

Evaluación de las vibraciones de cuerpo completo sobre el confort, percepción y mareo producido por el movimiento

*Evaluation of human comfort, perception and motion sickness exposure to whole body vibration
Évaluation des vibrations globales du corps sur le confort, perception et cinétose*

Redactora:

María Gómez-Cano Alfaro
Doctora en Ciencias Químicas

CENTRO NACIONAL DE NUEVAS
TECNOLOGÍAS

Se presenta una metodología sencilla y práctica para la evaluación de los efectos de las vibraciones de cuerpo completo sobre el trabajador desde el punto de vista ergonómico.

1. INTRODUCCIÓN

La exposición a vibraciones se produce cuando se transmite al cuerpo el movimiento oscilante de una estructura, ya sea el suelo, o un asiento. La respuesta humana a las vibraciones transmitidas al cuerpo entero es muy variable, depende de las características físicas de la vibración (frecuencia, dirección, intensidad, duración), de la parte de cuerpo en contacto con la superficie vibrante, también de las características del individuo (edad, sexo, historia clínica, costumbres,...), realización de la tarea (postura, fuerza, movimientos repetitivos,...), ambiente físico (temperatura, humedad, ruido,...), etc. Son tantos los factores implicados que es difícil establecer la relación causa-efecto.

Las vibraciones pueden causar efectos muy diversos que van desde la simple molestia hasta alteraciones graves de la salud, pasando por la interferencia en la actividad humana (en la ejecución de ciertas tareas como la lectura, en la pérdida de precisión al ejecutar movimientos, pérdida de rendimiento debido a la fatiga, etc.). (tabla 1)

El Real Decreto 1311/2005 tiene como objeto la protección de la seguridad y salud de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la ex-

posición a vibraciones mecánicas, en particular lumbalgias y lesiones de la columna vertebral. En concordancia con la definición dada por la OMS de salud (es un estado de completo bienestar físico, mental y social, y no sólo la ausencia de enfermedad o dolencia), el RD establece que el empresario, al evaluar los riesgos, concederá particular atención a varios aspectos entre ellos a todos los efectos que guarden relación con la salud y la seguridad de los trabajadores especialmente sensibles, expuestos al riesgo (artículo 4, 4.c) y a todos los efectos indirectos para la seguridad y salud de los trabajadores derivados de la interacción entre las vibraciones mecánicas y el lugar de trabajo u otro equipo de trabajo" (artículo 4, 4.d).

Para la evaluación del nivel de exposición a las vibraciones el RD hace referencia a la norma ISO 2631-1 (1997) que define métodos de cuantificación de vibraciones de cuerpo entero en relación con los efectos de las vibraciones sobre la salud, pero no hace ninguna indicación desde el punto de vista ergonómico (aunque la norma ISO en uno de sus apartados incluye el confort, percepción y nauseas producidas por el movimiento).

En este documento se describe una metodología sencilla y práctica para evaluar los efectos de las vibraciones sobre el trabajador desde el punto de vista ergonómico.

2. EVALUACIÓN ERGONÓMICA DE LAS VIBRACIONES: CONFORT, PERCEPCIÓN Y MAREO PRODUCIDO POR EL MOVIMIENTO

No existe unanimidad en la adopción de una sola metodología para la evaluación de la exposición a las vibraciones desde el punto de vista ergonómico. Se utilizan diferentes métodos objetivos y subjetivos, relacionados entre sí. Entre los métodos objetivos destacan: fisiológicos (EMGs, etc.); físicos (medición de la aceleración de las vibraciones, impedancia, transmisibilidad, etc); biomecánicos (análisis postural, etc.).

Complementariamente, se utilizan métodos subjetivos como por ejemplo; observación, cuestionarios, escalas de valoración, encuestas, etc., que pueden ser utilizados para valorar la falta de confort.

Efectos para la salud	Otros efectos
<ul style="list-style-type: none"> • Sistema músculo-esquelético particularmente trastornos a nivel de la columna vertebral- • Alteraciones de las funciones fisiológicas • Alteraciones neuromusculares • Alteraciones cardiovasculares, respiratorias, endocrinas y metabólicas • Alteraciones ginecológicas y riesgo de aborto • Alteraciones sensoriales y del sistema nervioso central 	<ul style="list-style-type: none"> • Malestar (<i>discomfort</i>) • Interferencia con la actividad • Percepción- • Mareo inducido por el movimiento

Tabla 1. Efectos de las vibraciones

Como resultado de muchas investigaciones se han desarrollado diferentes normas técnicas, entre las que destaca la internacional ISO 2631-1 (1997) y la británica BS 6841. Pero ninguna de las normas existentes proporciona un criterio óptimo para la predicción del malestar por la exposición a vibraciones.

Para la evaluación de la exposición del cuerpo completo a las vibraciones se recomienda seguir los siguientes pasos:

1. Recogida de datos relacionados con:
 - a) Características de la tarea (tipo, duración, atención requerida, posturas, etc.).
 - b) Condiciones ambientales (ruido, condiciones termohigrométricas, etc).
 - c) Características del individuo (edad, sexo, hábitos, etc.).
2. Aplicar los criterios para la evaluación de las vibraciones globales descritos en la norma ISO 2631 parte 1: requerimientos generales y parte 2: vibraciones en edificios (1 Hz a 80 Hz). La norma describe diferentes métodos de medición de las vibraciones, métodos de evaluación de los efectos sobre la salud, confort, percepción y mareo debido al movimiento. En concreto, el anexo C de la norma (Guía de los efectos de las vibraciones sobre la percepción y el confort) proporciona un método conveniente y uniforme de indicar la importancia subjetiva de la vibración aunque no presenta valores límites de exposición.

3. MEDICIÓN DE VIBRACIONES

Las vibraciones se miden con vibrómetros cuyo componente principal es un transductor o acelerómetro en contacto con la superficie vibrante que convierte las vibraciones mecánicas en una señal eléctrica. Esta señal se trata adecuadamente en los circuitos del equipo de medida obteniendo los niveles de la aceleración expresados en m/s^2 o rad/s^2 .

El cuerpo humano no es simétrico en su respuesta a las vibraciones. Por este motivo se medirán según un sistema de coordenadas (sistema basicéntrico) originado en un punto por el que las vibraciones entran en el cuerpo (ver figura 1). Por ejemplo, en individuos sentados la mayor sensibilidad a las vibraciones se da: en la dirección del eje z en el intervalo de frecuencia de 3-12 Hz, en la dirección del eje x en 0.5-2 Hz, y en la dirección del eje y en 0.5-1 Hz.

Al igual que ocurre en la exposición al ruido donde el oído presenta respuestas diferentes según las características del sonido, el cuerpo humano reacciona de diferente manera según sea la vibración a la que se expone. Para valorar los riesgos derivados de la exposición a la vibración en las personas, la medida de la aceleración debe reflejar la forma en que el trabajador percibe la vibración. Para ello, se utilizan diferentes filtros de ponderación de frecuencia de la vibración cuya función es atenuar los niveles de aceleración en diferentes frecuencias.

En la norma ISO 2631 se definen los factores de ponderación frecuencial para la medida de las vibraciones de cuerpo completo recogidos en la tabla 2. Estas ponderaciones se aplican según cada caso en particular (según se evalúe salud, confort, percepción o mal del movimiento) junto con los factores de multiplicación correspondientes.

Los factores de multiplicación tendrán distintos valores según la persona esté sentada, recostada o de pie. Se

realizarán mediciones en todas las direcciones relevantes tanto traslacionales como rotacionales.

Dado que la postura corporal y la dirección de la vibración tiene especial relevancia, la norma ISO 2631-1:1997 tiene muy en cuenta estos factores. Se valoran las vibraciones que se transmiten al conjunto del cuerpo por todo tipo de superficie de apoyo, que puede ser bien a través de los pies de un individuo que está de pie; a través de los glúteos, espalda y pies de una persona que está sentada o a través del área de apoyo de un individuo recostado.

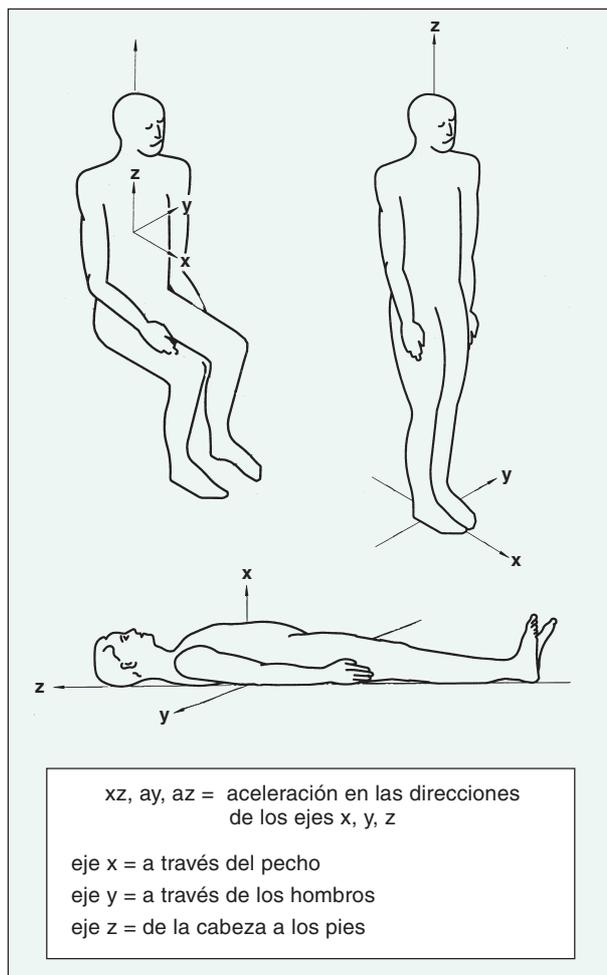


Figura 1. Ejes basicéntricos

Las vibraciones deben medirse colocando el transductor entre el cuerpo y la superficie vibrátil:

- Para personas sentadas se utilizan 3 áreas: soporte de la superficie del asiento (medido bajo las tuberosidades isquiáticas), respaldo del asiento (medido en la zona de apoyo principal del cuerpo) y pies (medido donde se apoyan con más frecuencia).
- Para personas reclinadas la medida debe ser realizada bajo la pelvis, espalda y cabeza.

La norma ISO 2631 también define cómo deben colocarse los transductores para realizar las medidas. Los transductores se colocarán alineados con los ejes basicéntricos con una desviación máxima de 15° . Debe tenerse en cuenta la orientación de los ejes basicéntricos respecto al campo gravitacional. Los transductores localizados en un punto de medida deben posicionarse ortogonalmente. Los acelerómetros traslacionales orientados en diferentes ejes deben posicionarse lo más juntos posible.

Siempre se anotará la localización de las medidas y se tendrá en cuenta el material del que está compuesta la superficie vibrátil.

La selección del número de medidas y de la duración de la medición debe ser estadísticamente significativa. Normalmente el periodo de medición es de 5 a 20 min para que sea representativo.

Para la evaluación de las vibraciones se utilizará el método básico usando la aceleración en valor eficaz o valor de la aceleración ponderada en frecuencia *rms*.

$$a_w(rms) = [1/T \int_0^T a_w^2(t) dt]^{1/2}$$

donde:

$a_w(t)$ es el valor de la aceleración ponderada en frecuencia

T es la duración de la medida, en segundos

Para la evaluación de las vibraciones se tendrá en cuenta la figura 2 donde se describe una zona de riesgo para la salud definida por las ecuaciones (1) y (2) asumiendo que las respuestas a dos diferentes exposiciones a vibraciones diarias son equivalentes energéticamente cuando se cumple:

$$a_{w1} T_1^{1/2} = a_{w2} T_2^{1/2} \quad (1)$$

ó

$$a_{w1} T_1^{1/4} = a_{w2} T_2^{1/4} \quad (2)$$

donde:

a_w son los valores de aceleraciones *rms* ponderadas. Los subíndices indican el número de exposiciones

T es la duración de la exposición

Se valorarán las exposiciones diarias de 8 horas $A(8)$ expresada como la aceleración continua equivalente para un periodo de 8 horas

$$A(8) = a_w (T/8)^{1/2}$$

siendo:

a_w es la aceleración ponderada en frecuencia según los tres ejes x , y , z

T es el periodo de duración de la exposición

Según la figura 2 para un periodo de 8 horas se estima que si la aceleración a_w está:

- a) por debajo de 0.5 m/s²; los efectos sobre la salud no han sido claramente documentados y/o observados objetivamente.
- b) en la zona entre 0,5 m/s² y 0,8 m/s²; la precaución con respecto a los riesgos de salud potenciales está indicada.

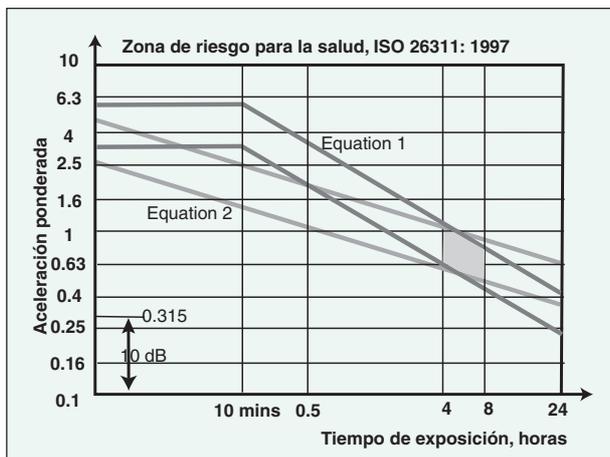


Figura 2. Zona de precaución definida en el anexo B de la Norma ISO 2631-1: 1997

c) valores superiores a 0,8 m/s²; los riesgos para la salud son probables.

Nota: Se recuerda que, desde el punto de vista legal, el RD en su art. 3 define el valor límite de exposición diaria normalizado para un periodo de referencia de 8 horas en 1,15 m/s² y el valor de exposición diaria normalizado para un periodo de referencia de 8 horas que da lugar a una acción se fija en 0,5 m/s².

4. CRITERIO DE EVALUACIÓN DE LAS VIBRACIONES SOBRE EL CONFORT

ISO 2631:1-1997 estudia el efecto de las vibraciones sobre el confort y la percepción de las personas sanas que están expuestas a vibraciones periódicas, aleatorias o pasajeras viajando, en el trabajo o realizando actividades de ocio. El rango de frecuencias analizado es de 0,5 Hz a 80 Hz.

La definición de confort es compleja puesto que contiene variables físicas, psicológicas y fisiológicas. El problema surge a la hora de elaborar un modelo predictivo de la respuesta subjetiva del individuo a las vibraciones que tengan en consideración todos estos factores.

Se conoce que el grado de malestar está relacionado con la frecuencia de la vibración y que es proporcional a la intensidad de la misma. A bajas frecuencias 1-2 Hz el mismo movimiento se transmite a lo largo del cuerpo, a frecuencias un poco más altas aparecen resonancias en varias partes de cuerpo y aumenta el malestar y si las frecuencias son mayores, el cuerpo atenúa las vibraciones y disminuye el malestar. Por ejemplo, las vibraciones monótonas de bajas frecuencias parecen producir cansancio mientras que las vibraciones transitorias activan al individuo y pueden producir estrés, etc.

En cuanto a la intensidad de las vibraciones, aquellas que exceden el límite de la percepción activan los sentidos (por ejemplo, los receptores de la visión y del equilibrio), y el cerebro recibe información adicional que necesita interpretar y manejar.

A pesar de que no existen suficientes datos científicos para relacionar de manera cuantitativa la exposición a las vibraciones y los efectos sobre la salud, se ha observado que el incremento del tiempo de exposición (dentro del trabajo diario o diariamente a lo largo de muchos años) y el aumento de la intensidad de las vibraciones significa un incremento de la dosis de la vibración y a su vez del riesgo, mientras que los periodos de descanso parecen reducir el riesgo.

Para la evaluación de las vibraciones sobre el confort se recomienda el uso del valor total de la aceleración ponderada de la vibración de un periodo de tiempo representativo.

$$a_w = (k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2)^{1/2}$$

siendo:

k_x , k_y y k_z los factores de multiplicación que dependen de la frecuencia ponderada seleccionada, su valor suele ser la unidad y

a_w son las aceleraciones *rms* ponderadas con respecto a los ejes ortogonales x , y , z (translacionales o de rotación) respectivamente sobre la superficie que soporta a la persona.

Las frecuencias ponderadas usadas para la predicción de los efectos de la vibración sobre el confort son W_c , W_d , W_e , W_j y W_k (ver tabla 2).

Para la valoración desde el punto de vista ergonómico se tendrán en cuenta los valores de la aceleración ponderada de la vibración de un periodo de tiempo representativo establecidos en ISO 2631 descritos en la tabla 3.

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 _e (rx) W _e (ry) W _e (rz)	0,63 m/rad 0,4 m/rad 0,2 m/rad		
	Rotación (respaldo)	W _c (x) W _d (y) W _d (z)	0,8 0,5 0,4		
		(pies)	W _k (x) W _k (y) W _k (z)		0,25 0,25 0,4
De pie (suelo)		W _d (x) W _d (y) W _k (z)	1 1 1		
Tumbado (bajo pelvis)		W _d (horizontal) W _k (vertical)	1 1		
Tumbado (bajo cabeza) cuando no hay almohada blanda		W _j (vertical)	1		
PERCEPCIÓN (0,5 a 80 Hz)³					
Sentado (asiento)		W _d (x) W _d (y) W _k (z)	1 1 1		$a_w = a_{wx,y,z} \text{ máximo}$
De pie (suelo)		W _d (x) W _d (y) W _k (z)	1 1 1		
Tumbado (superficie de apoyo excepto cabeza)		W _d (x) W _d (y) W _k (z)	1 1 1		
Tumbado (bajo cabeza) cuando no hay almohada blanda		W _j (vertical)	1		
MAREO PRODUCIDO POR EL MOVIMIENTO (0,1 a 0,5 Hz)					
Sentado o de pie		W _f (z)			
<p>1 Si el valor ponderado determinado en cualquier eje es menor del 25% del valor máximo determinado en el mismo punto pero en otros ejes puede ser excluido.</p> <p>2 La vibración horizontal en los respaldos de los vehículos puede afectar mucho al confort. Si por razones técnicas no es posible su medición se tomarán las medidas en la superficie del asiento en los ejes x e y, y el factor de multiplicación en lugar de 1 será 1,4.</p> <p>3 La evaluación de la percepción de las vibraciones será hecha con relación a a_w más alta determinada en cualquiera de los ejes, de los puntos de contacto y tiempo.</p>					

Tabla 2. Recomendaciones de la norma ISO 2631-1:1997 para la evaluación de la exposición de las vibraciones sobre el confort, percepción y mareo producido por el movimiento

En algunos ambientes donde existen choques ocasionales y cuyo factor de cresta (cociente entre el mayor valor de la aceleración durante la medida (valor pico máximo) y el valor eficaz) es superior a 9 no es posible aplicar este método y se utilizará el método *rms* móvil ó el valor de la dosis de vibración a la cuarta potencia.

La norma no define valores límite en relación con el confort debido a la complejidad de factores involucrados que varían en cada situación. Sin embargo, propone unas indicaciones de reacciones de confort en ambientes con vibraciones (tabla 3).

5. CRITERIO DE EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS VIBRACIONES SOBRE LA PERCEPCIÓN

Para la evaluación de los efectos de las vibraciones sobre la percepción se determinará el valor eficaz de la aceleración ponderada *rms* en el rango de 0,5 Hz a 80 Hz para cada eje, sobre la principal superficie que soporta el cuerpo en cualquier punto de contacto y se seleccionará el mayor valor de los obtenidos para los tres ejes. La frecuencia ponderada y los factores de multipli-

Evaluación de los efectos debidos a la exposición a vibraciones	Valores de a_w (según ISO 2631-1:1997)
Confort (0,5 a 80 Hz)	$a_w < 0,315 \text{ m/s}^2$ no molesto $0,315 < a_w < 0,63 \text{ m/s}^2$ ligeramente molesto $0,5 < a_w < 1 \text{ m/s}^2$ bastante molesto $0,8 < a_w < 1,6 \text{ m/s}^2$ molesto $1,25 < a_w < 2,5 \text{ m/s}^2$ muy molesto $a_w > 2,5 \text{ m/s}^2$ extremadamente molesto
Percepción (0,5 a 80 Hz)	$0,015 \text{ m/s}^2$ $(0,01 - 0,02) \text{ m/s}^2$
Mareo producido por el movimiento (0,1 a 0,5 Hz)	0,5 m/s

Tabla 3. Criterios para la evaluación de la exposición de las vibraciones sobre el confort, percepción y mareo producido por el movimiento (ISO 2631-1:1997)

cación utilizados para estudiar la percepción de la vibración son W_d , W_k , W_j , (se recogen en la tabla 2).

De datos experimentales se conoce que el valor umbral medio de percepción en el eje vertical es de $0,015 \text{ m/s}^2$, el rango de respuesta puede extenderse de $0,01$ a $0,02 \text{ m/s}^2$.

Para valores por encima del valor umbral de percepción, a medida que aumenta el tiempo de exposición a la vibración, la sensación producida por la misma irá en aumento. En cuanto al nivel de molestia de los ocupantes por las vibraciones de los edificios, es probable que se quejen si las magnitudes de vibración están sólo ligeramente por encima del nivel de percepción. (ISO 2631-2).

6. CRITERIO DE EVALUACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS VIBRACIONES SOBRE EL MAREO PRODUCIDO POR EL MOVIMIENTO

Los movimientos ondulatorios de las vibraciones en el rango de frecuencias por debajo de $0,5 \text{ Hz}$ pueden producir mareos o nauseas, además de malestar e interferencia en la actividad. Sobre todo se ha tenido en cuenta el efecto en posturas de pie y sentado. En personas tumbadas se ha observado menor incidencia de este efecto

de mareo posiblemente debido a que se produce menor movimiento de cabeza o a que el movimiento vertical ocurre en el eje x del cuerpo.

La probabilidad de que aparezcan síntomas de mareo por el movimiento se incrementa con el tiempo de exposición (hasta varias horas). Para periodos más largos (días) se produce la adaptación al movimiento. Para evaluar el mal producido por el movimiento se puede optar por la medición o cálculo de:

- el Valor eficaz de la aceleración ponderada rms en el rango de $0,1 \text{ Hz}$ a $0,5 \text{ Hz}$ para el eje z, sobre la principal superficie que soporta al cuerpo. Se recomienda la utilización de la frecuencia ponderada W_f o
- el Valor Dosis de Mal de Movimiento (MSDVz: *motion sickness dose value*). MSDVz se expresa en $\text{m/s}^{1,5}$. Para su cálculo existen dos métodos alternativos:

- Para la determinación del mal del movimiento producido durante el periodo total de exposición.

$$\text{MSDV}_z = \left\{ \int_0^T [a_w(t)] dt \right\}^{1/2}$$

Siendo

$a_w(t)$ aceleración ponderada en la dirección del eje z
 T tiempo (sg) total de duración del movimiento

- Si el movimiento es continuo y de magnitud constante, se puede realizar un muestreo durante un tiempo corto (ya que éste se considera representativo de todo el tiempo de exposición), que será, como mínimo, de 240 s :

$$\text{MSDV}_z = a_w T^{1/2}$$

Existen grandes diferencias en la susceptibilidad de los individuos a los efectos de oscilación de baja frecuencia. Se ha encontrado que las mujeres son más propensas a las nauseas producidas por movimiento que los hombres y que la prevalencia de los síntomas disminuye con el aumento de la edad. Para predecir el porcentaje de personas que pueden sufrir vómitos se utiliza la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de personas con vómitos} = k_m \cdot \text{MSDV}_z$$

k_m es una constante que varía según la población expuesta (edad, sexo, experiencia, etc) Ej: $k_m = 1/3$ para una población de hombres y mujeres adultos que no han sido expuestos previamente a la vibración.

Cuando a_w supera $0,5 \text{ m/s}^2$, es probable que más del 70% de personas puedan sufrir vómitos.

Es recomendable recoger la información adicional sobre condiciones de movimiento. Esto incluiría la composición de frecuencia, duración y direcciones del movimiento. Hay evidencia de que los movimientos que tienen frecuencias y aceleraciones eficaces similares pero formas de ondas diferentes pueden tener efectos diferentes.

BIBLIOGRAFÍA

- Griffin, M. J. *Handbook of Human Vibration*. London: Academic Press; ISBN 0-12-303040-4. 1990.
- ISO 2631-1:1997 Vibraciones y choques mecánicos. Guía para la estimación de la exposición de los individuos a vibraciones globales del cuerpo. Parte 1: Requerimientos generales.
- ISO 2631-2:2002 Mechanical vibration and shock. Evaluation of human exposure to whole body vibration. Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz).
- ISO 2631-4:2001 Guidelines for the evaluation of the effects of vibration and rotational motion on passenger and crew comfort in fixed-guide way transport system.

- (5) **ISO 8041:2005** Human response to vibration Measuring instrumentation.
- (6) Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre, sobre la protección de la salud y seguridad de los trabajadores frente a los riesgos derivados o que puedan derivarse de la exposición a vibraciones mecánicas.
- (7) **UNE-EN 14253 (2004)** Vibraciones mecánicas. Medidas y cálculos de la exposición laboral a las vibraciones de cuerpo completo con referencia a la salud. Guía práctica.