.5): es una línea de Alta Velocidad, En este tramo se puede analizar el comportamiento del vehículo en rectas y las curvas de radio grande. El Ancho de la vía es 1435 mm. Se pueden alcanzar velocidades de hasta 300 km/h. La calidad de la vía es buena, calificándose como QN1.

Figura 5.2.5. Línea 5: perfil de velocidad y curvas por punto kilométrico (elaboración propia).

Línea 6 (Figura 5.2.6): En este tramo se puede analizar el comportamiento del vehículo las curvas de entre 250 y 400 metros de radio. EL ancho de la vía es 1668 mm. La gran mayoría de secciones tiene una calidad de vía peor que QN2. Por lo tanto, en este tramo es imposible aproximarse a la distribución recomendada por la ficha UIC 518, anexo E. Se pueden encontrar secciones con valores excesivamente altos de desviación típica de las alineaciones verticales y laterales. La distribución de calidades de vía se puede considerar que el 95%, o más, de las secciones se encuentran en la clasificación QN2 - QN3. La velocidad de la línea es de 90 km/h

Figura 5.2.6. Línea 6: perfil de velocidad y curvas por punto kilométrico (elaboración propia).

Línea 7: es una línea de Alta Velocidad, El Ancho de la vía es 1435 mm y la calidad QN1.

En muchas ocasiones, aunque el vehículo tenga una velocidad de diseño superior, la velocidad del ensayo está limitada por el trazado de la vía. En vías con muchas curvas y radios medios y pequeños la velocidad será menor a la del vehículo. También en tramos con mala calidad de vía, defectos importantes o limitaciones de seguridad por circunstancias debidas a la infraestructura la velocidad del vehículo se ve reducida

Hay que resaltar que, al tratarse de medidas realizadas durante el proceso de homologación, algunas de las pasadas analizadas se realizan a una velocidad un 10% superior a la velocidad nominal del vehículo como indica la UIC 518 y la EN 14363. Lo mismo sucede al circular por curvas a una aceleración lateral no compensada un 10% superior a la de diseño del vehículo.

5.3 Análisis de los datos.

A continuación, se analizan los valores obtenidos al medir las aceleraciones en las cabinas de conducción. Principalmente se analizarán los datos obtenidos para un tipo de vehículo, que ha circulado por las líneas anteriores con distinto rango de velocidades. El objetivo sería comprobar que tipo de medición garantiza que las aceleraciones están dentro de un límite. Posteriormente se incluyen otros tipos de vehículos para ver la influencia del tipo de vehículo

5.3.1 Características de las aceleraciones en el piso de cabina.

En la Figura 5.3.1 se representa la aceleración vertical lateral eficaz (o R.M.S) ponderada. Se han utilizado los filtros indicados por la UIC. Las mediciones se han hecho en varios tramos de distintas vías y con

distinta duración. Incluso en algún caso la velocidad en el mismo tramo varía. Todas las mediciones se han realizado sobre el mismo tipo de vehículo.

La duración de las mediciones oscila entre los 5 y los 40 minutos con una duración media de 15 minutos.

En algunos casos la velocidad supera la velocidad de diseño en un 10% que es lo que indica la normativa ferroviaria para el cálculo de la calidad de marcha.

Para comparar los datos obtenidos en la Figura 5.3.1 con los indicadores que existen en la norma habría que coger el peor de los ejes entre el vertical y horizontal, y suponer que la transmisibilidad del asiento es igual a 1 (esta última suposición supone una simplificación muy grande, pero podría valer como aproximación para analizar las tendencias).

La primera característica que se observa es que los valores en el piso son relativamente bajos. La mayor parte de los valores se encuentran muy por debajo del límite de 0.5 m/s^2 , lo que coincide con la afirmación de que los niveles vibratorios en el ferrocarril son bajos comparados con otras actividades y transportes. Pero existen ciertas mediciones en las que estos niveles se disparan. A bajas velocidades (que suele coincidir con vías de baja calidad) hay altos valores eficaces de la aceleración vertical (probablemente debido a defectos en la infraestructura con una longitud de onda pequeña). Sin embargo, en la zona de velocidad más alta, es el valor eficaz ponderado de la aceleración lateral la que se dispara (probablemente debido al paso por curvas a una velocidad mayor que la de equilibrio).

En segundo lugar, hay que resaltar la alta variabilidad que se puede obtener al realizar la medición. Dependiendo del tipo de vía y condiciones se pueden obtener valores entre 0.1 y 0.6 m/s^2 lo que hace muy difícil escoger el tramo característico que indica la normativa ISO para realizar una medición y extrapolar resultados al comportamiento del vehículo por cualquier vía.

Figura 5.3.1 Valor eficaz ponderado de las aceleraciones vertical y lateral en el piso de cabina de un vehículo ferroviario (elaboración propia).

Esta variabilidad se da incluso dentro de un tramo dado, circulando a la misma velocidad. Debido a la dinámica del vehículo (movimiento de lazo, topes etc.) en las mismas condiciones puede variar la aceleración medida en el piso de la cabina. Por lo que para extrapolar resultados habría que tener en cuenta esta variabilidad.

En un primer análisis y observando las líneas de tendencia, parece confirmarse que las aceleraciones tienden a crecer con la velocidad, pero en esta gráfica está mezcladas distintos tipos de vía por lo que puede ocurrir que para una velocidad menor las aceleraciones sean mayores porque se circular por una vía de peor calidad. De un modo general, el resumen de los datos analizados para un mismo vehículo queda reflejado en la Tabla 5-2.

Tabla 5-2. Líneas de ensayo.

	LATERAL	VERTICAL	TOTAL
	awyuR.M.S.	awzuR.M.S.	VTV
MEDIA	0.257	0.260	0.422
MEDIANA	0.255	0.245	0.398
DESVTÍPICA	0.085	0.059	0.100
S+3D	0.513	0.437	0.722
PERC 95%	0.390	0.357	0.587
MAX	0.663	0.519	0.864
MIN	0.001	0.117	0.191

Si suponemos que el asiento tiene una transmisibilidad en todos los ejes cercana a 1 las conclusiones anteriores se pueden aplicar a las aceleraciones que se dan en la interfaz conductor asiento.

5.3.2 Variabilidad de las señales.

En el apartado anterior ha quedado claro que existe una íntima relación entre el tipo de vía y las aceleraciones en el piso de cabina para un mismo vehículo. Por lo que parece necesario examinar las aceleraciones por cada vía por la que circula el vehículo.

Las Figura 5.3.2 y Figura 5.3.3 muestran el análisis estadístico de los valores eficaces ponderados para cada una de las vías por las que ha circulado el vehículo. Hay que tener en cuenta las características de cada vía descritas en el apartado 4.2

Figura 5.3.2. Diagrama de cajas del Valor eficaz ponderado de las aceleraciones verticales según la vía (elaboración propia).

Figura 5.3.3. Diagrama de cajas del Valor eficaz ponderado de las aceleraciones laterales según la vía (elaboración propia).

Las gráficas anteriores tienen en cuenta el distinto tipo de vía y tramos de la misma para obtener un resultado u otro. Se puede observar que existe una alta dispersión incluso dentro de la misma vía.

En las aceleraciones verticales tiene mucha influencia la calidad de la vía, obteniéndose valores más altos en vía de baja calidad o calidad media, aunque la velocidad de circulación sea menor. Este es el caso de la vía 2 en la que se circula a velocidades en torno a los 120 km/h con calidad de vía media (desalineaciones y defectos verticales). La vía 6 es la que posee peor calidad, pero la velocidad también es menor. En la vía 6 la velocidad es de 250 km/h o superior (solo para las pruebas dinámicas) y sin embargo presenta valores inferiores a la vía 2.

En el caso de las aceleraciones laterales se observa una mayor variabilidad de la señal, especialmente en los valores extremos (95%). Esto puede ser debido a que el comportamiento del vehículo al negociar las curvas puede variar de unas pasadas a otras. En este caso la relación entre la sinuosidad de la vía y la velocidad de circulación está limitada por el paso por curvas a una aceleración lateral no compensada determinada. Se obtienen los peores valores para vías con curvas de radio medio o grande como la vía 1 y la vía 4 (a velocidades entorno a los 220 km/h) mientras que en vías de tipo alta velocidad con tramos muy rectos (vía 5) y en vías más sinuosas a velocidades más bajas las aceleraciones medidas son menores (vía 2). Circulando por vías muy sinuosas, aunque la velocidad sea menor, la aceleración lateral vuelve a crecer.

Incluso analizando valores obtenidos en un mismo tramo circulando a la misma velocidad se obtienen variaciones de más del 50% en el eje z y de más del 300 % en el eje y según el ensayo que se escoja

Figura 5.3.4 Valor eficaz ponderado de las aceleraciones laterales y laterales en el mismo tramo de vía a la velocidad de 220 km/h (elaboración propia).

En la Figura 5.3.4 se comprueba que esta variabilidad en el comportamiento dinámico del vehículo es mucho mayor en el caso de las aceleraciones laterales que en el caso de las verticales (aunque también es variable).

5.3.3 Velocidad.

Como se ha indicado a lo largo de este trabajo y de lo que se deduce de la figura 4.3.1 parece lógico indicar que con el aumento de la velocidad aumentan las aceleraciones medidas en cabina.

Solo en el caso en el que a velocidades menores se exciten modos de vibración de la caja o el bogie, podría darse el caso de que las aceleraciones fuesen mayores.

En la Figura 5.3.5 se analizan las aceleraciones medidas en cada una de las vías según la velocidad. De donde se confirma que las aceleraciones crecen al aumentar la velocidad. Sin embargo, se puede comprobar que no crecen de la misma manera.

En vías sinuosas el crecimiento es más lento con la velocidad, ya que desde bajas velocidades se dan valores más altos de aceleración (vía 6). También se observa un crecimiento más lento en vías de radio medio y calidad media (vía 4).

Figura 5.3.5 Valor eficaz ponderado de las aceleraciones laterales y verticales frente a la velocidad y según el tipo de vía (elaboración propia).

En vías con menos curvas y mejor calidad, el aumento de las aceleraciones en la cabina en función de la velocidad tiene mayor pendiente.

Comparando las aceleraciones verticales y laterales en casi todos los casos parece que tiene mayor pendiente de crecimiento con la velocidad la aceleración lateral. Es decir, el sistema dinámico vía vehículo, que se puede considerar lineal para la dinámica vertical, aísla las aceleraciones verticales de un modo más estable. La dinámica lateral que se caracteriza por tener grandes no linealidades, es más sensible al aumento de la velocidad.

Tan solo en el caso de las vías de alta velocidad en las que no hay prácticamente curvas, el aumento de la aceleración frente a la velocidad es mayor en la dinámica vertical que en la lateral.

5.3.4 Tramo del ensayo.

Las figuras anteriores demuestran que no existe un tramo que pueda considerarse como característico o significativo como indica alguna de las normativas. El comportamiento del vehículo varía mucho de un tramo o de una vía a otra.

A lo largo de los circuitos de prueba que existen en Europa no es posible reproducir todas las condiciones que se dan en las vías por las que estos trenes pueden circular.

Por lo que para que contemplar las distintas condiciones que se dan sería necesario realizar ensayos en las distintas vías y a distintas velocidades.

Esta variabilidad está considerada en la homologación dinámica del tren según la UIC 518 o la EN 14363. Esta normativa obliga a realizar ensayos en tramos rectos, vías de radio grande, medio y pequeño y con una distribución de calidad de vía determinada. Extrayendo los datos de los distintos ensayos aplica cálculos estadísticos (percentil 95 % de los tramos medidos) para establecer dichos límites

De hecho, las características de este vehículo según esta norma en cuanto a las aceleraciones R.M.S. se muestran en la Tabla 5-3.

Tabla 5-3. Características del vehículo según la norma EN 14363. Valor R.M.S (elaboración propia).

Tipo de tramo	V. estad. (m/s ²)	
	Acel lateral	Acel vertical
Rectas	0.25/0.31	0.41/0.41
Curvas de radio amplio	0.24/0.28	0.40/0.43
Curvas de transición de radio amplio	0.30	0.38
Curvas de radio entre 400 y 600 m.	0.40	0.44
Curvas de radio entre 250 y 400 m.	0.42	0.52
Curvas de transición de radio amplio	0.33	0.49
Curvas de transición de radio entre 400 y 600 m.	0.28	0.51
Curvas de transición de radio entre 250 y 400 m.	0.31	1

Observando los valores anteriores hay que destacar que según la UIC 518 las aceleraciones laterales no están penalizadas por el factor de 1.4 que, si penaliza la UIC 513 o la ISO 2631, que tiene en cuenta los efectos sobre la salud.

Por otro lado, esto son los valores que se dan en las rectas, curvas, y curvas de transición. Para poder extrapolarlos a un recorrido tipo habría que definir cuanto tiempo se circula en por curvas, rectas, y curvas de transición. Posteriormente se podría calcular el valor R.M.S. global como

$$a_{w,e} = \left[\frac{\sum a_{w,i}^2 \cdot T_i}{\sum T_i} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 27}$$

O bien

$$VDV_{total} = \left(\sum_i VDV_i^4 \right)^{\frac{1}{4}} \quad \text{Ecuación 28}$$

Para cada tramo de vía las siguientes características pueden tener influencia en las aceleraciones en cabina:

1. Parámetros de geometría de contacto carril/rueda
 - a. Conicidad de diseño
 - i. Valor medio.
 - ii. Campo de variación.
 - iii. Especificación del perfil del eje montado (perfiles de banda de rodadura, distancia nominal) y del perfil de la vía (perfil del carril, inclinación de carril, ancho de vía nominal, campo de variación).
 - b. Conicidad existente
 - i. Valor medio.
 - ii. Campo de variación.

2. Trazado de la vía: véase Descripción de las curvas, incluyendo transiciones y localización correspondiente.
3. Defectos de vía: nivelación horizontal y transversal, alineación, alabeo, ancho de vía, cuantificados por valores
 - a. Alabeos
 - b. Nivelación vertical
 - c. Nivelación transversal (incluyendo la base de la medición)
 - d. Alineaciones (excluyendo los peraltes)
 - e. Ancho de vía
4. Irregularidades de la vía sobre una sección de vía definida, cuantificadas mediante sus valores eficaces y rango de longitud de onda
 - a. Desviación estándar media: Valores para las nivelaciones verticales, transversales y alineaciones
 - b. Desviación estándar máxima: Para nivelación vertical, nivelación transversal, alineación; localización de la sección correspondiente
 - c. Distribución de la desviación estándar correspondiente a todas las subsecciones de vía de la sección de vía definida
 - d. Factor de correlación medio nivelación transversal – alineación para la sección de vía definida
5. Irregularidades de la vía sobre una sección de vía definida, cuantificadas mediante espectro.
 - a. Espectro promedio para la nivelación vertical, alineación y nivelación transversal para la sección de vía definida
 - b. Envolvente de los espectros de la nivelación vertical, alineación y nivelación transversal correspondientes a todas las subestaciones de la vía
6. Irregularidades de la vía sobre una sección de vía definida, cuantificada mediante historial de distancias.
 - a. Evolución espacial de una sección tipo de vía
 - b. Evolución espacial del conjunto de la sección de vía
7. Características mecánicas de la vía:
 - a. Rigidez
 - b. Amortiguación. En dirección vertical y lateral, por sección de vía y por carril separadamente.

5.3.5 Ejes predominantes.

En los apartados anteriores solo se han analizado las aceleraciones medidas según los ejes lateral y vertical.

Las aceleraciones según el eje longitudinal pueden considerarse despreciable frente a los valores medidos en los otros ejes.

En la Figura 5.3.6 se muestra la media móvil R.M.S. ponderada según los filtros UIC medida cada 5 segundos de las aceleraciones en cabina.

Figura 5.3.6. Media móvil Valor eficaz ponderado de las aceleraciones longitudinales, laterales y verticales por punto kilométrico (elaboración propia).

Sin embargo, entre las aceleraciones verticales y laterales no se puede considerar ningún eje como predominante. Ninguno de los ejes es un 40% superior al otro como indica la normativa.

Dependiendo del tipo de vía por el que se circule, para un mismo vehículo pueden ser mayores las aceleraciones verticales o laterales.

Para el caso en el que las aceleraciones laterales son mayores que las verticales (el 56% de las medidas analizadas), el valor es un 16% mayor (de media).

Para el caso en el que las aceleraciones verticales son mayores que las laterales (el 44% de las medidas analizadas), estas presentan un valor un 25% mayor en media.

Por lo que se puede concluir que para valorar los efectos de las aceleraciones se deben tener ambos ejes en cuenta y criterios como el VTV (vibration total value indicado en la Ecuación 29) serían más adecuados que utilizar el criterio del peor de los ejes.

$$a_v = \left(k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 29}$$

Si consideramos que ambos ejes presentan valores similares, este criterio supondrá aumentar el valor medido en torno a un 41% más que el criterio que utiliza el peor de los ejes si el asiento aísla de un modo similar las aceleraciones verticales y laterales.

5.3.6 Características frecuenciales.

Para un correcto análisis del origen de las vibraciones, para el diseño de los asientos, para el cálculo de las aceleraciones en la interfaz entre el conductor y el asiento, y para decidir las medidas que mitiguen las vibraciones es fundamental conocer las características frecuenciales de las vibraciones presentes en el piso de las cabinas.

La Figura 5.3.7 muestra la distribución de los máximos que se observan en el análisis PSD de las aceleraciones verticales y laterales.

Figura 5.3.7 Resonancias en el análisis PSD de las aceleraciones verticales y laterales en cabina (elaboración propia).

La Figura 5.3.8 muestra el análisis PSD de las aceleraciones verticales más características medidas en el piso de la cabina. La distribución que más se repite es la segunda, en la que existe un marcado pico alrededor de los 0.88 Hz. También existe un segundo pico menor alrededor de los 2.3 Hz. Las resonancias posteriores son despreciables desde el punto de vista de la salud, ya que al aplicarle los filtros UIC o ISO quedan reducidas a un valor mínimo.

Circulando por la misma vía y prácticamente a la misma velocidad el pico se desplaza entre los 0.8 y 1 Hz. Sin embargo, el máximo puede variar entre los 0.7 Hz y los 3 Hz. En este último caso se debe a que desaparece el pico alrededor de los 0.8 Hz.

En este caso, en la Figura 5.3.9 se observa que, dependiendo de la resonancia de la señal de aceleración vertical en la cabina que se produce entre los 2 y 3 Hz, el máximo de la aceleración filtrada (según UIC o ISO) se desplaza entre los 2 y los 4 Hz. Cuando la resonancia principal se reduce, aumenta la importancia de las resonancias a 8 Hz, 11 Hz 16 Hz y 19-20 Hz. En esta banda los filtros presentan su máximo y la señal filtrada es más importante.

La Figura 5.3.10 muestra el análisis PSD de las aceleraciones verticales y laterales tanto en caja como en el bogie. También muestra los giros calculados a partir de dos acelerómetros.

Figura 5.3.8. Análisis PSD más representativos de las aceleraciones laterales (elaboración propia).

Figura 5.3.9. Análisis PSD más representativos de las aceleraciones verticales (elaboración propia).

/el alta Via 4 Pasada 32 Km 122 - 182 vel 224.0723 CALCULO PSD

/el alta Via 5 Pasada 35 Km 228 - 322 vel 238.7207 CALCULO PSD

Figura 5.3.10 Análisis PSD de las aceleraciones en cabina, en bogie y de giros (elaboración propia).

La cabina, debido a restricciones en el diseño de locomotoras (gálbo, morro, crash), se suele encontrar situada encima del bogie delantero (Figura 5.3.11). Esto hace que los movimientos que más influyan sobre las aceleraciones en cabina sean los movimientos de dicho bogie delantero. En el caso de las aceleraciones laterales el pico de la resonancia en el bogie coincide prácticamente con el pico de la resonancia en el piso de la cabina.

Figura 5.3.11. Movimiento de la caja en función de la longitud de onda de las irregularidades (UNE-EN 14363 2017).

Sin embargo, en el caso de las aceleraciones verticales el pico de la resonancia en cabina está desplazado ligeramente debido a que el efecto del giro alrededor del eje y (por diferentes desplazamientos entre el bogie delantero y trasero) es más importante.

5.3.7 Filtros utilizados.

Del apartado anterior se puede observar que los filtros recomendados por la UIC y la ISO prácticamente no tienen influencia en el filtrado de las aceleraciones laterales.

Sin embargo, para las aceleraciones verticales, cuyos máximos pueden variar entre los 2 y los 19 Hz, el filtro UIC suele ser superior a los recomendados por la ISO.

Si se comparan las aceleraciones R.M.S. móviles en una ventana de tiempo de 5 s filtrándolas según los distintos tipos de filtros se puede observar el mismo comportamiento en las aceleraciones verticales (Figura 5.3.12).

Las diferencias son pequeñas, pero se observa que el filtro UIC da valores superiores para aceleraciones verticales.

La Figura 5.3.13 muestra para un mismo tramo las diferencias entre utilizar un filtro u otro

Figura 5.3.12. Valores R.M.S. Media móvil cada 5 s según filtros ISO y UIC (elaboración propia).

Figura 5.3.13 Valores R.M.S. de la aceleración vertical según filtros ISO y UIC (elaboración propia).

Dependiendo de la frecuencia dominante los resultados pueden ser mayores con un filtro UIC o ISO. Sin embargo, no parece que el cambio de frecuencia dominante implique un mayor valor del r.m.s. como se observa en la Figura 5.3.14.

Figura 5.3.14 Valores R.M.S. ponderados de la aceleración vertical en función de la frecuencia dominante según ISO 2631-1 (elaboración propia).

5.3.8 Impactos en la señal. Factor de cresta.

Otra de las características de las aceleraciones en vehículos ferroviarias es el contenido en impactos (o brusquedad de la señal), que invalidaría la utilización de métodos como el R.M.S.

Como se ha indicado en capítulos anteriores el nivel de impactos en la señal no parece relevante para la salud si se estudia según la norma ISO 2631-5.

Para medir el nivel de brusquedad de la señal se ha utilizado el factor de cresta, calculado a partir del máximo de los valores eficaces ponderados entre el valor medio (Figura 5.3.15).

Figura 5.3.15. Factor de cresta lateral y vertical en distintas pasadas según ISO 2631-1 (elaboración propia).

Como se observa en la figura, el factor de Cresta se encuentra por debajo del límite establecido en la ISO 2631-1 en todas las medidas para las aceleraciones laterales.

Sin embargo, existen algunas medidas de las aceleraciones verticales que si superan este límite. Hay que tener en cuenta que estas son aceleraciones medidas en el piso de cabina y no en el asiento. Dependiendo del aislamiento de la suspensión este valor puede ser reducido o aumentado.

Figura 5.3.16. Factor de cresta lateral y vertical vs R.M.S. según ISO 2631-1 (elaboración propia).

Se observa en la Figura 5.3.16 que mayores valores en el factor de cresta no dan lugar a mayores valores en el factor global R.M.S. El coeficiente de correlación entre ambos factores es muy bajo.

5.3.9 Valores estadísticos.

A lo largo del capítulo se ha venido analizando el comportamiento de los valores eficaces ponderados respecto a cada uno de los factores que pueden influir en las vibraciones en cabina (partiendo de un vehículo dado).

El Valor eficaz o R.M.S. es el preferido por la normativa ISO, UIC y por la directiva europea, pero también se puede analizar mediante el método de la cuarta potencia o VDV que caracterizaría mejor las señales con alto contenido en impactos. La normativa típica de ferrocarril suele utilizar otros estadísticos como el percentil 95 de la distribución de las aceleraciones. En la Tabla 5-4 se muestran distintos valores estadísticos de las aceleraciones tanto de modo general como en cada una de las vías analizadas.

Donde:

- a_{wyurms} es la aceleración R.M.S. filtrada con los filtros UIC,
- y_{5rmsu} es la aceleración lateral filtrada con filtros UIC y con un RMS cada 5 segundos,
- y_{1rmsu} es la aceleración lateral filtrada con filtros uic y con un RMS cada 1 segundo,
- a_{ymttvu} es el máximo transient value de la aceleración lateral,

- $a_{y_{wvdv}}$ es la dosis de vibración vdv de la aceleración lateral,

- a_{wy95u} es el percentil 95% de la aceleración lateral

La misma definición vale para la aceleración vertical.

Tabla 5-4. Valores estadísticos de las aceleraciones (elaboración propia).

	LATERAL									VERTICAL								
GENERAL	awyurms	y5rmsu	y1rmsu	aymedu	aymtv	awy95u	awyuvdv	awy95u	VTV	awzurms	z5rmsu	z1rmsu	azmedu	azmtv	awz95u	awzuvdv		
MEDIA	0.257	0.237	0.218	0.222	0.605	0.336	2.167	0.336	0.422	0.260	0.252	0.246	0.246	0.476	0.293	2.076		
MEDIANA	0.255	0.238	0.223	0.223	0.592	0.337	2.168	0.337	0.398	0.245	0.240	0.232	0.234	0.441	0.283	1.983		
DESVIATIVA	0.085	0.077	0.068	0.080	0.206	0.109	0.718	0.109	0.100	0.059	0.058	0.056	0.057	0.132	0.108	0.496		
S+3D	0.513	0.468	0.423	0.462	1.224	0.662	4.322	0.662	0.722	0.437	0.426	0.415	0.418	0.871	0.618	3.565		
95%	0.390	0.353	0.295	0.310	0.965	0.499	3.305	0.499	0.587	0.357	0.350	0.344	0.344	0.743	0.471	2.909		
MAX	0.663	0.613	0.581	0.731	1.679	0.866	4.665	0.866	0.864	0.519	0.499	0.406	0.494	1.012	0.787	4.010		
MIN	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002	0.012	0.002	0.191	0.117	0.115	0.132	0.111	0.203	0.002	0.763		
	LATERAL									VERTICAL								
VIA 1	awyurms	y5rmsu	y1rmsu	aymedu	aymtv	awy95u	awyuvdv	awy95u	VTV	awzurms	z5rmsu	z1rmsu	azmedu	azmtv	awz95u	awzuvdv		
MEDIA	0.300	0.278	0.218	0.259	0.689	0.394	2.415	0.394	0.354	0.220	0.215	0.194	0.210	0.386	0.340	1.803		
MEDIANA	0.306	0.286	0.212	0.254	0.754	0.405	2.542	0.405	0.374	0.233	0.228	0.197	0.222	0.394	0.345	1.934		
DESVIATIVA	0.130	0.118	0.063	0.118	0.280	0.167	0.974	0.167	0.062	0.039	0.038	0.012	0.037	0.093	0.164	0.439		
S+3D	0.691	0.632	0.406	0.613	1.528	0.894	5.338	0.894	0.540	0.338	0.330	0.230	0.322	0.665	0.833	3.121		
95%	0.512	0.469	0.319	0.441	1.004	0.663	3.615	0.663	0.399	0.247	0.243	0.205	0.239	0.493	0.615	2.280		
MAX	0.593	0.545	0.399	0.566	1.017	0.771	4.312	0.771	0.404	0.250	0.245	0.206	0.239	0.594	0.726	2.351		
MIN	0.073	0.069	0.147	0.065	0.148	0.097	0.501	0.097	0.191	0.117	0.115	0.163	0.113	0.203	0.081	0.763		
	LATERAL									VERTICAL								
VIA 2	awyurms	y5rmsu	y1rmsu	aymedu	aymtv	awy95u	awyuvdv	awy95u	VTV	awzurms	z5rmsu	z1rmsu	azmedu	azmtv	awz95u	awzuvdv		
MEDIA	0.198	0.181	0.162	0.166	0.506	0.256	1.641	0.256	0.413	0.253	0.241	0.232	0.233	0.522	0.225	1.933		
MEDIANA	0.214	0.195	0.188	0.177	0.537	0.276	1.722	0.276	0.386	0.240	0.225	0.221	0.221	0.465	0.243	1.758		
DESVIATIVA	0.065	0.060	0.060	0.055	0.188	0.085	0.602	0.085	0.138	0.082	0.079	0.073	0.077	0.185	0.076	0.653		
S+3D	0.394	0.361	0.344	0.331	1.068	0.510	3.446	0.510	0.826	0.499	0.476	0.451	0.464	1.076	0.452	3.893		
95%	0.286	0.265	0.220	0.233	0.722	0.375	2.406	0.375	0.715	0.432	0.404	0.391	0.394	0.891	0.326	3.426		
MAX	0.299	0.269	0.231	0.246	1.243	0.381	3.623	0.381	0.864	0.519	0.499	0.406	0.494	1.012	0.349	3.920		
MIN	0.001	0.001	0.001	0.001	0.003	0.002	0.012	0.002	0.241	0.149	0.142	0.132	0.111	0.241	0.002	1.105		
	LATERAL									VERTICAL								
VIA 4	awyurms	y5rmsu	y1rmsu	aymedu	aymtv	awy95u	awyuvdv	awy95u	VTV	awzurms	z5rmsu	z1rmsu	azmedu	azmtv	awz95u	awzuvdv		
MEDIA	0.294	0.271	0.251	0.255	0.687	0.383	2.497	0.383	0.417	0.257	0.250	0.244	0.244	0.457	0.336	2.094		
MEDIANA	0.280	0.261	0.241	0.243	0.658	0.369	2.438	0.369	0.395	0.244	0.238	0.229	0.233	0.429	0.317	1.989		
DESVIATIVA	0.079	0.070	0.060	0.079	0.193	0.099	0.624	0.099	0.081	0.048	0.048	0.047	0.047	0.109	0.109	0.389		
S+3D	0.532	0.480	0.429	0.492	1.265	0.678	4.369	0.678	0.660	0.401	0.393	0.386	0.386	0.785	0.662	3.260		
95%	0.450	0.394	0.350	0.339	1.032	0.558	3.736	0.558	0.573	0.349	0.340	0.338	0.337	0.680	0.544	2.754		
MAX	0.663	0.613	0.581	0.731	1.679	0.866	4.665	0.866	0.730	0.447	0.434	0.359	0.443	0.976	0.787	4.010		
MIN	0.002	0.002	0.002	0.002	0.004	0.002	0.015	0.002	0.228	0.141	0.136	0.172	0.134	0.296	0.002	1.141		
	LATERAL									VERTICAL								
VIA 5	awyurms	y5rmsu	y1rmsu	aymedu	aymtv	awy95u	awyuvdv	awy95u	VTV	awzurms	z5rmsu	z1rmsu	azmedu	azmtv	awz95u	awzuvdv		
MEDIA	0.192	0.181	0.178	0.172	0.420	0.257	1.662	0.257	0.475	0.288	0.284	0.283	0.280	0.479	0.219	2.279		
MEDIANA	0.181	0.172	0.164	0.163	0.413	0.243	1.653	0.243	0.503	0.305	0.299	0.297	0.296	0.488	0.205	2.349		
DESVIATIVA	0.033	0.031	0.028	0.031	0.066	0.044	0.348	0.044	0.083	0.050	0.050	0.043	0.047	0.100	0.042	0.448		
S+3D	0.290	0.274	0.263	0.263	0.619	0.388	2.706	0.388	0.723	0.437	0.433	0.411	0.423	0.778	0.346	3.623		
95%	0.250	0.238	0.230	0.233	0.534	0.337	2.232	0.337	0.564	0.342	0.338	0.332	0.334	0.648	0.300	2.999		
MAX	0.263	0.255	0.244	0.247	0.540	0.361	2.415	0.361	0.597	0.362	0.354	0.350	0.344	0.715	0.323	3.187		
MIN	0.136	0.124	0.147	0.120	0.248	0.176	0.833	0.176	0.249	0.154	0.148	0.193	0.150	0.250	0.148	1.125		
	LATERAL									VERTICAL								
VIA 6	awyurms	y5rmsu	y1rmsu	aymedu	aymtv	awy95u	awyuvdv	awy95u	VTV	awzurms	z5rmsu	z1rmsu	azmedu	azmtv	awz95u	awzuvdv		
MEDIA	0.299	0.278	0.257	0.260	0.689	0.393	2.439	0.393	0.424	0.263	0.251	0.247	0.244	0.499	0.339	2.141		
MEDIANA	0.304	0.287	0.280	0.265	0.704	0.405	2.280	0.405	0.387	0.243	0.234	0.217	0.222	0.477	0.349	2.131		
DESVIATIVA	0.031	0.029	0.032	0.025	0.078	0.040	0.499	0.040	0.084	0.050	0.048	0.053	0.047	0.087	0.034	0.551		
S+3D	0.391	0.363	0.354	0.334	0.924	0.514	3.937	0.514	0.677	0.413	0.397	0.407	0.384	0.759	0.442	3.793		
95%	0.337	0.312	0.295	0.288	0.799	0.441	3.280	0.441	0.589	0.361	0.349	0.340	0.333	0.639	0.379	3.012		
MAX	0.339	0.314	0.299	0.289	0.804	0.443	3.315	0.443	0.627	0.378	0.363	0.346	0.353	0.744	0.382	3.186		
MIN	0.235	0.217	0.189	0.194	0.510	0.307	1.611	0.307	0.342	0.213	0.196	0.188	0.197	0.354	0.264	1.376		

Los valores VDV son tan bajos que no permiten extraer conclusiones de la variación del mismo. Dado que evoluciona con la cuarta potencia, el valor VDV tiene una pendiente mayor y crece más rápidamente cuando crecen las aceleraciones. Pero al estar tan alejados de los límites ($9 \text{ m/s}^{1.75}$) es muy difícil obtener conclusiones.

Sin embargo, la Figura 5.3.17 muestra la mayor correlación entre el VDV de las aceleraciones verticales y el factor de cresta (indicador de la cantidad de impactos en la señal).

Figura 5.3.17. Factor de cresta frente al VDV vertical según ISO 2631-1 (elaboración propia).

El R.M.S. global siempre es un valor mayor que otros estadísticos como pueden ser la media móvil de los R.M.S. calculados cada 5 segundos o cada 1 segundo o la mediana, por lo que parece más adecuado desde el lado de la seguridad.

Los valores del Maximum transient Value (MTTV) podrían utilizarse para ponderar los cálculos R.M.S. para indicar la cantidad de impactos en la señal.

EL percentil 95% de las señales es un máximo que garantiza que prácticamente todas las aceleraciones se encuentran por debajo de este límite, pero puede llegar a ser demasiado restrictivo.

El valor VTV incluye la media cuadrática de las aceleraciones laterales y verticales y suele ser un 39% mayor que la medida del peor de los ejes. Si se utiliza este valor, se restringirían las aceleraciones más de lo indica la directiva o el real decreto en España.

Otros valores como la media de los valores R.M.S., bien sea calculado sobre la base de 5 segundos, o sobre la base de 1 segundo, son inferiores al R.M.S. calculado sobre a lo largo de toda la duración de la medida. Lo mismo ocurre con la mediana de las aceleraciones

La

Figura 5.3.18 muestra la evaluación de cada uno de estos parámetros según el tramo de vía. Se puede observar que prácticamente todos los valores evolucionan de un modo parecido a excepción del VTV que tiene un crecimiento menos pronunciado con la velocidad.

Figura 5.3.18. Evaluación de los parámetros indicados en la normativa ISO 2631-1 según el tramo de vía (elaboración propia).

5.4 Conclusiones

En este capítulo se han examinado las vibraciones presentes en el suelo de la cabina, que será la entrada al sistema dinámico asiento- conductor.

Las conclusiones no son directamente extrapolables a la medida de las aceleraciones en la interfaz entre el asiento y el conductor, pero si las características generales de las vibraciones que sufre el maquinista.

Las vibraciones en el piso de la cabina dependen del sistema dinámico vía vehículo. Para un vehículo dado, el comportamiento dinámico puede ser muy distinto según la vía por la que circule. (número de curvas de la vía y radio, calidad de los defectos de vía, velocidad máxima permitida etc.)

Sería necesario realizar muchas medidas (tantas como tipo de vía por la que circule) para garantizar que las medidas son representativas y que el valor obtenido sea el mayor posible. Es necesario definir la

metodología de medida que contemple esta variación entre unas vías u otras. Incluso dentro de la misma vía se pueden obtener resultados muy variables de una medición a otra. Por lo que parece necesario utilizar un valor estadístico que tenga en cuenta esta variabilidad y no un valor que calcule la media de los valores medidos (aunque sea cuadrática).

La velocidad es otra de las variables que influyen en las aceleraciones en cabina. A mayor velocidad mayores vibraciones. Si las medidas se realizasen a una velocidad de un 10% superior a la nominal, los resultados obtenidos serían mayores. Podría considerarse como un factor de seguridad.

Las vibraciones en el eje longitudinal en las medidas realizadas son menores que en los otros dos ejes. Sin embargo, en nivel de vibraciones en el eje lateral y vertical son del mismo orden, y dependiendo del tipo de vía por el que circule pueden ser mayor una u otra. El factor de evaluación de las vibraciones en cabina debe considerar ambos ejes al mismo tiempo.

En el dominio de la frecuencia las aceleraciones verticales presentan un comportamiento similar en la mayor parte de las medidas con un pico de resonancia entre los 2 y 3 Hz de la señal no filtrada. AL aplicar filtros este pico se reduce y según el caso pueden adquirir importancia los picos de 8 Hz, 11 Hz 16 Hz y 19-20 Hz.

Para las aceleraciones laterales el comportamiento en el dominio de la frecuencia varía más, aunque lo más característico es que se presente un pico de resonancia en torno a los 0.7-1 Hz y un segundo pico menor en torno a los 2.3 Hz. Cuando la resonancia principal desaparece puede adquirir más importancia las resonancias secundarias.

Analizando las señales en el dominio de la frecuencia y junto con el análisis de la R.M.S. móvil se llega a la conclusión de que utilizando los filtros propuestos por la UIC se obtienen valores más altos para las aceleraciones verticales, y ligeramente más bajos en las aceleraciones laterales que en los filtros recomendados por la ISO. Parece más recomendable utilizar los filtros UIC.

En el piso de cabina, las vibraciones presentes no se caracterizan por tener un alto contenido en impactos, pero su efecto puede ser no despreciable en el caso de las vibraciones verticales. Debería ponderarse este efecto.

Se han analizado varios parámetros estadísticos para evaluar las vibraciones: R.M.S., VDV, R.M.S. móvil, MTTV, mediana, VTV Cada uno presenta ventajas y desventajas, pero no parece haber un parámetro que defina mejor el comportamiento que el R.M.S., con todos los defectos que presenta esta evaluación.

6 PROPUESTA DE INDICES Y PROCEDIMIENTO DE VALORACIÓN: ÍNDICE DE EMISIÓN DE VIBRACIONES Y NIVEL DE EXPOSICIÓN A LAS VIBRACIONES.

Una vez analizada la problemática actual para establecer un indicador, se propone en este capítulo una nueva metodología que intente tener en cuenta las características especiales del ferrocarril y las de la evaluación de las vibraciones desde el punto de vista de la salud.

El objetivo principal del indicador será garantizar la salud del conductor por lo que los valores calculados deberían ser mayores que los que se pueden obtener en medidas puntuales eliminando aquellos valores puntualmente altos.

Para conseguir la homologación y certificación de un vehículo de un modo general se calculará un índice de emisión de vibraciones tal y como indican distintas normativas, ya analizadas en el capítulo 3, que caracterice el vehículo y permita compararlo con otros de un modo homogéneo. Para ello se considera que el vehículo circula por una vía estándar, con una distribución de radios y calidades de vía. De este modo se intenta eliminar la variabilidad de las mediciones particulares obtenidas en una única medición, tal y como indica la normativa actual. Aunque el tramo elegido para dicha medición sea el más representativo, dicha medición podría llevar a una evaluación de riesgos sobre la salud demasiado severa o laxa según el caso.

Posteriormente, según el caso particular de utilización del vehículo sobre una vía en particular se calculará un nivel de emisión de vibraciones, teniendo en cuenta el par vehículo/vía, que podría servir como sistema de evaluación de riesgos de daños sobre la salud para los conductores como exige la normativa. La realidad en el mundo ferroviario es que cada día es más frecuente que un vehículo se utilice para circular por una vía determinada. En cualquier caso, la simplicidad del método propuesto facilita el cálculo de dicho nivel de emisión de vibraciones para cada vía.

6.1 *Índice de emisión de vibraciones del vehículo ferroviario.*

6.1.1 Definición del índice.

Se calculará un índice general de emisión de vibraciones para cada vehículo ferroviario que debe quedar registrado en el manual del vehículo una vez superado el proceso de certificación.

Para la homologación del vehículo, se debe cumplir que el valor de dicho índice sea menor que 0.5 de un modo análogo al establecido en la ISO 2631-1 o en la directiva 44/2002.

El índice se define como:

$$IEV = \sqrt{10\%I_{rmp}^2 + 25\%I_{rp}^2 + 25\%I_{rg}^2 + 40\%I_r^2} \quad \text{Ecuación 30}$$

Donde

- IEV es el índice de emisión de vibraciones.
- I_{rmp} : es el índice de emisión de vibraciones en curvas de radio muy pequeño ($250 \text{ m} < R < 400 \text{ m}$).
- I_{rp} : es el índice de emisión de vibraciones en curvas de radio pequeño ($400 \text{ m} < R < 600 \text{ m}$).

- Irg: es el índice de emisión de vibraciones en curvas de radio grande (600 m<R<1000 m).
- Ir: es el índice de emisión de vibraciones en curvas de muy grande o rectas.

Se considera que los porcentajes que ponderan cada uno de los subíndices pueden corresponder a un recorrido estándar, de un modo similar al que se utiliza en otros sectores. Para el caso particular de vehículos que circulen por un solo determinado tipo de vía deberá adaptarse el índice en función del recorrido estándar.

En el caso concreto de los vehículos que circulan por vías de alta velocidad, dadas las especiales características el índice quedaría modificado como sigue:

$$IEV = \sqrt{10\% Irg^2 + 90\% Ir^2} \quad \text{Ecuación 31}$$

6.1.2 Cálculo de los Subíndices.

Para cada uno de los casos indicados anteriormente se debe calcular los subíndices de vibración. En la Figura 6.1.1 se indica un esquema de cómo realizar el cálculo.

Figura 6.1.1. Cálculo de los subíndices de emisión.

Para cada uno de los subíndices indicados se deben realizar las siguientes operaciones

- Obtener las aceleraciones medidas en los tres ejes x, y, z en la interfaz entre el conductor y el asiento, mientras se circula por cada uno de los tramos indicados en cada subíndice.
- Realizar el filtrado de la señal según los filtros indicados en la normativa UIC-513/EN 12299.

- c) Extraer el valor eficaz ponderado o R.M.S. cada 5 segundos (es necesario medir al menos a lo largo de 12500 m con las características de radio y calidad de vía de cada subíndice).
- d) Calcular el percentil 95 de los valores R.M.S. de la aceleración filtrada para cada uno de los tres ejes.
- e) Calcular el subíndice según la fórmula:

$$I_{ii} = \sqrt{\frac{t_m}{t_t} (1.4 k_x a_{wx,95}^2 + 1.4 k_y a_{wy,95}^2 + k_z a_{wz,95}^2)} \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde:

- I_{ii} es el índice para cada trazado de curva ($I_{imp,}$, $I_{rp,}$, $I_{rg,}$, I_r)
- k_x , k_y , k_z son los coeficientes de mayoración por impacto que tienen en cuenta el contenido en impactos de la señal
- t_m y t_t son el tiempo de medida y el tiempo correspondiente al turno de trabajo, para tener en cuenta el efecto acumulativo de la dosis de vibración acumulada en el cuerpo del conductor
- $a_{wx,95}$, $a_{yw,95}$, $a_{zw,95}$ corresponden al percentil 95 de histograma de las aceleraciones ponderadas según lo filtros UIC 513/EN12299 medida cada tramo de 5 segundos

6.1.3 Requisitos del trazado de medida.

Los tramos deben cumplir con los requisitos de calidad de vía QN1, QN2 y QN3 establecidos en el anexo C de la normativa EN 14363. Es decir, el 50% de los tramos debe tener una calidad $\leq$ QN1, el 40% debe tener una calidad entre QN1 y QN2 y el 10 % una calidad inferior a QN2 (siempre que sea posible). Los límites se definen en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1. Clasificación de la calidad de vía según los defectos (UNE-EN 14363 2017).

Velocidad máxima admisible en km/h	Alineación		Nivelación longitudinal	
	Valores del nivel de calidad en mm			
	QN 1	QN 2	QN 1	QN 2
Valor máximo absoluto $\Delta y^0_{\text{máx}}$ y $\Delta z^0_{\text{máx}}$ (de valor medio a valor de cresta)				
$< \quad V \quad \leq \quad 80 \text{ km/h}$	12	14	12	16
$80 \text{ km/h} < \quad V \quad \leq \quad 120 \text{ km/h}$	8	10	8	12
$120 \text{ km/h} < \quad V \quad \leq \quad 160 \text{ km/h}$	6	8	6	10
$160 \text{ km/h} < \quad V \quad \leq \quad 200 \text{ km/h}$	5	7	5	9
$200 \text{ km/h} < \quad V \quad \leq \quad 300 \text{ km/h}$	4	6	4	8
Desviaciones tipo Δy^0_σ y Δz^0_σ				
$< \quad V \quad \leq \quad 80 \text{ km/h}$	1,5	1,8	2,3	2,6
$80 \text{ km/h} < \quad V \quad \leq \quad 120 \text{ km/h}$	1,2	1,5	1,8	2,1
$120 \text{ km/h} < \quad V \quad \leq \quad 160 \text{ km/h}$	1,0	1,3	1,4	1,7
$160 \text{ km/h} < \quad V \quad \leq \quad 200 \text{ km/h}$	0,8	1,1	1,2	1,5
$200 \text{ km/h} < \quad V \quad \leq \quad 300 \text{ km/h}$	0,7	1,0	1,0	1,3

los coeficientes de mayoración por impacto k_x , k_y , k_z se calcularán de un modo similar al índice S_{ed} definido en la norma ISO 2631-5 como la raíz sexta de la suma de los máximos de aceleración medida cada 5 segundos, ponderada por el tiempo y afectada por un factor, siempre que sea mayor que la unidad.

$$k_i = \left| \frac{0.03}{0.8} \sqrt[6]{\left[\frac{t_t}{t_m}\right]^6 \sum \max(a_{wi,5})} \right|_{>1} \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde

$a_{wi,5}$ es la aceleración ponderada en cada uno de los ejes x, y y z medida durante 5 segundos

$t_m = 5$ segundos.

t_d es el tiempo de trabajo diario medido en segundos (normalmente $t=28800$ segundos)

Las mediciones se realizarán de acuerdo con lo estipulado en la norma (EN 1032, s. f.) a excepción de los filtros, que serán los utilizados los indicados en la normativa EN 12299.

En vez de utilizar el percentil 75 indicado en la norma EN 1032, se debería utilizar el percentil 95 más usado en la industria ferroviaria.

Todos los índices, histogramas de las aceleraciones ponderadas deberán ser indicados en el informe de prueba.

En el informe se debe incluir, como mínimo, incluir la siguiente información:

- la referencia al código de ensayo de vibraciones correspondientes;
- El fabricante, modelo y número de serie del vehículo, el tipo de asiento, estado de las de mantenimiento del vehículo y en especial de las ruedas, el tipo de cabina;
- Las características y números de tramos de vía utilizados para la evaluación (radios y calidad de vía);
- las condiciones de uso y los controles (incluyendo la velocidad de desplazamiento y la duración);
- la institución responsable de la medición (por ejemplo, de laboratorio, fabricante);
- la fecha de la medición y el nombre de la persona responsable de la prueba;
- los instrumentos (incluyendo el tiempo de integración utilizado para la evaluación de los valores de vibración, recomendando una frecuencia de adquisición de 250 Hz);
- transductor de aceleración y, ejes de medición.
- EL valor r.m.s. ponderada en frecuencia de la aceleración que caracteriza el valor de emisión de vibraciones, y los valores de emisión por separado, cuando sea pertinente.

Los valores medidos serán la base de los valores de las emisiones vibración declarada.

6.2 Evaluación de las vibraciones para cada caso particular, vehículo – vía: Nivel de exposición a las vibraciones.

En los apartados anteriores se ha calculado el índice general de emisión de vibraciones para un determinado vehículo. Este índice puede servir para la homologación general del vehículo.

Sin embargo, las vibraciones dependen tanto del vehículo como del a vía por la que circula. Por lo tanto, para valorar las vibraciones a las que está sometido el conductor de trenes es necesario evaluar las vibraciones en el vehículo circulando por la vía en la que se va a utilizar.

Una vez calculado el índice general de emisión de vibraciones y los subíndices para cada uno de los subtramos característicos se puede calcular las vibraciones a las que está sometido el conductor como se indica a continuación.

Dada la vía por la que circulará el vehículo se debe calcular el porcentaje de todo el recorrido según la clasificación establecida en la Tabla 6-1 y el porcentaje que representan las rectas, curvas de radio grande y curvas de radio medio y pequeño según se indica en el punto 5.1.

Se calculará el nivel de exposición a las vibraciones según la ecuación:

$$NEV = \sqrt{[(mrp\%)I_{rmp}^2 + (rp\%)I_{rp}^2 + (rq\%)I_{rg}^2 + (r\%)I_r^2]n \frac{t_r}{t_t}} \quad \text{Ecuación 34}$$

Dónde:

- I_{rmp} , I_{rp} , I_{rg} y I_r son los subíndices calculados según se indica en el apartado 5.1

En este apartado se han calculado los subíndices para poder ser generalizados según una distribución clásica de la calidad de vía (50% menor que QN1, 40% entre QN1 t QN2 y 10 % peor que QN2). En el caso en el que se evalúe el vehículo circulando por una vía en particular estos índices deben ser corregidos según la siguiente ecuación

$$I_{ii} = \%QN1 \cdot I_{iiQN1} + \%QN2 \cdot I_{iiQN2} + \%QN3 \cdot I_{iiQN3}$$

para $ii = rmp, rp, rg$ o r

- $mrp\%$, $rp\%$, $rg\%$, $r\%$, representa el porcentaje en todo el recorrido del vehículo que circula por vías de radio muy pequeño, radio pequeño, radio grande y rectas según se define en el punto 5.2
- t_r es el tiempo empleado en recorrer la vía a la velocidad de explotación

n es el número de veces que recorre el conductor dicha vía o tramo de vía

t_t sería el tiempo equivalente a 8 horas de trabajo

De este modo se tiene en cuenta el efecto acumulativo de la dosis de vibración acumulada en el cuerpo del conductor

De esta manera el nivel de exposición a las vibraciones NEV sería equivalente a los niveles de exposición diaria establecidos en la Directiva 2002/44 de la unión europea o las zonas de precaución establecidas en la ISO 2631-1. Por lo tanto, este nivel no debería sobrepasar el valor de 0.5 sin que se tomen medidas para reducir el nivel de dosis de la vibración.

7 VALIDACIÓN DEL INDICE Y PROCEDIMIENTO PROPUESTO MEDIANTE MEDIDAS REALES

Una vez establecido el nuevo procedimiento que establece el nivel de emisión de vibraciones del vehículo se validará a partir de las medidas obtenidas en ensayos reales en vía.

Las medidas se han tomado sobre un tipo de tren que circula por diversas vías. Aprovechando los ensayos realizados para la homologación dinámica del tren se instrumentó el asiento del maquinista con un cojín triaxial. Las aceleraciones fueron registradas al mismo tiempo que las medidas necesarias para la certificación dinámica, de modo que se pueden correlar datos entre ambas mediciones.

Las vías por las que se circula presentan las características indicadas anteriormente, de modo que existan distintas calidades de vía, velocidades y radios de curva.

El estado del vehículo se controló de un modo análogo al exigido para la certificación dinámica.

7.1 Metodología empleada.

Adicionalmente a la cadena medida indicada en el capítulo 4.1 se ha añadido al sistema de adquisición un cojín del tipo Svantek modelo SVAN-958 (según Figura 7.1.1) con Acelerómetro Triaxial 3143M4 para medidas de cuerpo completo, adaptador de asiento y cable SC38

Figura 7.1.1 Cojín con acelerómetro triaxial

Las señales obtenidas del cojín montado en el asiento según Figura 7.1.2 fueron registradas por el sistema de adquisición SAT 2000 previo filtrado a 100 Hz.

Figura 7.1.2 Montaje del cojín sobre el asiento.

7.2 Medidas obtenidas en ensayos realizados en vía.

Desde Figura 7.2.1 a Figura 7.2.6 se describen el tipo de vía, las curvas (según el ángulo de giro de los vehículos w_z), las velocidades alcanzadas, y la señal de aceleración medida tanto en el suelo de la cabina (en azul) como en el asiento (en verde).

Figura 7.2.1. Aceleraciones velocidades y curvas en la vía tipo 4 por punto kilométrico (elaboración propia).

Figura 7.2.2. Valor eficaz ponderado en media móvil cada 5 seg por punto kilométrico. Vía tipo 4 (elaboración propia).

Figura 7.2.3. Aceleraciones velocidades y curvas por punto kilométrico en la vía tipo 3 (elaboración propia).

Figura 7.2.4 Valor eficaz ponderado en media móvil cada 5 seg. por punto kilométrico. Vía tipo 3 (elaboración propia).

Figura 7.2.5 Aceleraciones velocidades y curvas por punto kilométrico en la vía tipo 2 (elaboración propia).

Figura 7.2.6 Valor eficaz ponderado en media móvil cada 5 seg. por punto kilométrico. Vía tipo 2 (elaboración propia).

Si se hubiese procedido a medir en cada una de las pasadas, considerándolas como un recorrido representativo del vehículo los resultados obtenidos para cada una de las pasadas sería como se indican en la Tabla 7-1.

Tabla 7-1. valores medios obtenidos en cada pasada según ISO 2631-1 (elaboración propia).

pas	duracion (min)	1.4rmsxu	1.4*rmscy	rmsczu	VTV
82	24.2	0.085	0.189	0.109	0.234
79	20.8	0.050	0.171	0.113	0.211
73	25.9	0.114	0.407	0.064	0.427
72	16.6	0.156	0.331	0.059	0.371
59	20.8	0.069	0.055	0.136	0.162
52	22.2	0.073	0.197	0.072	0.222
34	18.7	0.003	0.216	0.059	0.225
33	10.9	0.003	0.224	0.073	0.236
28	33.0	0.003	0.215	0.066	0.225
26	12.5	0.003	0.211	0.058	0.219
25	24.1	0.009	0.190	0.286	0.344
19	32.7	0.004	0.216	0.069	0.227
16	34.9	0.004	0.210	0.068	0.221
14	36.4	0.004	0.207	0.068	0.218

Donde $R.M.S.x$, $R.M.S.y$ y $R.M.S.z$ son los valores eficaces o R.M.S. ponderados con los filtros de la EN 12299 para toda la pasada y VTV el Vibration Total Value calculado como la suma cuadrática de los valores anteriores multiplicando los valores horizontales por el factor de 1.4 como indica la normativa sobre la salud.

Como se puede observar, en este caso todos los valores se encuentran por debajo del límite, pero la variabilidad del resultado es muy alta (hasta un 86 % entre unas medidas otras dentro del mismo vehículo). Incluso, a pesar de tratarse de un vehículo con un asiento de suspensión vertical, varía el eje más predominante como sucede entre la pasada 73 y la 25.

Para calcular el Índice de emisión de vibraciones, procedemos como se indica en el apartado 6.1.3:

Calculo de los valores de calidad de la vía según los parámetros indicados en la EN 14363 (Figura 7.2.7 a Figura 7.2.9)

Calidad de vía	Nº de secciones	Porcentaje (%)
Mejor a igual a QN1	0	0
Entre QN1 y QN2	0	0
Peor que QN2	24	100
Total	24	

SECCIONES RECTAS

Figura 7.2.7 (incluye tabla). Calidad de vía en secciones rectas (elaboración propia).

SECCIONES CURVAS DE RADIO MEDIO

Calidad de vía	Nº de secciones	Porcentaje (%)
Mejor a igual a QN1	30	56.60
Entre QN1 y QN2	9	16.98
Peor que QN2	14	26.42
Total	53	

Figura 7.2.8 (incluye tabla). Calidad de vía en sección curvas de radio medio (elaboración propia).

SECCIONES CURVAS DE RADIO PEQUEÑO

Calidad de vía	Nº de secciones	Porcentaje (%)
Mejor a igual a QN1	0	0
Entre QN1 y QN2	0	0
Peor que QN2	24	100
Total	24	

Figura 7.2.9 (incluye tabla). Calidad de vía en secciones curvas de radio pequeño (elaboración propia).

1. Cálculo de los coeficientes de mayoración por impacto k_x , k_y , k_z .

Tabla 7-2. Coeficientes de mayoración para cada subíndice (elaboración propia).

	K_x	k_y	k_z
I_{imp}	0.13	0.13	0.12
I_{rp}	0.11	0.06	0.11
I_{rg}	0.12	0.12	0.13
I_r	0.12	0.10	0.12

Dado que ninguno de los coeficientes supera la unidad, no computaría para el cálculo.

2. Cálculo de los subíndices de emisión.

Para el cálculo de los subíndices de emisión se ha evaluado la aceleración ponderada en tramos de 5 segundos en cada uno de los ejes y se calcula el percentil 95% de los datos obtenidos. En las Figura 7.2.10 y Figura 7.2.11 se muestran los histogramas de las aceleraciones ponderadas para cada eje y tipo de tramo así como el VTV.

Figura 7.2.10. Histograma de las aceleraciones ponderadas según el eje y el VTV para los tramos de curvas de radio muy pequeño (elaboración propia).

Figura 7.2.11. Histograma de las aceleraciones ponderadas según el eje y el VTV para los tramos de curvas de radio pequeño (elaboración propia).

Tabla 7-3. Subíndices de emisión (*abxR.M.S.t*, *awbyR.M.S.t* *awbzR.M.S.t*: percentil 95 de las aceleraciones ponderadas medidas en las direcciones x, y y z, *VTVt*: Vibration Total Value para cada tipo de sección equivalente al subíndice).

	a_{wbx}	a_{wby}	a_{wbz}	VTV
I_{imp}	0.16	0.38	0.09	0.49
I_{rp}	0.24	0.28	0.10	0.42
I_{rg}	0.19	0.25	0.15	0.37
I_r	0.21	0.28	0.12	0.40

7.3 Cálculo del índice de emisión del vehículo.

$$IEV = \sqrt{10\%I_{imp}^2 + 25\%I_{rp}^2 + 25\%I_{rg}^2 + 40\%I_r^2} = 0.4013$$

Como se puede comprobar, este valor se encuentra por debajo de cualquiera de los valores obtenidos en las medidas parciales de la Tabla 7-1, es decir en cualquier momento queda garantizada la salud del maquinista.

7.4 Estudio de sensibilidad de los tramos utilizados para el cálculo del indicador. Robustez del indicador.

Según se indica en el capítulo 6.1.2, los subíndices se calculan a partir del valor eficaz ponderado o R.M.S. medido cada 5 segundos (es necesario medir al menos a lo largo de 12500 m con las características de radio y calidad de vía de cada subíndice).

Podrían elegirse distintos tramos dentro de los recorridos de prueba siempre que se encuentren dentro los rangos de radio de curva calidad de vía. A priori se podría pensar que una buena elección de estos tramos podría ser más favorable en un sentido o en el otro.

Como se observa en la figura Figura 7.4.1, marcados en verde hay varios tramos que podrían elegirse para cumplir con los parámetros de vía estándar.

Figura 7.4.1 Tramos que cumplirían los criterios de calidad y radios de curva. a_{wx} , a_{wy} , y a_{wz} , son aceleraciones longitudinales, laterales y verticales, en azul, a nivel del suelo, y en verde, a nivel del asiento; $alnc$ es la aceleración lateral no compensada; w_z es las medidas del giroscopio que muestran las curvas. Los cuadros de sombreado gris muestran el conjunto de datos utilizado para el cálculo de un único valor de VEI a 0,4013 m/s², en lugar de un valor para cada prueba. (elaboración propia).

Para confirmar la robustez del indicador, se ha calculado este indicador utilizando 14 tipos de combinaciones de tramos distintos (Tabla 7-4). Como se observa en dicha tabla, existe una variación en torno al primer valor calculado de un +/- 3%. Es una variabilidad tolerable, especialmente si lo comparamos con la variabilidad que se muestra en la Tabla 7-1. Por tanto, utilizando el indicador propuesto los resultados obtenidos en distintos ensayos serán más homogéneos y comparables.

7.5 Estudio de sensibilidad de los factores de ponderación de los subíndices.

Robustez del indicador.

Los factores de ponderación de los subíndices utilizados para el cálculo del índice de emisión del vehículo vienen derivados del estudio de los radios de curva existentes en varias vías europeas, aunque pueden variar sensiblemente de una vía a otra.

La Tabla 7-5 muestra cómo varía el índice de emisión del vehículo cuando varían estos factores.

Como se puede observar, la variación no es substancial (10.3% entre el índice de emisión máximo y mínimo y aproximadamente solo un 5% considerando el valor medio de los factores de ponderación).

Por lo tanto, se puede concluir que la variación del índice de emisión ante la variación de los porcentajes del tramo de una vía estándar según el radio y la calidad de vía está por debajo de la variación que se mostraba anteriormente según las distintas medidas por tramo.

Tabla 7-4. Variación de índice de emisión de vibraciones en distintas combinaciones de tramos que cumplen las exigencias de radios y calidad de vía.

COMBINACIÓN	IEV
1	0.40476138
2	0.40554661
3	0.41187769
4	0.41016426
5	0.41285672
6	0.39072177
7	0.39470593
8	0.39032719
9	0.38949422
10	0.41044243
11	0.40879971
12	0.3991193
13	0.3968239
14	0.40193523

Tabla 7-5. Variación de índice de emisión de vibraciones en función de los porcentajes de tramos de vía.

I _{imp}	I _{rp}	I _{rg}	I _r	awbxR.M.S.t*	awbyR.M.S.t*	awbzR.M.S.t;	IEV
25%	35%	10%	30%	0.207	0.301	0.116	0.422
15%	40%	15%	30%	0.215	0.289	0.117	0.413
15%	40%	10%	35%	0.213	0.288	0.120	0.412
5%	30%	15%	40%	0.210	0.286	0.122	0.408
10%	30%	20%	40%	0.213	0.279	0.122	0.403
10%	25%	25%	40%	0.213	0.279	0.123	0.401
5%	20%	25%	50%	0.212	0.270	0.128	0.393
5%	15%	30%	50%	0.211	0.269	0.128	0.391
5%	10%	30%	55%	0.209	0.268	0.130	0.389
0%	10%	30%	60%	0.210	0.260	0.133	0.383
0%	0%	40%	60%	0.209	0.259	0.133	0.379
0%	0%	30%	70%	0.204	0.258	0.137	0.378

7.6 Discusión

La introducción de dos índices, el índice de emisión de vibraciones y el nivel de exposición de las vibraciones se debe a que dichas vibraciones están íntimamente ligadas al sistema dinámico formado por la vía el vehículo y el conductor.

El índice de emisión de vibraciones intenta caracterizar de un modo general el comportamiento del sistema dinámico vehículo conductor circulando por unas vías generales. De un modo análogo a como se realiza la autorización de circulación desde el punto de vista de la seguridad frente al descarrilo o a la calidad

de marcha, si este índice está por debajo del umbral indicado, el vehículo se podría certificar desde el punto de vista de la salud de los conductores.

Sin embargo, para garantizar la salud de estos conductores en cada caso particular y sobre todo para establecer las medidas necesarias para permanecer dentro de los límites establecidos por la ley (como la limitación de la duración o los horarios de trabajo) se debería utilizar el nivel de exposiciones a las vibraciones.

Con la metodología empleada, se garantiza que los valores que se obtendrán en posteriores mediciones estarán por debajo de los calculados con un grado de seguridad del 95% (que suele ser suficiente en los aspectos dinámicos no catastróficos, como la calidad de marcha o el confort).

Si las medidas se realizan a velocidades superiores a las de operación, las vibraciones serán mayores, por lo que se puede utilizar el índice calculado a partir de los ensayos de certificación (con una velocidad un 10% superior a la de operación) siempre que se encuentre por debajo de límite.

Se evalúa la media cuadrática de los tres ejes a la vez, ya que en ocasiones predomina el eje vertical y en ocasiones el eje lateral, siendo el longitudinal en general despreciable.

Dado que no está claro cómo afectan las vibraciones con alto contenido en impactos en el ferrocarril, se incluyen factores de mayoración que solo tienen efecto en caso de que se alcanzasen valores de Sed importantes (según se indica en la ISO 2631-5).

Se utilizará como método de medida el valor eficaz ponderado o Root Mean Square, ya que es el más extendido. Aunque presenta algunas carencias, hay que tener en cuenta que se analiza el R.M.S calculado cada 5 segundos, por lo que tiene en cuenta cualquier pequeña perturbación, eliminando el efecto homogeneizador del R.M.S. calculado a lo largo de todo el periodo de medida. Si la vibración presenta alto contenido en impactos se verá reflejado mediante el factor de mayoración,

7.7 Conclusión

En este capítulo se han propuesto dos índices, uno para la homologación y autorización de vehículos ferroviarios desde el punto de la salud como ya existen en otros sectores, como es el índice de emisión de vibraciones, y otro para tomar las decisiones sobre qué medidas se deben tomar en caso de que se superen los límites.

En el primer caso, el índice se calcula a partir de las medidas que se pueden tomadas en los ensayos que se realizan actualmente en la homologación dinámica de los vehículos y no implican mayor número de ensayos y pruebas. Como se puede observar en la Figura 7.7.1, el índice definido como IEV está por encima de las medidas que se pueden realizar en tramos aislados. Tan solo la pasada 3 está ligeramente por encima de dicho índice, debido a que es un recorrido especialmente sinuoso y con una calidad de vía muy mala. En ese caso se debería realizar un estudio más exhaustivo sobre el nivel de dosis de vibración que recibe el conductor, pero era de esperar que el valor obtenido fuese mayor, debido a la mala calidad de la vía. Sin embargo, solo por ese valor no se puede deducir que el vehículo no sea homologable desde el punto de vista del efecto de las vibraciones en la salud de los conductores.

La Tabla 7-6 muestra los parámetros de influencia en las vibraciones en el puesto de conducción de vehículos ferroviarios. El IEV combina ambos parámetros para garantizar en todo momento la salud, pero no penalizando la certificación de los vehículos. Tanto un procedimiento demasiado laxo, como un procedimiento demasiado estricto que no permita certificar ningún vehículo sería perjudicial para los conductores y para la industria.

Figura 7.7.1. IEV vs valores según la normativa de salud ISO 2631).

Se ha demostrado que el procedimiento propuesto presenta menos variabilidad que la normativa actual, aunque se pueden elegir distintos tramos dentro de las medidas realizadas para la certificación.

En la Figura 7.6.2 se observa la variabilidad comparando las distintas metodologías propuestas (para el caso del IEV el eje x no corresponde al identificador de pasada si no a la combinación de tramos). El hecho de disponer de un procedimiento con el que se obtienen resultados más homogéneos permitirá a su vez valorar mejor si los límites actuales son válidos, comparar estudios y test realizados y obtener un proceso de certificación sencillo, aunque del lado de la seguridad.

También se ha demostrado que la variación de los porcentajes utilizados en el cálculo del índice, influyen en menor manera en obtener un índice que disminuya la variabilidad de las medidas obtenidas desde el punto de vista de la salud. (Figura 7.7.3).

Parece mejor utilizar para la certificación del vehículo cualquiera de los índices propuestos, que medidas concretas en tramos concretos como indica la normativa.

Para el caso del nivel de exposición a las vibraciones, el procedimiento descrito tampoco exigiría mediciones adicionales, ya que combina las mediciones realizadas en la homologación dinámica con el conocimiento de la vía en particular en la que se va a emplear el vehículo. Estos datos suelen estar disponibles por parte de las administraciones encargadas del mantenimiento de las vías y/o deberían ser contractuales entre el mantenedor de la infraestructura y el operador.

Tabla 7-6. Comparativa de los distintos parámetros de influencia.

Parámetro	Homologación dinámica del vehículo ferroviario	Homologación desde el punto de vista de la salud
Aceleración a medir	$\ddot{a}_y$ suelo cabina $\ddot{a}_z$ suelo cabina	$\ddot{a}_x$ cojín $\ddot{a}_y$ cojín $\ddot{a}_z$ cojín
Filtros	EN 14363	EN 12299
Zonas de ensayo	Rectas y curvas de radio grande, pequeño y muy pequeño	Rectas y curvas de radio grande, pequeño y muy pequeño
Medidas	Tramos cada 500 m (mínimo 25 tramos)	Cada 5 segundos (mínimo 12.500 m)
Estadístico	Percentil 99 (seguridad) y 95 (confort)	Percentil 95

Figura 7.7.2. Índice de emisiones del vehículo calculado con diferentes mediciones de sección de vía resultantes de una combinación de diferentes tests de la Tabla 2 frente a los valores calculados en los ensayos completos en cada combinación de prueba, según ISO 2631-1 (1997). Los corchetes muestran la variabilidad de los resultados de VEI (azul sólido), peor eje (rojo) y VTV (verde discontinuo) (elaboración propia).

Figura 7.7.3. Variación del IEV en función de los porcentajes elegidos para los tramos (elaboración propia).

Como se puede observar en la Figura 7.7.4, el nivel de exposición de vibraciones calculado, frente al valor medido se encuentra siempre por encima. Esto garantiza la seguridad del procedimiento, ya que valores por encima de 0.5 m/s^2 implicarán medidas adicionales de seguridad para garantizar la exposición a las vibraciones, que en este caso serían necesarios en tramos como el que se circula en la pasada 11.

Figura 7.7.4. Nivel de exposición de vibraciones frente a valores medidos (elaboración propia).

Sería necesario demostrar que la metodología coincide con la que se emplea en la certificación dinámica de los trenes, aunque se procesen las aceleraciones de un modo diferente.

Por último, sería necesario comprobar si se puede partir de los datos medidos en el suelo, extrapolar a los datos obtenidos en la interfaz. Como se ha indicado en capítulos anteriores, estos asientos pueden cambiar a lo largo de la vida del vehículo. Adicionalmente, el conocimiento de la aplicación de las funciones de transferencia, y el comportamiento dinámico del asiento y conductor, serviría para una mejor elección del asiento necesario desde una fase temprana del diseño del vehículo.

8 AMPLIACIÓN DE LA VALIDACIÓN DEL ÍNDICE Y EL PROCEDIMIENTO MEDIANTE VALORES CALCULADOS. MODELO DE REDES NEURONALES.

El objetivo en este capítulo es buscar un sistema que permita predecir las aceleraciones en el interfaz cojín conductor para poder utilizar las medidas obtenidas en el proceso de certificación del vehículo ferroviario (en el que se miden las aceleraciones en el piso de la cabina).

Por eso se propone la utilización de un modelo de redes neuronales que ha sido utilizado en otros campos de la ingeniería con éxito. Con este modelo se puede calcular las aceleraciones en el asiento y ampliar el número de tramos que se utilizan en el estudio y comprobar la robustez del indicador propuesto.

Si se consigue definir un modelo que simule el comportamiento dinámico del sistema “asiento-conductor” los datos de las aceleraciones medidas en el piso de la cabina podrían ser utilizados para demostrar cual será en nivel de vibraciones que sufrirá un conductor de un vehículo ferroviario en su turno de trabajo, eliminando los importantes factores de aleatoriedad.

Principalmente el peso de los distintos conductores que realizan las pruebas, y el comportamiento de los mismos (movimientos impulsivos, modificación de la posición en el asiento) producen alta variabilidad en las medidas. En ocasiones se pueden confundir con impactos y choques. Asimismo, podría servir para realizar el análisis de riesgos que requiere la directiva 2002/44 para cada uno de los recorridos y cada uno de los vehículos que emplea un operador sin que fuera necesario llevar a cabo las costosas pruebas requeridas en ese caso.

A lo largo de este capítulo se investigará la posibilidad de utilización de redes neuronales para la predicción de la vibración recibida en el asiento del conductor, entrenadas a partir de la selección y tratamiento de datos de vibración en el piso de la cabina obtenidos en el proceso de homologación dinámica del vehículo.

8.1 Sistema estudiado.

8.1.1 Vehículo.

El vehículo utilizado para realizar las mediciones se trata de un tren de alta velocidad que puede circular también por la red convencional. Se componen de dos cabezas motrices en ambos extremos del tren y coches intermedios destinados al transporte de pasajeros. La cabina está diseñada según los estándares de ergonomía indicados en la UIC 651, disponiendo de un sistema de aire acondicionado, pupitre y armarios eléctricos de control del tren. La cabina está presurizada para evitar el efecto de las ondas de presión en túneles.

8.1.2 Asiento objeto del estudio.

El asiento de la locomotora utilizada en el estudio (Figura 8.1.1) es del tipo tijera según el estado del arte, dotado de respaldo reposacabezas, apoyabrazos, y suspensión de muelles y amortiguadores. La situación dentro de la cabina está estudiada para cumplir con los estándares de ergonomía.

Figura 8.1.1. Asiento utilizado en el estudio. Izquierda: vista general del asiento y su situación en la cabina. Derecha: detalle de la suspensión.

Figura 8.1.2. Componentes del asiento utilizado en el estudio. A: Ajuste vertical. B: reposabrazos. C: suspensión. D: Respaldo de inclinación regulable. E: Reposacabezas. F: Articulación. G: Ajuste inclinación. H: tope de la suspensión. I: base del cojín. J: Base. K: ajuste longitudinal.

Las características técnicas del asiento son las mostradas en la Figura 8.1.2 y en la Tabla 8-1. El hecho de poseer una suspensión resorte-amortiguador guiada por medio de mecanismo articulado, incluyendo guías lineales -con su correspondiente rozamiento- y topes hace que el comportamiento sea altamente no lineal. Además, hay que considerar las holguras de montaje (tanto en el amarre del asiento al piso de la cabina como en los elementos de montaje propios del asiento y en el resorte-amortiguador) que se incrementan si el mantenimiento no es correcto.

Por último, el propio cuerpo del conductor y su postura, así como las variaciones de la inercia en función del conductor, hacen muy complicada la simplificación del sistema dinámico conductor-asiento asimilándolo a un sistema lineal.

Tabla 8-1. Características del asiento.

Anchura total	560 mm
Altura total	1.042 - 1.187 mm
Profundidad total	555 + 220 mm
Altura del asiento	665 - 725 mm
Inclinación del respaldo	12°/27°
Inclinación del asiento	-4°/2°
Espacio entre brazos	456 mm
Apoyabrazos	190 mm
Profundidad de los asientos	440 mm
Altura del reposacabezas	150 mm

8.1.3 Instrumentación utilizada.

Dado que para el cálculo de la dosis de vibración recibida por el conductor se pretende utilizar la información de la homologación dinámica del vehículo (aceleraciones en el piso de cabina utilizados para el cálculo de la calidad de marcha), la instrumentación utilizada para la evaluación de los datos de entrada de la red (Figura 5.1.2) es únicamente la empleada para dichas pruebas de homologación dinámica según se describe en el capítulo 5.1 y el cojín según se ha descrito en el capítulo 7.1.

8.1.4 Registros utilizados.

Para la adquisición de las señales tanto en el piso de cabina como en el asiento se han aprovechado algunas de las pasadas realizadas durante el proceso de certificación dinámica del tren. De este modo se puede comprobar el comportamiento dinámico en distintas situaciones, de modo que el entrenamiento de la red sea más extenso y se permita un modelo más general. La Tabla 8-2 muestra las características de los tramos utilizados. Los tipos de vía se clasifican como se indica en la normativa ferroviaria EN 14363.

Tabla 8-2. Tramos utilizados para la adquisición de información dinámica.

Recorrido tipo	Velocidad media (km/h)	Radios (m)	Calidad de vía	Long tramo (km)	Numero de pasadas
Curvas de radio pequeño y velocidad baja	100	$250 < R < 400$	QN2-QN3	20-40	3
Curvas de radio media y velocidad media	160	$400 < R < 600$	QN2	50	5
Curvas de velocidad alta y radio grande	200	$600 < R < 5000$	QN1-QN2	50	2
Curvas de alta velocidad	250	$5000 < R$	QN1	60	1

La Figura 8.1.3 muestra el registro de velocidad de vehículo y velocidad de giro en un tramo tipo QN2 con numerosas curvas. En la Figura 8.1.4 se observan las aceleraciones medidas en el piso de la cabina medidas según una media móvil de 5 s. En este caso se puede comprobar cómo al tratarse de un tramo sinuoso de curvas cerradas el valor de las aceleraciones laterales es superior a las verticales. En la Figura 8.1.5 se muestran las aceleraciones típicas medidas en el cojín instrumentado. Puede comprobarse cómo la aceleración longitudinal medida es más de dos órdenes de magnitud menor que las aceleraciones transversal y vertical.

Figura 8.1.3 Velocidad lineal y velocidad de giro registradas en un tramo tipo QN2.

Figura 8.1.4. Aceleraciones en el piso de la cabina. Línea azul: aceleración filtrada según ISO. Línea verde: aceleración filtrada según UIC. Línea roja: aceleración R.M.S. promedio (elaboración propia).

Figura 8.1.5. Aceleraciones medidas en cojín en un tramo representativo (elaboración propia).

8.1.5 Diseño de la red neuronal.

Con objeto de conseguir la máxima correlación entre las aceleraciones en la interfaz asiento-conductor generadas por la red neuronal y las realmente medidas con el cojín instrumentado, para el diseño de la red neuronal se seguirán una serie de etapas. Se llevará a cabo una selección de las variables de entrada a la red, basada en la búsqueda de señales cuya correlación con las variables de salida sea relevante y se maximice la correlación entre la salida de la red y los datos medidos en el cojín instrumentado. Se llevará también a cabo un preprocesado de dichas señales de entrada, consistente en la secuenciación de los registros y la búsqueda de segmentos de datos representativos, así como en el filtrado de dichos segmentos en el rango adecuado de frecuencias. A continuación, se comprobará la plausibilidad entre los datos recogidos en las distintas variables de entrada. Se dispondrá entonces de una serie de segmentos de datos de entrada con una calidad suficiente

como para proceder al entrenamiento de redes parciales (una por segmento de datos). La red final, que denominaremos “completa”, se configurará a partir de la información resultante de la unión de los segmentos de datos correspondientes a los tramos con mejores resultados de correlación en las redes parciales. Por último, se procederá a la validación de la red final con tramos a los que no ha sido expuesta durante la fase de entrenamiento.

8.1.5.1 *Selección del tipo de red y selección y preprocesado de señales.*

Se va a utilizar una red neuronal con una capa oculta con una función de transferencia sigmoidea y un número variable de neuronas, y una capa de salida con una función de transferencia lineal y tantas neuronas como salidas introducidas. Las dos capas tienen conexiones feed-forward. Se ha elegido este tipo de combinación de funciones de transferencia porque son capaces de aproximar de una manera aceptable señales no lineales.

El número de neuronas de la capa oculta de la red se ha determinado para obtener una solución de compromiso entre exactitud y tiempo de procesado, como puede observarse en la Figura 8.1.6. A partir de un número determinado de neuronas, para la misma longitud de muestra, la red no presenta mejoras relevantes en la correlación calculada y queda penalizada por el tiempo de procesamiento, pudiendo caer incluso en pérdida de generalidad debida a sobreentrenamiento.

También habrá que tener en cuenta el uso de recursos del sistema de computación, ya que muestras muy grandes exceden la capacidad de memoria cuando se supera un número máximo de neuronas, impidiendo el cálculo.

Figura 8.1.6. Influencia del número de neuronas en la correlación y tiempo de procesado (elaboración propia).

Una vez seleccionado el tipo de red, se seleccionarán las variables de entrada a utilizar. Se ha decidido no incluir la aceleración longitudinal medida en el cojín, ya que se comprueba que es dos órdenes de magnitud menor que las demás aceleraciones (Figura 8.1.7) e induce a peores correlaciones obtenidas en cualquier red parcial evaluada. Por otra parte, al tener un valor tan pequeño, esta variable no tendrá prácticamente influencia en el cálculo de los indicadores de dosis de vibración establecidos por la normativa.

Un primer criterio para la selección de variables de entrada es la comparación gráfica de las diferentes variables de entrada con las aceleraciones transversal y vertical medidas en el cojín, con el fin de hallar algún tipo de relación, tal y como muestra la Figura 8.1.8. Por otra parte, se obtiene la matriz de correlaciones cruzadas entre las variables (Figura 8.1.9), buscando picos en la zona de respuesta dinámica esperable (entre 5 y 20 Hz, es decir, entre 0.2 y 0.05 segundos) lo cual permite detectar influencias dinámicas entre variables, no detectables a través del análisis de la representación gráfica.

Figura 8.1.7. Estudio gráfico de relaciones entre señales de entrada y salida (elaboración propia).

Figura 8.1.8. Estudio de relaciones entre señales de entrada y salida. Matriz de correlaciones (elaboración propia).

A continuación se dividieron los datos registrados en cada canal de lectura, para cada una de las diferentes pasadas mostradas en la Figura 8.1.9, en segmentos de datos en los que la velocidad del vehículo fuera constante, con el fin de poder combinarlos posteriormente y reflejar la influencia de las distintas velocidades a la hora de entrenar a la red, como se muestra en la Figura 8.1.10. Toda la información contenida en los tramos enumerados en la Figura 8.1.9 se descompuso en un total de 5 segmentos de datos.

Figura 8.1.9 División en segmentos de datos (elaboración propia).

Tras esta división de tramos en segmentos, se procede a un filtrado de las señales en cada segmento de datos con un filtro pasa banda entre 0.5 y 20 Hz, que es el rango de frecuencias con más contenido energético y efectos fisiológicos, que por otra parte es el que más influencia tiene en el cálculo de los indicadores de dosis de vibración establecidos por la normativa. Este filtrado permite además eliminar la orografía del terreno.

A continuación, se examinó la coherencia de los datos recogidos, con el fin de eliminar tramos con medidas erróneas que pudieran introducir errores en el entrenamiento de la red. Por ejemplo, se eliminaron tramos en los que existían aceleraciones laterales grandes cuando el giróscopo indicaba pasos por rectas o tramos en los que existía una aceleración vertical brusca en el cojín y no se había detectado en el piso.

Se realiza ahora el entrenamiento y validación de cada red parcial, es decir, configurada con cada uno de los diferentes segmentos de datos. La influencia de la etapa de preprocesado en la calidad de cada red se refleja en la Tabla 8-3. Es de destacar también cómo la inclusión de las velocidades integradas numéricamente a partir de las aceleraciones que se introducen a la red produce un incremento considerable en la correlación. Dichas velocidades también se han tratado con un filtro de paso alto de 0.5 Hz para así eliminar la componente de continua de la señal originada por el valor inicial de las aceleraciones en el proceso de integración numérica, que era obviamente desconocido.

Tabla 8-3. Efecto de las diferentes estrategias de preprocesado de las señales de entrada en la correlación obtenida en las redes parciales.

Estado	Variables de la red neuronal	Correlación output - target
1	Aceleraciones piso sin filtrar + Aceleraciones cojín sin filtrar	0.092
2	Aceleraciones piso filtradas + Velocidades piso sin filtrar + Aceleraciones cojín sin filtrar	0.3
3	Aceleraciones piso sin filtrar + Velocidades piso filtradas + Aceleraciones cojín sin filtrar	0.45
4	Aceleraciones piso filtradas + Velocidades piso filtradas + Aceleraciones cojín sin filtrar	0.6
5	Aceleraciones piso filtradas + Aceleraciones cojín filtradas	0.72
6	Aceleraciones piso filtradas + Velocidades filtradas + Aceleraciones cojín filtradas	0.85

Figura 8.1.10. Plausibilidad de aceleraciones laterales (gráfica superior) y verticales (gráfica inferior) (elaboración propia).

En dicha Tabla se observa que la ausencia de filtrado de las señales de aceleración introduce un error correspondiente a la orografía del terreno que contamina la red neuronal y la lleva a valores muy bajos de correlación entre la simulación y la realidad. Asimismo, se observa que la introducción de variables que

guardan relación entre sí aporta más información a la red acerca de la evolución del sistema por lo que se traduce también en valores crecientes de correlación (además del filtrado necesario de estos canales).

Por último, debido a que el peso es determinante en la evolución de las aceleraciones verticales, pero no lo es tanto en las transversales –como se comprobará posteriormente –, se decidió simular dos tipos de redes con una variable de salida distinta cada una (aceleración transversal o vertical del cojín); una red neuronal con aceleraciones y velocidades en los tres ejes y la señal de giróscopo como señales de entrada y otra red con las mismas aceleraciones y velocidades integradas y una señal constante que refleje el peso del conductor (Figura 8.1.11).

Figura 8.1.11. Redes neuronales planteadas (elaboración propia).

8.1.5.2 Entrenamiento de las redes completas.

Tras esta etapa de preprocesado de los datos obtenidos, y una vez obtenidos las redes neuronales parciales para un total de 38 segmentos analizados, se han seleccionado los segmentos de datos que han presentado redes con los mejores niveles de correlación y se han entrenado nuevas redes, a la que denominaremos completas, con datos de entrada consistentes en la unión de dichos segmentos. Las

Tabla 8-4 y Tabla 8-5 muestran los resultados de correlación obtenidos. Se han obtenido menores niveles de correlación a la hora de simular la aceleración vertical debido a la influencia que tiene el peso de los distintos conductores sobre las lecturas de los acelerómetros situados en el cojín, lo cual indica además que este factor no influye mucho en la aceleración lateral, por lo que la hipótesis de no introducir el peso en la red neuronal que simula las aceleraciones laterales es correcta. Las desviaciones halladas también vienen dadas por las fuertes componentes no lineales propias del asiento de las que se ha hablado anteriormente. Sin embargo, el efecto de esta menor correlación en la red vertical sobre los resultados en los indicadores de vibración será pequeño.

8.1.6 Resultados y discusión del modelo de redes neuronales.

Para la validación de las redes completas obtenidas se utilizaron tramos que no habían formado parte del entrenamiento de la red neuronal y que además reunieran distintas tipologías en cuanto a calidades, trazado y velocidades de vía, con el fin de evaluar la respuesta de la red ante distintos casos de aplicación. La

Tabla 8-6 muestra las características de los tramos utilizados para la comprobación.

Tabla 8-4. Entrenamiento red neuronal lateral

Tramo utilizado	Correlación obtenida
1	0.9
2	0.93
3	0.93
4	0.92
5	0.94
6	0.94
7	0.93
8	0.9
9	0.89
10	0.94
11	0.95
12	0.96
13	0.95
14	0.9
15	0.9
16	0.93
Correlación media	0.92

Tabla 8-5. Entrenamiento red neuronal vertical (elaboración propia).

Tramo utilizado	Correlación obtenida
1	0.96
2	0.71
3	0.74
4	0.74
5	0.72
6	0.86
7	0.87
8	0.7
9	0.7
10	0.78
11	0.79
12	0.8
13	0.78
14	0.84
15	0.78
Correlación media	0.79

Tabla 8-6. Tramos de validación utilizados (elaboración propia).

Tramo de validación	Número de muestras	Velocidad (km/h)	Calidad vía
1	11000	116 - 122	QN1 – QN2
2	27800	98 - 108	QN2 – QN3
3	106040	70 - 95	QN2 – QN3

Una vez obtenidos los resultados de la simulación, se procede a comparar con las aceleraciones medidas en el cojín para cada tramo de validación propuesto, dando lugar a los valores de simulación de aceleración lateral en cojín mostrados en la Tabla 8-7.

Tabla 8-7. Tramos de validación, aceleraciones laterales en cojín (elaboración propia).

Resultados	Coefficiente Correlación	R.M.S. [error%]	Peak factor [error%]
Sección 1			
Simulado	0.88.	0.148 [-7.4%]	4.64[3%]
Real		0.137	4.78
Sección 2			
Simulado	0.89	0.136 [14.0%]	5.2[-0.8%]
Real		0.155	5.16
Sección 3			
Simulado	0.94	0.217 [11.5%]	0.163 [1.2%]
Real		0.242	0.165

A la vista de estos datos se observa que la simulación es capaz de predecir aceleraciones laterales en el cojín con un error aceptable, en torno a un 10 %, por lo que la red neuronal para las aceleraciones laterales quedaría validada en este caso.

Como muestra, en la Figura 8.1.12 se puede observar la superposición de la señal de aceleración lateral real (azul) y simulada (verde) en el dominio del tiempo y de la frecuencia para un tramo de validación, pudiéndose observar que tanto los valores R.M.S. y de picos de las dos señales son muy similares.

Figura 8.1.12 Comparación entre señales reales y simuladas en tiempo y frecuencia, aceleración lateral (elaboración propia)..

En cuanto a las aceleraciones verticales, se procedió de manera idéntica, con los mismos tramos de simulación, ofreciendo los resultados mostrados en la Tabla 8-8. Para la evaluación de resultados de la red vertical se utilizó un peso del conductor de 75 kg.

Tabla 8-8. Tramos de validación, aceleraciones verticales en cojín (elaboración propia).

Resultados	Coefficiente de correlación	R.M.S. [error%]	Peak factor [error%]
Sección 1			
Simulado	0.88	0.148 [-7.4%]	4.64[3%]
Real		0.137	4.78
Sección 2			
Simulado	0.89	0.136 [14.0%]	5.2[-0.8%]
Real		0.155	5.16
Sección 3			
Simulado	0.94	0.217 [11.5%]	0.163 [1.2%]
Real		0.242	0.165

De estos resultados se desprende que el peso es una variable a tener en cuenta a la hora de predecir los resultados, debido a que la correlación general que tenía la red ha bajado para los tramos de validación simulados, con datos precisos acerca de los conductores, la red sería probablemente más eficaz.

En este caso se puede observar que, a pesar de obtener menores valores de correlación, la diferencia entre los valores R.M.S. y de cresta obtenidos de la simulación tampoco difieren significativamente de los valores reales medidos.

También se pueden comparar las señales simuladas de aceleración vertical en cojín con las realmente medidas, en el dominio del tiempo y de la frecuencia. Como muestra la Figura 8.1.13, los valores son muy razonablemente comparables, siendo esta afirmación especialmente válida si se tiene en consideración la falta de información sobre el peso del conductor a la hora de entrenar la red neuronal correspondiente.

Figura 8.1.13. Comparación entre señales reales y simuladas en tiempo y frecuencia, aceleración vertical (elaboración propia).

8.1.7 Conclusiones sobre el modelo de redes neuronales.

De la comparación entre los valores simulados y los valores reales utilizados para la comprobación de la red se puede deducir que la red utilizada arroja resultados muy satisfactorios.

Tanto en el espectro del tiempo como en el espectro de la frecuencia los resultados son muy similares y las coherencias obtenidas son cercanas a 1.

Una analizado el comportamiento de la red, podría ser utilizada para la obtención de más medidas en el proceso de evaluación de la dosis de vibración que recibe el conductor de trenes.

Realizando medidas en un tramo cualquiera con un tren y un asiento determinado se puede obtener la red correspondiente.

Con esta red podría calcularse las aceleraciones a las que está sometido el conductor partiendo de las aceleraciones que se midieron a nivel de suelo en el momento de certificación del vehículo.

De este modo se puede calcular el índice de emisión de vibraciones del vehículo y caracterizarlo desde el punto de vista de la salud del conductor.

Incluso podría calcularse el índice de emisiones para el tramo o los tramos en los que suele circular y garantizar así que se encuentra dentro de los límites que establece la normativa. El objetivo sería garantizar la salud de los conductores en todo momento.

Se observa la importante influencia del peso del conductor. En sucesivos ensayos será determinante controlar el peso del maquinista que conduce en el momento del ensayo el tren para conseguir mejores resultados en la obtención de la red neuronal.

8.2 Aplicación modelo redes neuronales para el cálculo índice de emisión.

8.2.1 Introducción.

Una vez establecido el modelo de redes neuronales que simula el comportamiento del sistema dinámico “asiento-conductor” se procederá a aplicar para el cálculo del índice de emisiones del vehículo a partir de las aceleraciones medidas en el piso de cabina (Muñoz Guijosa, Riesco, y Olmedo 2017).

Las medidas de las aceleraciones en el piso de cabina son las obtenidas durante el proceso de homologación dinámica del vehículo, necesarias para el cálculo de la dinámica de marcha requerido por la normativa EN 14663.

El resultado obtenido se puede comparar con los resultados obtenidos en capítulos anteriores, basado en medidas reales tomadas directamente en la interfaz asiento conductor.

Para ello, es necesario seguir el procedimiento descrito en el capítulo 6, en el que se define el índice de emisión de vibraciones, donde para cada subíndice se extraen ciertos tramos necesarios para el cálculo según el radio de las curvas y la calidad de vía.

Si el error respecto al índice calculado a partir de valores reales es pequeño, este método podría ser válido para realizar una determinar el índice de emisión de vibraciones de vehículos a partir de las aceleraciones que se midieron en su día en el proceso de homologación del vehículo.

Es cierto que para utilizar este método es necesario utilizar el modelo de redes neuronales propio del asiento- conductor en uso en cada vehículo.

8.2.2 Datos de partida.

Como se ha indicado se utilizarán los datos obtenidos en ciertas pasadas medidos durante los ensayos de certificación dinámica.

En la Tabla 8-9 se muestran las pasadas utilizadas, así como los datos característicos de cada uno de estas pasadas.

El tipo de línea viene definido por la velocidad, número y radio de las curvas y la calidad de la vía. Las líneas son las descritas en el capítulo 7.

Es cierto que para utilizar este método es necesario utilizar el modelo de redes neuronales propio del asiento- conductor en uso en cada vehículo.

Tabla 8-9. Pasadas utilizadas para la simulación de las aceleraciones en el Asiento del conductor (elaboración propia).

Pasada	Tiempo adquisición (s)	LINEA	Pki	Pkf	Velocidad (km/h)	Frecuencia (Hz)
1	971	Línea 1	182	121	242	250
2	393	Línea 2	122	135	120	250
3	295	Línea 2	89	98	120	250
4	688	Línea 2	98	118	120	250
5	350	Línea 2	121	133	120	250
6	367	Línea 2	122	134	120	250
7	1717	Línea 2	66	113	120	250
8	1129	Línea 2	66	98	120	250
9	539	Línea 2	98	113	120	250
10	1188	Línea 6	55	82	90	250
11	764	Línea 6	84	102	90	250
12	949	Línea 1	122	181	242	250
13	949	Línea 1	122	182	242	250
14	2177	Línea 6	101	54	90	250
15	939	Línea 1	122	181	242	250
16	947	Línea 1	122	182	242	250
17	931	Línea 1	122	180	242	250
18	690	Línea 1	140	182	242	250
19	955	Línea 1	122	182	242	250
20	947	Línea 1	122	182	242	250
21	957	Línea 1	122	182	242	250
22	959	Línea 1	122	182	242	250
23	957	Línea 1	122	182	242	250
24	971	Línea 1	122	183	242	250
25	1723	Línea 3	330	212	275	250
26	1724	Línea 3	332	213	275	250
27	1677	Línea 3	330	215	275	250
28	1203	Línea 3	299	214	275	250
29	1170	Línea 3	301	218	275	250
30	994	Línea 3	286	216	275	250
31	928	Línea 3	284	216	275	250
32	928	Línea 3	284	216	275	250

8.2.3 Simulación de los datos de aceleraciones en el asiento.

Utilizando la red neuronal que se ha definido en la sección anterior, entrenada a partir de datos reales, se han calculado las aceleraciones en el asiento que se habrían obtenido para las pasadas de la certificación.

En la Figura 8.2.1 se muestra los resultados de alguna de las simulaciones para aceleraciones verticales y horizontales.

Figura 8.2.1. Aceleraciones en el asiento del conductor simuladas (verde) frente a las aceleraciones en el suelo de la cabina (azul) (elaboración propia).

Para las distintas pasadas se obtienen los resultados medios indicados en la Tabla 8-10.

De nuevo para estas simulaciones se puede observar la gran variabilidad que existe si se utilizase un tramo u otro únicamente para valorar la dosis de vibración.

Si se considera el VTV (Vibration Total Value), la variación puede llegar al 60% si se utiliza el peor o el mejor tramo.

Tabla 8-10. Valores R.M.S y percentiles simulados (elaboración propia).

Aceleraciones verticales (m/s ²)						Aceleraciones laterales (m/s ²)						
R.M.S.	Max	min	R.M.S.	99,99%	95,00%	R.M.S.	max	min	R.M.S.	99,90%	95,00%	VTV
0,100	1,265	-1,078	0,035	0,244	0,161	0,234	1,349	-1,412	0,054	0,411	0,319	0,358
0,070	0,525	-0,733	0,022	0,141	0,102	0,214	1,535	-1,303	0,064	0,620	0,319	0,335
0,059	0,458	-0,402	0,016	0,105	0,084	0,250	1,820	-1,261	0,087	0,633	0,407	0,415
0,062	0,455	-0,367	0,017	0,114	0,091	0,166	1,187	-0,850	0,048	0,319	0,260	0,275
0,049	0,437	-0,548	0,017	0,106	0,073	0,184	1,274	-1,357	0,055	0,370	0,289	0,298
0,045	0,358	-0,760	0,018	0,117	0,070	0,169	1,276	-1,025	0,049	0,283	0,248	0,257
0,078	1,094	-0,894	0,028	0,212	0,124	0,236	2,055	-1,322	0,065	0,545	0,349	0,370
0,072	0,588	-0,480	0,024	0,136	0,106	0,214	1,553	-1,407	0,059	0,388	0,309	0,327
0,100	1,136	-0,876	0,031	0,178	0,150	0,226	1,468	-1,761	0,049	0,382	0,303	0,338
0,062	0,749	-0,450	0,021	0,112	0,091	0,235	1,649	-1,189	0,089	0,485	0,388	0,398
0,088	0,970	-0,763	0,029	0,151	0,135	0,222	1,535	-1,254	0,059	0,386	0,315	0,342
0,067	0,700	-0,674	0,026	0,128	0,105	0,234	1,637	-1,152	0,077	0,510	0,363	0,378
0,083	1,183	-0,911	0,030	0,189	0,135	0,209	2,061	-1,602	0,062	0,513	0,315	0,343
0,062	0,990	-0,750	0,024	0,199	0,101	0,194	1,632	-1,511	0,061	0,427	0,286	0,303
0,062	0,647	-0,858	0,019	0,125	0,096	0,214	1,841	-1,563	0,061	0,499	0,316	0,330
0,084	0,970	-0,956	0,028	0,211	0,129	0,205	1,734	-1,437	0,057	0,420	0,294	0,321
0,096	1,168	-0,998	0,035	0,296	0,164	0,218	1,540	-1,490	0,050	0,352	0,308	0,349
0,070	0,589	-0,864	0,028	0,165	0,116	0,188	1,273	-1,371	0,058	0,337	0,291	0,313
0,070	0,806	-1,013	0,030	0,198	0,123	0,264	2,086	-1,678	0,098	0,428	0,310	0,334
0,082	1,129	-0,899	0,033	0,221	0,135	0,283	3,029	-2,105	0,099	0,430	0,336	0,362
0,068	1,004	-0,929	0,030	0,207	0,112	0,292	2,500	-1,738	0,106	0,467	0,333	0,352
0,052	0,594	-0,522	0,020	0,116	0,088	0,246	1,897	-1,995	0,097	0,525	0,411	0,420
0,069	0,803	-0,620	0,022	0,115	0,104	0,221	1,549	-1,279	0,076	0,431	0,343	0,359
0,049	0,544	-0,334	0,020	0,097	0,077	0,160	1,268	-1,108	0,046	0,285	0,243	0,255
0,065	0,609	-0,624	0,020	0,120	0,099	0,208	1,909	-1,628	0,065	0,519	0,315	0,330
0,068	0,679	-0,918	0,032	0,226	0,108	0,199	1,665	-1,340	0,082	0,476	0,336	0,353
0,098	1,336	-0,948	0,035	0,205	0,156	0,206	1,509	-1,352	0,051	0,410	0,292	0,331
0,106	1,009	-0,855	0,033	0,202	0,155	0,208	1,719	-1,426	0,053	0,390	0,295	0,333
0,106	1,009	-0,855	0,033	0,202	0,155	0,208	1,719	-1,426	0,053	0,390	0,295	0,333
0,090	0,938	-0,983	0,033	0,222	0,150	0,183	1,649	-1,483	0,048	0,358	0,266	0,305
0,105	1,205	-0,923	0,036	0,196	0,161	0,190	1,588	-1,199	0,046	0,347	0,274	0,317
0,068	1,117	-0,888	0,038	0,192	0,116	0,281	2,509	-2,133	0,154	0,435	0,358	0,376
0,083	1,205	-1,181	0,034	0,215	0,138	0,278	2,829	-2,074	0,110	0,395	0,342	0,368
0,081	1,108	-0,976	0,032	0,232	0,129	0,287	2,496	-1,967	0,105	0,439	0,337	0,361
0,088	0,975	-1,000	0,031	0,209	0,142	0,212	1,441	-1,725	0,054	0,399	0,310	0,342
0,111	1,493	-0,982	0,032	0,203	0,161	0,226	2,012	-1,324	0,056	0,430	0,315	0,354
0,099	1,578	-0,902	0,035	0,290	0,145	0,200	1,564	-1,419	0,050	0,387	0,283	0,318
0,119	1,205	-1,011	0,040	0,257	0,182	0,195	1,553	-1,370	0,045	0,340	0,272	0,327
0,089	1,083	-0,731	0,038	0,301	0,151	0,185	1,797	-1,422	0,048	0,337	0,271	0,310
0,108	1,158	-0,963	0,035	0,205	0,165	0,209	2,001	-1,708	0,055	0,434	0,291	0,335
0,090	1,182	-0,873	0,031	0,183	0,140	0,205	1,599	-1,096	0,047	0,337	0,279	0,312
0,240	1,681	-0,942	0,115	0,301	0,229	0,275	2,070	-1,908	0,086	0,463	0,293	0,372
0,182	1,674	-0,942	0,094	0,364	0,251	0,227	1,403	-1,379	0,059	0,447	0,329	0,414
0,183	1,728	-0,651	0,101	0,364	0,257	0,228	1,711	-2,247	0,063	0,407	0,324	0,413
0,233	1,850	-0,904	0,111	0,373	0,209	0,274	2,026	-1,941	0,080	0,471	0,286	0,354
0,136	1,511	-0,564	0,082	0,485	0,251	0,203	1,281	-1,361	0,061	0,499	0,317	0,404
0,179	1,652	-0,909	0,094	0,289	0,241	0,228	1,445	-1,430	0,063	0,422	0,333	0,411
0,175	1,704	-0,749	0,093	0,307	0,221	0,235	1,866	-1,838	0,067	0,518	0,341	0,406
0,149	1,531	-0,760	0,088	0,473	0,285	0,202	1,267	-1,438	0,061	0,665	0,301	0,414

8.2.4 Cálculo del índice de emisión de vibraciones.

Siguiendo el procedimiento definido en el capítulo 6, se ha calculado el índice de emisión de vibraciones del vehículo.

Como se dispone de muchos más tramos se ha calculado el índice de vibración de emisiones utilizando distintos tramos que cumplen los requisitos estipulados de curvas y calidad de vía.

En la Tabla 8-11 se muestran los distintos índices según se utilicen unos tramos u otros.

Tabla 8-11. Índices simulados con la red neuronal (elaboración propia).

índice de emisión de vibraciones	IEV	error	Error (%)
calculado según datos reales	0.4103		
calculado según tramos simulados (1)	0.4376	0.0273	6.65%
calculado según tramos simulados (2)	0.457	0.0467	11.38%
calculado según tramos simulados (4)	0.4112	0.0009	0.22%

Como se puede observar, el error de los tramos simulados frente a los tramos basados en datos reales está en torno al 10%. Por otro lado, como en el caso real, el índice de emisión de vibraciones es menos variable que si se utiliza cualquiera de los tramos singulares. Se puede deducir que dicho índice es más estable y puede caracterizar mejor el vehículo.

8.3 Conclusiones.

El método utilizado para simular las aceleraciones en la interfaz asiento conductor, permite calcular el índice de emisión de vibraciones a partir de las aceleraciones medidas en el piso de cabina.

El error cometido es inferior al 10%, lo cual puede ser tenido en cuenta como factor de seguridad. Si se sobrepasa el límite, ponderado por este factor, sería necesario realizar medidas reales.

Al utilizar este método se ha podido ampliar el número de tramos estudiados para comprobar la robustez del indicador, frente al uso de ciertas medidas o tramos como indica la normativa.

Figura 8.3.1. Valores R.M.S. y VTV según ISO 2631-1 simulados frente a nivel de exposición a las vibraciones simuladas (elaboración propia).

Como se observa en la Figura 8.3.1, la variación del indicador propuesto es mucho menor frente a los valores R.M.S. y VTV que podría servir para evaluación de las vibraciones que exige la normativa y la directiva europea.

9 CONCLUSIONES DE LA TESIS

9.1 Conclusiones de la tesis.

En esta tesis se ha examinado la problemática existente para la valoración de las vibraciones en los puestos de trabajo de los conductores de vehículos ferroviarios.

La normativa actual sobre vibraciones aplicada al sector ferroviario no parece ser suficiente para garantizar la salud de los conductores, sin que suponga un elevado coste a la industria y los operadores.

Los estudios existentes no son concluyentes. Además de escasos son difícilmente comparables entre sí debido a la distinta aplicación de la normativa.

Es cierto que las vibraciones en los puestos de trabajo han adquirido una relevancia que si no se establece un método adecuado de valoración puede ocasionar un incremento de los costes si hay que aplicar las nuevas directivas en Europa o resolver las demandas judiciales existentes al respecto en EEUU.

En esta tesis se propone la aplicación de un “índice de emisión de vibraciones” similar al existente en otros sectores de la industria donde las vibraciones son mayores.

Este índice intenta recoger todos aquellos aspectos que pueden caracterizar un vehículo desde un punto de vista del comportamiento dinámico del sistema vehículo-asiento-conductor.

Se valora el nivel de vibraciones cuando el vehículo circula por distintos tipos de vía y el índice es calculado como una combinación de subíndices. Estos subíndices son calculados a su vez de un modo similar a lo indicado en la normativa de evaluación de vibraciones de cuerpo completo, pero teniendo en cuenta las características de las vibraciones en entornos ferroviarios.

La combinación de los subíndices sería equivalente a una vía “tipo” para homogeneizar resultados entre vehículos.

El índice de emisión de vibraciones se compararía contra el límite establecido en la normativa y directivas existentes para certificar si un vehículo es apto desde el punto de vista de las vibraciones de cuerpo completo.

Se ha demostrado que este índice es mucho más robusto que los otros métodos propuestos por la normativa, incluso variando alguna de las suposiciones hechas para definir el índice.

No se requieren ensayos adicionales a los que ya se realizan en el proceso de certificación del tren, Tan solo es necesario disponer de un cojín triaxial en el asiento del maquinista para registrar las aceleraciones en la interfaz conductor-asiento.

Posteriormente mediante procesado y cálculo se puede obtener fácilmente este índice.

Así quedará caracterizado el vehículo de un modo general. Para el caso concreto en el que sea necesario valorar las vibraciones en un tramo concreto, se puede estimar el “nivel de exposición a las vibraciones” a partir de los datos obtenidos para el cálculo del índice y los datos de la vía concreta.

También se ha desarrollado un modelo basado en la técnica de redes neuronales para poder simular valores en la interfaz asiento- conductor a partir de los datos medidos en el piso de la cabina.

Con este modelo se han obtenido buenos resultados, cuando se comparan valores reales frente a valores calculados exponiendo la red neuronal a tramos nuevos que no habían sido usados para la etapa de aprendizaje de esta, obteniendo unos resultados satisfactorios en la simulación.

La aplicación de estos modelos de redes neuronales en la tecnología de captación de señales para un tipo determinado de cabina de conducción, permitiría poder aprovechar las lecturas de los ensayos dinámicos obligatorios de los vehículos ferroviarios para poder caracterizar dinámicamente el comportamiento de los asientos, evitando tener que realizar ensayos en laboratorio, lo que conllevaría un ahorro importante de costes.

Incluso podría servir para caracterizar, desde el punto de vista de las vibraciones, vehículos con el mismo tipo de asiento a partir de las medidas realizadas en el piso de cabina durante el proceso de certificación del vehículo.

Otra de las ventajas que supone la utilización de la simulación mediante redes neuronales es la capacidad de respuesta ante entradas desconocidas, pudiendo recrear con un grado suficientemente bueno de aproximación el comportamiento vibratorio real del asiento. Además de esto, supondría no tener que depender de un sistema de medida situado en la interfaz asiento – conductor, y por lo tanto evitar los errores en las mediciones atribuibles al factor humano, como puedan ser los movimientos involuntarios o de acomodo en el asiento.

Utilizando el modelo de redes neuronales se han obtenido nuevos datos de vibraciones en el asiento (calculados) y se ha calculado a partir de estos el “índice de emisión de vibraciones” del vehículo. Se demuestra de nuevo que este índice es más robusto que los valores de dosis de vibración que se obtienen aplicando la normativa de seguridad y salud. La variación del índice es menor al 10% mientras que aplicando la normativa se puede llegar a valores del 80%.

De este modo se ha podido calcular el índice de emisión de vibraciones utilizando las aceleraciones en el asiento, calculados a partir de las aceleraciones en el piso de cabina. Estas aceleraciones en el piso de cabina se miden en los procesos de certificación dinámica de todos los vehículos.

Siguiendo este procedimiento se puede calcular el índice de emisión de vibraciones sin tener que repetir las costosas pruebas que supondría medir mediante cojín en todos los recorridos necesarios.

9.2 Aportaciones científicas y académicas.

Durante el desarrollo de esta tesis se han publicado los siguientes artículos

- “Riesco, Enrique, y Juan Manuel Munoz-Guijosa. 2020. «An enhanced whole-body vibration emission index for railway vehicles». *Ergonomics*, junio, 1-11. <https://doi.org/10.1080/00140139.2020.1776899>.
- Muñoz Guijosa, Juan Manuel, Enrique Riesco, y M. Olmedo. 2017. «Neural Network and Training Strategy Design for Train Drivers’ Vibration Dose Simulation». *International Journal of Simulation Modelling* 16 (1): 72-83. http://www.ijssimm.com/Full_Papers/Fulltext2017/text16-1_72-83.pdf

Adicionalmente como apoyo a la tesis se ha desarrollado el Proyecto de fin de carrera nº 13406237 “Simulación mediante redes neuronales de la transmisibilidad de vibraciones de los asientos de conductor de vehículos ferroviarios y sus efectos fisiológicos”

9.3 Futuras investigaciones.

Esta tesis está focalizada en el procedimiento de cálculo y definición del índice de emisión de vibraciones. Pero el límite que permite certificar el vehículo es igual al indicado en la norma ISO 2631-1 y la directiva 44/2002. Para valorar la validez de este límite parece necesario realiza nuevos estudios que tengan en cuenta el efecto de las vibraciones en el cuerpo humano. Deberían ampliarse los estudios epidemiológicos existentes por un lado y estudios sobre el comportamiento de los órganos y tejidos del cuerpo humano al estar sometidos a vibraciones para evaluar la idoneidad de los límites establecidos.

El procedimiento de cálculo del índice de emisión de vibraciones se ha realizado en un vehículo que circula por distintas vías (con radios y calidades diversas). Es necesario ampliar el estudio a distintos vehículos, tanto del mismo segmento ferroviario como de distintos segmentos. Los vehículos como metros y tranvías circulan con numerosas paradas, y con poca distancia, por lo que la aceleración longitudinal puede ser más relevante.

Desde el punto de vista del diseño del ferrocarril, muchos de los parámetros son simulados en la etapa de ingeniería del proyecto. Las vibraciones en el piso de cabina se pueden simular a partir de los datos de la vía y modelos multicuerpos que intentan reproducir el comportamiento dinámico del vehículo. Si se dispone de modelos de redes neuronales del asiento, podría simularse a priori la dosis de vibración que recibe el maquinista. De este modo podría elegirse el mejor asiento para cada vehículo, que minimice las vibraciones que recibe el conductor. Al poseer un modelo que permite simular el comportamiento en vía, se puede llevar a cabo un proceso de optimización del asiento. Se pueden ajustar los parámetros, especialmente de la suspensión, para evitar transmisibilidades altas.

Si se consigue un método estándar de medición y valoración de las vibraciones, se podrían extraer más conclusiones de las medidas. Este hecho ayudaría a la industria a investigar de mejora del aislamiento frente a las vibraciones en los asientos de maquinistas.

REFERENCIAS.

- AEA TECHNOLOGY. 1999. «Introduction to railway vehicle dynamics.» Course notes.
- Ågren, Jan, y Jonas Westberg. 2002. «Interference of lateral vibrations on train passenger activities». *Vehicle System Dynamics* 37 (sup1): 409-19. <https://doi.org/10.1080/00423114.2002.11666250>.
- Ahmadian, Mehdi, T. Michael Seigler, Dennis Clapper, y Anthony Sprouse. 2002. «Alternative Test Methods for Long Term Dynamic Effects of Vehicle Seats». SAE Technical Paper 2002-01-3082. Warrendale, PA: SAE International. <https://doi.org/10.4271/2002-01-3082>.
- Akerstedt, Torbjörn. 1999. «Train Drivers' Working Conditions and Their Impact on Safety, Stress and Sleepiness: A Literature Review, Analyses of Accidents and Schedules». https://www.academia.edu/14015274/Train_drivers_working_conditions_and_their_impact_on_safe_ty_stress_and_sleepiness_a_literature_review_analyses_of_accidents_and_schedules.
- Alem, Nabih. 2005. «Application of the New ISO 2631-5 to Health Hazard Assessment of Repeated Shocks in U.S. Army Vehicles». *Industrial Health* 43 (3): 403-12. <https://doi.org/10.2486/indhealth.43.403>.
- Andres, R. 2017. «Litigation Focused on Ergonomic Issues - A Case Study». *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 61 (1): 494-97. <https://doi.org/10.1177/1541931213601606>.
- Arnautova-Bulat, S. 1979. «O mogućem djelovanju vibracija na kralješnicu u željeznici (On the possible effect of vibrations on the spine of railwaymen)». *Arhiv za Higijenu Rada i Toksikologiju* 30: 259-266.
- Azlis-Sani, J., M. F. bin Zaid, M. Yahya, S. Ismail, N. Ahmad Tajedi, R. Aziz, y R. Zein. 2015. «Evaluation of Whole Body Vibration and Back Pain Problem among Light Rapid Transit (LRT) Drivers». *Applied Mechanics and Materials* 773-774: 845-49. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.845>.
- Birlik, G. 2009. «Occupational Exposure to Whole Body Vibration-Train Drivers». *Industrial Health* 47 (1): 5-10. <https://doi.org/10.2486/indhealth.47.5>.
- Boileau, P. 2004. «Étude des mécanismes de conception visant à limiter l'importance des impacts occasionnés par le talonnement des sièges à suspension». Rapport R368. IRSST Etudes et recherches.
- Boileau, P.-E., J. Boutin, S. Rakheja, y H. Politis. 2005. «Évaluation de l'exposition aux vibrations globales du corps des opérateurs du métro de Montréal et étude du comportement dynamique des motrices et de leur système de suspension». Research Report R-420. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST). <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-420.pdf?v=2020-05-19>.
- Bongers, PM. 1990. «Back Disorders and Whole-Body Vibration at Work». Amsterdam: Universidad de Amsterdam.
- Bovenzi, Massimo. 2010. «A Longitudinal Study of Low Back Pain and Daily Vibration Exposure in Professional Drivers». *Industrial Health* 48 (5): 584-95. <https://doi.org/10.2486/indhealth.MSWBVI-02>.
- Bremseth. 2011. «Texas Jury Awards \$1.9 Million To BNSF Engineer For "Whole Body Vibration" Spinal Injuries». Bremseth Law Firm PC. 2011. <https://www.bremseth.com/success-stories/texas-jury-awards-1-9-million-to-bnsf-engineer-for-whole-body-vibration-spinal-injuries/>.
- Carlbom, Pelle. 2000. «Carbody and Passengers in Rail Vehicle Dynamics». KTH Stockholm. <https://pdfs.semanticscholar.org/d221/fbf2aa8c253de31e835615d4c9ae9c154d62.pdf>.
- CEN EN, European. 2007. «BS EN 14253:2003+A1:2007 Mechanical Vibration. Measurement and Calculation of Occupational Exposure to Whole-Body Vibration with Reference to Health. Practical Guidance». https://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:110:0:::FSP_PROJECT,FSP_ORG_ID:28759,6212&cs=177CC4AC811F55C85F3C106EAA412316A.

- Clément, P. 2003. «Grammer 3D axial suspension Seat vibration behaviour on SNCF BB 8700 locomotive.» France: SNCF – CIM.
- . 2005a. «Grammer 3D axial suspension seat vibration behaviour on SNCF BB 17000 locomotive train field test phase II.» France: SNCF – CIM.
- . 2005b. «Laboratory test protocol for assessing the vibration performance of seats equipped with horizontal suspensions. .» France: SNCF – CIM.
- Clément, P, y L Mirot. 2005. «An ergonomic study on SNCF locomotive cab simulator: Evaluation of the effects of vibrations on vehicle control performances.» France: SNCF – CIM.
- Cleon, Louis-Marie, y Guido Lauriks. 1996. «Evaluation of Passenger Comfort in Railway Vehicles»: *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, agosto. <https://doi.org/10.1177/026309239601500201>.
- Clot, Yves. 2006. «Bibliographie». *Le Travail humain* 5e éd.: 223-43.
- Coles, B. 2002. «Regulatory impact assessment of the Physical Agents (Vibration) Directive». London: Health and Safety Executive.
- Cooperrider, N. K., y J. J. Gordon. 2008. «Shock and Impact Levels on North American Locomotives». *Journal of Sound and Vibration* 318 (4): 809-19. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2008.04.042>.
- Corbridge, C., y M. J. Griffin. 1986. «Vibration and comfort: vertical and lateral motion in the range 0.5 to 5.0 Hz». *Ergonomics* 29 (2): 249-72. <https://doi.org/10.1080/00140138608968263>.
- Corbridge, C, M J Griffin, y P R Harborough. 1989. «Seat Dynamics and Passenger Comfort». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 203 (1): 57-64. https://doi.org/10.1243/PIME_PROC_1989_203_209_02.
- Demuth, Howard B., Mark H. Beale, Orlando De Jess, y Martin T. Hagan. 2014. *Neural Network Design*. 2nd ed. Stillwater, OK, USA: Martin Hagan.
- DiFiore, A., A. Zaouk, S. Durrani, N. Mansfield, y J. Punwani. 2012. «Long-Haul Whole-Body Vibration Assessment of Locomotive Cabs». En *Proceedings of the 2012 Joint Rail Conference*, 635-41. Philadelphia, PA, USA: American Society of Mechanical Engineers Digital Collection. <https://doi.org/10.1115/JRC2012-74075>.
- Eberhard, Chris. 2006. «Vibrationseinwirkung an Arbeitsplätzen . Kennwerte der handarm und Ganzkörper Schwingungbelastung». Report 6/2006. BGIA.
- EN 1032. s. f. *Mechanical vibration. Testing of mobile machinery in order to determine the vibration emission value*. Vol. European Committee for Standardization.
- EN 15827-3. 2008. «Railway applications. Bogies and running gear. Part 3. Dynamic requirements».
- «European Cab Ergonomics. Guidance Document». 2018. Locomotive Drivers Advisory Group (LDAG). https://www.aslef.org.uk/visageimages/Information/LDAG_Guidance_Document.pdf.
- European Directive 2002/44/EC. s. f. *Minimum Health and Safety Requirements Regarding the Exposure of Workers to the Risks Arising from Physical Agents (Vibration)*. Vol. European Commission. https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:546a09c0-3ad1-4c07-bcd5-9c3dae6b1668.0004.02/DOC_1&format=PDF.
- Evans, J. 2004. «EU Physical Agents Directives: Assessment of the impact of the EU physical agents directive: vibration». Research Report T315. RSSB managed cross-industry research project. United Kingdom. PB009493. <https://www.sparkrail.org/Lists/Records/DispForm.aspx?ID=9511>.
- Falah, A.H., W.W. Clark, y P.P. Phule. 1998. «Modeling of magnetorheological fluid damper with parallel plate behavior.» En . Washington.
- Farina. 2012. «Hoeyfarina». 2012. <http://www.hoeyfarina.com/railroadhflocomotivevibration>.
- Förstberg, J. 2000. «Ride comfort and motion sickness in tilting trains – A study on human responses to motion environments in train and simulator experiences. .» TRITA-FKT Report 2000:28., Stockholm: KTH.
- Förstberg, J., y T. Ledin. 1996. «Discomfort caused by low-frequency motions - A literature survey of hypotheses and possible causes of motion sickness». TRITA-FKT Report 1996:39. Stockholm: KTH.

- Garcia Ortiz. 2005. «Incidencia de la Directiva 2002/44/CE sobre disposiciones mínimas por exposición a vibraciones en equipos industriales». En . Tarrasa (España).
- Garg, Vijay Kumar, y Rao V. Dukkipati. 1984. *Dynamics of Railway Vehicle Systems*. New York: Academic Press.
- Goonetilleke, Ravindra S. 2016. «Designing to Miminize Discomfort»: *Ergonomics in Design*, julio. <https://doi.org/10.1177/106480469800600304>.
- Grabarek, Iwona. 2002. «Ergonomic Diagnosis of the Driver's Workplace in an Electric Locomotive». *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics* 8 (2): 225-42. <https://doi.org/10.1080/10803548.2002.11076526>.
- Greenidge, M. S. 2010. «Getting the Train on the Right Track: A Modern Proposal for Changes to the Federal Employers' Liability Act». *McGeorge Law Review* 41: 29.
- Griffin, M. J. 2007. «Discomfort from feeling vehicle vibration». *Vehicle System Dynamics* 45 (7-8): 679-98. <https://doi.org/10.1080/00423110701422426>.
- . 2012. *Handbook of Human Vibration*. Academic Press.
- Griffin, M.J. 2006. «Health effects of vibration – the known and the unknown». En *Proceedings of the First American Conference on Human Vibration*. <https://www.cdc.gov/niosh/docs/2006-140/pdfs/2006-140.pdf?id=10.26616/NIOSH PUB2006140>.
- Griffin, MJ, y K Ebe. 1995. «Effect of foam pad construction on vibration transmission». En . urume University School of Medicine.
- Guclu, Rahmi, y Kayhan Gulez. 2008. «Neural Network Control of Seat Vibrations of a Non-Linear Full Vehicle Model Using PMSM». *Mathematical and Computer Modelling* 47 (11): 1356-71. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2007.08.013>.
- Gunston, T, y M.J. Griffin. 2000. «An investigation of suspension seat damping using a theoretical Model». En .
- . 2004. «Analysis of workpackage 1 field data obtained in 2002 / 2003 with respect to vehicle floor motions and seat performance.» Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, UK.
- Hannon and Palermo. 2013. «Professional illness». 2013. <http://www.hannonandpalermo.com/verdicts.html>.
- Hannunkari, Iris, Erkki Järvinen, y Timo Partanen. 1978. «Work conditions and health of locomotive engineers. II. Questionnaire study, mortality and disability.» *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 4 (3): 15-28. <https://doi.org/10.5271/sjweh.2763>.
- Harrell, L. 1990. «The Effect of Intangible Product Attributes on Rail Passenger Demand with Special Reference to Ride Quality». Cranfield institute of technology centre for transport studies.
- Hasan, Jeddi. 1970. «Biomedical Aspects of Low-Frequency Vibration: A Selective Review». *Work, Environment, Health* 7 (1): 19-45.
- Hauck, M. 2001. «Geregelte Dämpfung für Traktor-Fahrsitze». Fachbereich Maschinenbau und Produktionstechnik der Technischen Universität Berlin.
- Hecht-nielsen, ROBERT. 1992. «III.3 - Theory of the Backpropagation Neural Network**Based on "Nonindent" by Robert Hecht-Nielsen, Which Appeared in Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks 1, 593–611, June 1989. © 1989 IEEE.» En *Neural Networks for Perception*, editado por Harry Wechsler, 65-93. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-741252-8.50010-8>.
- Hilera, José, y Victor Martinez Hernando. 1995. *Redes neuronales artificiales: fundamentos, modelos y aplicaciones / José Ramón Hilera González, Victor José Martínez Hernando. SERBIULA (sistema Librum 2.0)*.
- Hostens, I., y H. Ramon. 2003. «Descriptive Analysis of Combine Cabin Vibrations and Their Effect on the Human Body». *Journal of Sound and Vibration*, First International ISMA Workshop on Noise and Vibration in Agricultural and Biological Engineering, 266 (3): 453-64. [https://doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00578-9](https://doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00578-9).

- Howarth, H. V. C., y M. J. Griffin. 1990. «The Relative Importance of Noise and Vibration from Railways». *Applied Ergonomics* 21 (2): 129-34. [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(90\)90135-K](https://doi.org/10.1016/0003-6870(90)90135-K).
- Howarth, H.V.C. 2004. «A comparison of standardised methods of evaluating rail vehicle vibration with respect to passenger discomfort». En . Ludlow, UK.
- ISO 2631-1. s. f. «Mechanical vibration and shock- Evaluation of human exposure to whole- body vibration- Part 1: General requirements, second edition». *International Organization for Standardization*.
- ISO 2631-4. 2001. «Mechanical Vibration and Shock — Evaluation of Human Exposure to Whole-Body Vibration — Part 4: Guidelines for the Evaluation of the Effects of Vibration and Rotational Motion on Passenger and Crew Comfort in Fixed-Guideway Transport Systems». <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/21/32178.html>.
- ISO 2631-5. 2018. «ISO 2631-5:2018». <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/05/09/50905.html>.
- ISO 7096: 2020. «ISO 7096:2020(en) Earth-moving machinery — Laboratory evaluation of operator seat vibration». <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:7096:ed-4:v1:en>.
- ISO 10056. 2001. «Mechanical Vibration — Measurement and Analysis of Whole-Body Vibration to Which Passengers and Crew Are Exposed in Railway Vehicles». <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/30/33067.html>.
- ISO 10326-1. 2016. «Mechanical Vibration — Laboratory Method for Evaluating Vehicle Seat Vibration — Part 1: Basic Requirements». <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/06/76/67659.html>.
- Ji, Xiaoxu. 2015. «Evaluation of Suspension Seats Under Multi-Axis Vibration Excitations - A Neural Net Model Approach to Seat Selection». *Electronic Thesis and Dissertation Repository*, agosto. <https://ir.lib.uwo.ca/etd/3095>.
- Ji, Xiaoxu, Tammy R. Eger, y James P. Dickey. 2015. «Development of a seat selection algorithm to match industrial seats with specific forestry vibration exposures». *International Journal of Forest Engineering* 26 (1): 48-59. <https://doi.org/10.1080/14942119.2015.1007631>.
- Johanning, E. 2004. «Back disorder and ergonomic survey among north American railroad engineers». En *TRANSPORTATION RESEARCH BOARD - 83rd Annual Meeting*. Washington.
- Johanning, E., S. Fischer, E. Christ, B. Göres, y P. Landsbergis. 2002. «Whole-Body Vibration Exposure Study in U.S. Railroad Locomotives—An Ergonomic Risk Assessment». *AIHA Journal* 63 (4): 439-46. <https://doi.org/10.1080/15428110208984732>.
- Johanning, E., S. Fischer, E. Christ, B. Göres, y R. Luhrman. 2006. «Railroad locomotive whole-body vibration study: vibration, shocks and seat ergonomics». En *Proceedings Of The First American Conference On Human Vibration*. Morgantown, VW, USA.
- Johanning, E., P. Landsbergis, S. Fischer, E. Christ, B. Göres, y R. Luhrman. 2006. «Whole-Body Vibration and Ergonomic Study of US Railroad Locomotives». *Journal of Sound and Vibration*, Special Issue on the Third International Conference on Whole-body Vibration Injuries, 298 (3): 594-600. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.06.030>.
- Johanning, Eckardt. 1991. «Back disorders and health problems among subway train operators exposed to whole-body vibration». *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health* 17 (6): 414-19.
- Kauß, Wolfgang. 1981. *Aktive, hydraulische Schwingungsisolierung des Fahrerplatzes ungefederter, geländegängiger Fahrzeuge*. na.
- Kim, Y.-G. 2009. «An Experimental Study on the Ride Comfort of the Korean High-Speed Train». *Experimental Techniques - EXP TECH*, 1 de noviembre de 2009. DO - 10.1111/j.1747-1567.2008.00419.x. https://www.researchgate.net/publication/238183422_An_experimental_study_on_the_ride_comfort_of_the_Korean_high-speed_train.
- Kitazaki, Satoshi, y Michael J Griffin. 1997. «Resonance Behaviour of the Seated Human Body and Effects of Posture». *Journal of Biomechanics* 31 (2): 143-49. [https://doi.org/10.1016/S0021-9290\(97\)00126-7](https://doi.org/10.1016/S0021-9290(97)00126-7).
- Klooster, S. 2004. «Vibration Suppression and Safety Seat Motion Design of a Hyper-Active Seat” Thesis at». Georgia Institute of Technology.

- Kolich, M. 2004. «Predicting Automobile Seat Comfort Using a Neural Network». *International Journal of Industrial Ergonomics* 33 (4): 285-93. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2003.10.004>.
- Kottenhoff, K. 1999. «Evaluation of passenger train concepts – methods and results of measuring travellers' preferences in relation to costs. Doctoral dissertation.» TRITA-IP FR 99-48., KTH Stockholm.
- Koyanagi, Shito. 1985. «Ride Quality Evaluation of a Pendulum Car». *Quarterly Reports of RTRI*. 26: 89-92.
- Krettek, O, y J Grajnert. 1992. «Die Luftfeder, ihre Berechnung und dynamischen Eigenschaften.» Reihe Fortschritte der Fahrzeugtechnik, Band 9.
- Lam, William H. K., C. Y. Cheung, y Y. F. Poon. 1999. «A Study of Passenger Discomfort Measures at the Hong Kong Mass Transit Railway System». *Journal of Advanced Transportation* 33 (3): 389-99. <https://doi.org/10.1002/atr.5670330308>.
- Larson, R. 2006. «Measurement and evaluation of vibration exposure for locomotive crew members.»». En *Proceedings, 1st American Conference on Human Vibration*,. Morgantown, WV,.
- Larson, R., C. Raasch, y J. M. Pierce. 2006. «Measurement and Evaluation of Vibration Exposure for Locomotive Crew Members». En *Proceedings of the 2nd American Conference on Human Vibration*. Morgantown, VW, USA.
- Lauriks, G. et al, y Johan Förstberg. 2003. *UIC Comfort Tests : Investigation of Ride Comfort and Comfort Disturbance on Transition and Circular Curves*. Statens väg- och transportforskningsinstitut., VTI notat 56A-2003. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:vti:diva-1467>.
- Lewis, C. H., y M. J. Griffin. 1998. «A COMPARISON OF EVALUATIONS AND ASSESSMENTS OBTAINED USING ALTERNATIVE STANDARDS FOR PREDICTING THE HAZARDS OF WHOLE-BODY VIBRATION AND REPEATED SHOCKS». *Journal of Sound and Vibration* 215 (4): 915-26. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1591>.
- Mansfield, N. J. 2008. «Literature review on Low Frequency Vibration Comfort». EU Asia-Link ASIE/2005/111000 CIRCIS (Collaboration in Research and Development of New Curriculum in Sound and Vibration).
- Mansfield, Neil J. 2004. *Human Response to Vibration*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b12481>.
- Mansfield, Neil J., y Setsuo Maeda. 2011. «Subjective ratings of whole-body vibration for single- and multi-axis motion». *The Journal of the Acoustical Society of America* 130 (6): 3723-28. <https://doi.org/10.1121/1.3654014>.
- Marjanen, Y., N. J. Mansfield, y S. Maeda. 2006. «Requirements for Validating the Standardized Whole Body Vibration Comfort Evaluation Method». En *Proceedings of the 14th Japan Conference on Human Responses to Vibration*. TMU Hachioji, Tokyo, Japan.
- Marjanen, Yka. 2004. «Whole body vibration measurements and analysis based on European directive in finnish working environments». En , 8. Saint Petersburg, Russia.
- Marjanen, Yka. 2005. «Using ISO 2631-5 as an additional whole body vibration evaluation method with ISO 2631-1 to include also transient shocks to the analysis». En *12th International Congress on Sound and Vibration*, 8. Lisbon, Portugal.
- Marjanen, Ykä. 2010. «Validation and improvement of the ISO 2631-1 (1997) standard method for evaluating discomfort from whole-body vibration in a multi-axis environment». Loughborough University. <https://core.ac.uk/download/pdf/288391079.pdf>.
- Matthew, C. 2004. «Field Study to Evaluate Driver Fatigue on Air-Inflated Truck Seat Cushions». Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Matthews, Gerald. 2002. «Towards a transactional ergonomics for driver stress and fatigue». *Theoretical Issues in Ergonomics Science* 3 (2): 195-211. <https://doi.org/10.1080/14639220210124120>.
- Ministerio de Fomento. 2009. «Resolución de 10 de julio de 2009, de la Dirección General de Infraestructuras Ferroviarias, por la que se aprueba la “Especificación Técnica de Homologación de Material Rodante Ferroviario: Unidades Autopropulsadas”.» [https://www.boe.es/eli/es/res/2009/07/10/\(5\)](https://www.boe.es/eli/es/res/2009/07/10/(5)).
- Muñoz Guijosa, Juan Manuel, Enrique Riesco, y M. Olmedo. 2017. «Neural Network and Training Strategy Design for Train Drivers' Vibration Dose Simulation». *International Journal of Simulation Modelling* 16 (1): 72-83.

- Nagai, M., H. Yoshida, T. Tohtake, y Y. Suzuki. 2006. «Coupled vibration of passenger and lightweight car-body in consideration of human-body biomechanics». *Vehicle System Dynamics* 44 (sup1): 601-11. <https://doi.org/10.1080/00423110600879361>.
- Nakagawa, Chizuru, y Hiroaki Suzuki. 2005. «Effects of Train Vibrations on Passenger PC Use». *Quarterly Report of RTRI* 46 (3): 200-205. <https://doi.org/10.2219/rtriqr.46.200>.
- Nakashima, A. 2004. «The effect of vibration on human performance and health: A review of recent literature». Technical Report. DEFENCE R&D CANADA.
- Nawayseh, N, y M.J. Griffin. 2005. «Seat performance laboratory test GRAMMER seats tested in the x-axis and y-axis according to VIBSEAT test protocol». UK: Institute of Sound and Vibration Research, University of Southampton, UK.
- Newell, G., N. Mansfield, y L. Notini. 2006. «Inter-Cycle Variation in Whole-Body Vibration Exposures of Operators Driving Track-Type Loader Machines». *Journal of Sound and Vibration*, Special Issue on the Third International Conference on Whole-body Vibration Injuries, 298 (3): 563-79. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.06.015>.
- Ortiz, Eduardo, Marcos Fuentes, Jesús Cepeda, Mercedes de Barrios Carro, Gabriel Búrdalo Salcedo, y Javier Ferrero. 2005. «Incidencia de la Directiva 2002/44/CE sobre disposiciones mínimas por exposición a vibraciones en equipos industriales». En .
- Ozkaya, Nihat, Bernardus Willems, David Goldsheyder, y Margareta Nordin. 2016. «Whole-Body Vibration Exposure Experienced by Subway Train Operators»: *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, agosto. <https://doi.org/10.1177/026309239401300103>.
- Parsons, K, y M. J. Griffin. 1993. «Ride quality and thermal comfort for railway passengers». En . London.
- Raab, J. 1992. «Entwicklung eines aktiven pneumatischen Schwingsystems für Nutzfahrzeugsitze». VDI-Fortschrittsberichte, Reihe 11, Nr.169; VDI-Verlag.
- Rakheja, S, y P Boileau. 2003. «A combined seat suspension-vehicle driver model for estimating the exposure to whole-body vehicular vibration and shock». *Int J of Vehicle Design, Heavy Vehicle Systems* 4(2-4).
- Rakheja, S., P.-É Boileau, y Z. Wang. 2016. «Performance Analysis of Suspension Seats under High Magnitude Vibration Excitations: II. Design Parameter Study»: *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, noviembre. <https://doi.org/10.1260/0263092041456792>.
- Real Decreto 1311/2005. 2005. «Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y la seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas.» <https://www.boe.es/eli/es/rd/2005/11/04/1311>.
- Rebelle, Jérôme. 2004. «Methodology to Improve the Performance of the End-stop Buffers of Suspension Seats». *Vehicle System Dynamics* 42 (4): 211-33. <https://doi.org/10.1080/00423110412331289826>.
- Reglamento (UE) n °1299/2014 de la Comisión, de 18 de noviembre de 2014 , relativo a las especificaciones técnicas de interoperabilidad del subsistema «infraestructura» en el sistema ferroviario de la Unión Europea Texto pertinente a efectos del EEE. 2014. OJ L. Vol. 356. <http://data.europa.eu/eli/reg/2014/1299/oj/eng>.
- Richards, L. G. 1980. «ON THE PSYCHOLOGY OF PASSENGER COMFORT». *HUMAN FACTORS IN TRANSPORT RESEARCH EDITED BY DJ OBORNE, JA LEVIS* 2. <https://trid.trb.org/view/246088>.
- Riesco, Enrique, y Juan Manuel Munoz-Guijosa. 2020. «An enhanced whole-body vibration emission index for railway vehicles». *Ergonomics*, junio, 1-11. <https://doi.org/10.1080/00140139.2020.1776899>.
- Schmidt, M. 1987. «Die gemeinsame Einwirkung von Lärm und Ganzkörpervibration und deren Auswirkungen auf den Höverlust bei Agrotechnikern.» Halle: Landwirtschaftliche Fakultät der Martin-Luther-Universität.
- Schust, Marianne, Ralph Blüthner, y Helmut Seidel. 2006. «Examination of Perceptions (Intensity, Seat Comfort, Effort) and Reaction Times (Brake and Accelerator) during Low-Frequency Vibration in x- or y-Direction and Biaxial (Xy-) Vibration of Driver Seats with Activated and Deactivated Suspension». *Journal of Sound and Vibration*, Special Issue on the Third International Conference on Whole-body Vibration Injuries, 298 (3): 606-26. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2006.06.029>.

- Seidel. 1975. «Systematische Darstellung physiologischer Reaktionen auf Ganzkörperschwingungen in vertikaler Richtung (Z-Achse) zur Ermittlung von biologischen Bewertungsparametern.» *Ergonom Berichte* 15:18-39.
- Seidel, Helmut, y Renate Heide. 1986. «Long-Term Effects of Whole-Body Vibration: A Critical Survey of the Literature». *International Archives of Occupational and Environmental Health* 58 (1): 1-26. <https://doi.org/10.1007/BF00378536>.
- Smith, S. 2006. «Vibration Transmissibility Characteristics of Occupied Suspension Seats” AFB OH». Air Force Research Laboratory Human Effectiveness Directorate Biosciences and Protection Division Biomechanics Branch Wright-Patterson.
- Smith, S. D., J. A. Smith, y D. R. Bowden. 2008. «Transmission Characteristics of Suspension Seats in Multi-Axis Vibration Environments». *International Journal of Industrial Ergonomics, Seating Dynamics*, 38 (5): 434-46. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2007.10.028>.
- Sorainen, E., y E. Rytönen. 1999. «Whole-Body Vibration of Locomotive Engineers». *American Industrial Hygiene Association Journal* 60 (3): 409-11. <https://doi.org/10.1080/00028899908984461>.
- Stayner, R. 2000. «Ride Vibration. Reduction of shocks arising from overtravel of seat suspensions ”». Silsoe research Institute and R.M.S. Vibration test laboratory for the HSE.
- Stein, G. J., y I. Ballo. 1991. «Active Vibration Control System for the Driver’s Seat for Off-Road Vehicles». *Vehicle System Dynamics* 20 (2): 57-78. <https://doi.org/10.1080/00423119108968980>.
- Stein, G. J., y P Múčka. 2005. «Analysis of the rail test seat performance in operating conditions.» VIBSEAT Project Internal Technical Report]. Code IMMM SAS 5.1-F, IMMM SAS, Bratislava.
- Stein, G. J., R Záhoranský, y P Múčka. 2004. «On dryfriction modelling in simple, kinematically excited, vibration isolation systems.» En . Belgium.
- Stein, GJ, P Mucka, y P Clément. 2004. «Identification and optimization of vertical seat suspension system for a railway vehicle.» En . Hungary.
- Sullivan, M. 2009. «Occupational Claims on Short Line Railroads». 14th Annual Railroad Liability Seminar. Bates & Carey. <https://web.archive.org/web/20091229012642/http://www.batescarey.com:80/newsandarticles/Occupational%20Claims%206-07.pdf>.
- Sundström. 2007. «Difficulties to Read and Write Under Lateral Vibration Exposure». KTH Stockholm.
- Sussman, D, y M Coplen. 2000. «Fatigue and alertness in the United States railroad industry. Part I: The nature of the problem.» En . Australia.
- Suzuki, H. 1998. «Research Trends on Riding Comfort Evaluation in Japan». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 212 (1): 61-72. <https://doi.org/10.1243/0954409981530689>.
- Suzuki, Hiroaki. 1998. «Effects of the Range and Frequency of Vibrations on the Momentary Riding Comfort Evaluation of a Railway Vehicle». *Japanese Psychological Research* 40 (3): 156-65. <https://doi.org/10.1111/1468-5884.00087>.
- Suzuki, 鈴木. 1997. «A study on the vibrational factors determining the riding comfort of railway vehicle». *人間工学* 33 (6): 349-55. <https://doi.org/10.5100/jje.33.349>.
- Thomas, Marc. 2009. «Predicting the Adverse Health Effects to long term whole-body vibration exposure». *Acoustiques & techniques ISSN 1263-8072*, 2009. https://www.researchgate.net/publication/288901047_Adverse_health_effects_of_long-term_whole-body_random_vibration_exposure.
- UIC RP 16 B 153. 1988. «Application de la norme iso 2631 au transport ferroviaire. Rapport n. 16: essais concernant les activites du conducteur». Paris.
- UIC B 153 RP 5. s. f. *Application of the ISO 2631 Standard to Railway Vehicles: Application of the «Health» specifications of the 5th draft revision of ISO Standard 2631*. Vol. International Union of Railways (UIC).
- UIC B 153 RP 18:1989-09. s. f. «Application of the ISO 2631 Standard to Railway Vehicles. Final Report». UIC. <https://www.shop-ETF.com/en/final-report-7678>.

- UIC RP 1 B 153. 1981. «Application de la norme iso 2631 au transport ferroviaire. Rapport 1: etude des differentes methodes d'application de la iso 2631 dans le domaine ferroviaire».
- UIC RP 4 B 153. 1985. «Application de la norme iso 2631 au transport ferroviaire. Rapport n 4: elaboracion d'un code d'essais des sieges ferroviaries en laboratoire. application au cas d'un siege de voyageurs».
- UIC RP 6 B 153. 1985. «Aplication de la norme iso 2631 au transport ferroviaire. Rapport n 6: relation entre valeur efficace des vibrations et confort subjectif ou activites des voyageurs assis. Resultats des essais en laboratoire effectues a la sncf - centre d'essais de vitry-sur-seine».
- UIC RP 8 B 153. 1986. «Application de la norme iso 2631 au transport ferroviaire. Rapport n 8: vibrations mecaniques. mesurage et analyse des vibrations auxquelles aont soumis les passagers et le personnel embarque dans les vehicules ferroviaires». Paris.
- UIC RP 12 B 153. 1988. «Application de la norme iso 2631 au transport ferroviaire. Rapport n. 12; influence des composantes basses frequences sur l-valuation du confort». Paris.
- UIC RP 15 B 153. 1988. «Application de la norme iso 2631 au transport ferroviaire. Rapport n. 15: essais dynamiques de sieges». Paris.
- UIC RP 17 B 153. 1989. «Application de la norme iso 2631 au transport ferroviaire. Rapport n. 17. Confort en position assise». Paris.
- UNE-EN 12299. 2010. «UNE-EN 12299:2010 Aplicaciones ferroviarias. Comodidad de viaje para los pasajeros. Medición y evaluación.» <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0045231>.
- UNE-EN 14363. 2017. «UNE-EN 14363:2017 Aplicaciones ferroviarias. Ensayos y simulaciones para la aceptación de las características dinámicas de los vehículos ferroviarios. Comportamiento dinámico y ensayos estáticos.» <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0058126>.
- Valero, Bertrand, Farid Amirouche, Alan Mayton, y Christopher Jobes. 2007. «Comparison of Passive Seat Suspension with Different Configuration of Seat Pads and Active Seat Suspension». En . <https://doi.org/10.4271/2007-01-0350>.
- Via libre, 2020. s. f. «Mapa red ferroviaria». https://www.vialibre-ffe.com/PDF/Mapa_de_RedFerroviaria_2013.pdf. Accedido 20 de junio de 2020. https://www.vialibre-ffe.com/PDF/Mapa_de_RedFerroviaria_2013.pdf.
- VIBSEAT final Technical Report. 2005. «Evaluation and improvement of suspension seat vibration isolation performance». https://www.dafne.at/prod/dafne_plus_common/attachment_download/c0f0c74d572089ae8753c93735ed647e/VIBSEAT_final_report.pdf.
- Village, J., C. Trask, Y. Chow, J. B. Morrison, M. Koehoorn, y K. Teschke. 2012. «Assessing whole body vibration exposure for use in epidemiological studies of back injuries: measurements, observations and self-reports». *Ergonomics* 55 (4): 415-24. <https://doi.org/10.1080/00140139.2011.643243>.
- Wang, J., y G. Meng. 2005. «Magnetorheological Fluid Devices: Principles, Characteristics and Applications in Mechanical Engineering»: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, diciembre. <https://doi.org/10.1243/1464420011545012>.
- Wei, L., y J. Griffin. 1998. «THE PREDICITON OF SEAT TRANSMISSIBILITY FROM MEASURES OF SEAT IMPEDANCE». *Journal of Sound and Vibration* 214 (1): 121-37. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1998.1540>.
- Wigley, R. D., J. A. De Groot, y C. Walls. 2007. «Contribution of Vibration to Musculoskeletal Disorders in New Zealand». *Internal Medicine Journal* 37 (12): 822-25. <https://doi.org/10.1111/j.1445-5994.2007.01538.x>.
- Wu, X., y M. J. Griffin. 1996. «TOWARDS THE STANDARDIZATION OF A TESTING METHOD FOR THE END-STOP IMPACTS OF SUSPENSION SEATS». *Journal of Sound and Vibration* 192 (1): 307-19. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0189>.
- . 1997. «A SEMI-ACTIVE CONTROL POLICY TO REDUCE THE OCCURRENCE AND SEVERITY OF END-STOP IMPACTS IN A SUSPENSION SEAT WITH AN ELECTRORHEOLOGICAL FLUID DAMPER». *Journal of Sound and Vibration* 203 (5): 781-93. <https://doi.org/10.1006/jsvi.1996.0901>.