

## Introducción

Las máquinas y las herramientas son elementos indispensables en la ejecución de las tareas que se realizan en casi todos los sectores de actividad. Un buen número de estos mecanismos son accionados o conducidos por el propio trabajador a lo largo de su jornada laboral durante periodos de tiempo que pueden variar considerablemente en función de la actividad y de las características de las tareas. Las vibraciones originadas por la manipulación de tales máquinas se transmiten al trabajador por diferentes partes del cuerpo, generalmente aquellas que se encuentran en contacto con el elemento vibrante. Esta diversidad de puntos de contacto se engloba en dos sistemas denominados de mano brazo y de cuerpo entero, según la zona corporal afectada por tales vibraciones.

De esta forma, diversas partes del cuerpo quedan sometidas a vibraciones de mayor o menor intensidad y frecuencia, lo que puede originar daños para la salud, a veces graves e irreversibles, en función del tiempo de exposición, la intensidad y la frecuencia. El RD 1311/2005, de 4 de noviembre establece las disposiciones mínimas para la protección de los trabajadores frente a los riesgos que para su seguridad y salud se deriven o puedan derivarse de su exposición a vibraciones mecánicas.

## Que son las vibraciones

Las vibraciones son movimientos oscilatorios forzados en torno a un punto de referencia. Estos movimientos se caracterizan por el desplazamiento  $x(t)$  desde un punto de referencia origen del movimiento, la velocidad  $v(t)$  y la aceleración  $a(t)$ . Como puede observarse estos parámetros son función del tiempo  $t$ .

De los tres parámetros considerados, desplazamiento, velocidad y aceleración, utilizaremos para la medida de las vibraciones la aceleración  $a(t)$  expresada en  $m/s^2$ .

Esta aceleración además se caracteriza por su intensidad y su frecuencia. Es decir, la aceleración puede tomar cualquier valor, su intensidad, y repetirse un determinado número de veces por segundo, su frecuencia.

Dado pues que la aceleración puede tomar muchos y diversos valores diferentes durante un determinado periodo de tiempo, generalmente de medición, para estimar el valor de una aceleración constante que produzca el mismo efecto que la aceleración actuante y variable en el tiempo, se calcula el valor eficaz de la aceleración, expresado mediante la raíz cuadrada de su valor cuadrático medio:

$$a = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt}$$

En adelante la aceleración se referirá al valor eficaz de la misma y en ningún caso a su valor instantáneo.



## La frecuencia

La frecuencia es el número de veces que ocurre un suceso periódico en la unidad de tiempo. Aplicado a las vibraciones representa el número de veces que por unidad de tiempo se repite un ciclo de vibración y asociada a la misma, la aceleración. Su unidad de medida es el Herzio, Hz, o ciclo por segundo.

**En el sistema de mano-brazo** se contempla un rango de frecuencia comprendido entre 1 y 1500Hz y en el sistema de cuerpo entero desde 0,5 hasta 80 Hz.,

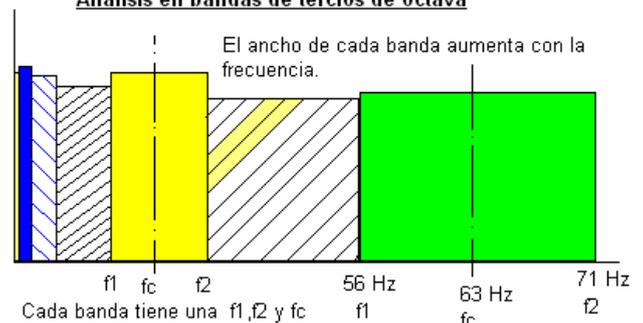
Cualquier maquinaria capaz de originar vibraciones bien sea de tipo manual o de transporte, genera multitud de aceleraciones a diferentes frecuencias y en distintas direcciones. Así, por ejemplo, cuando realizamos mediciones de vibraciones en el sistema mano-brazo, obtenemos del aparato de medida, los valores eficaces de las aceleraciones que se producen en el intervalo de frecuencia ya indicado de 1 a 1500 Hz, referidos a unas direcciones preestablecidas y fijadas de antemano.

No obstante asociar 1500 valores de aceleración a otros tantos valores de frecuencia es una tarea excesiva desde el punto de vista técnico y además la contemplación de todas y cada una de las frecuencias posibles no aporta ninguna precisión adicional válida al análisis que nos ocupa. Por ello la banda de frecuencia comprendida entre 1 y 1500 Hz para el sistema mano-brazo y entre 0,5 y 80 Hz en el de cuerpo entero, se divide en un número reducido de zonas o bandas de tal manera que en cada una de estas bandas, la frecuencia superior guarda una relación con la frecuencia inferior expresada por

$$f_2 = \sqrt[3]{2} * f_1 \text{ y relacionadas con la } f_c$$

mediante  $f_c = \sqrt{f_1 * f_2}$

### Análisis en bandas de tercios de octava



La tabla siguiente muestra una pequeña parte de las bandas de frecuencia de tercios de octava con indicación de su número y las frecuencias inferior, central y superior.

Nº	Frecuencia inferior	Frecuencia central	Frecuencia superior
6	3.56	4.0	4.49
7	4.45	5.0	5.61
8	5.61	6.3	7.07
9	7.13	8.0	8.98

El valor de la frecuencia central identifica a cada una de las bandas.

Esta distribución, reparto o división en bandas de frecuencia se denomina división en bandas de tercios de octava. La Norma UNE-EN ISO 5349-1 relativa a la medición y evaluación de vibraciones transmitidas por el sistema de mano-brazo, contiene información detallada de las bandas de tercios de octava y su factor de ponderación.

**En el sistema de cuerpo entero** las curvas de ponderación de frecuencia son diferentes según los ejes ortogonales X, Y, Z al que se refieran las aceleraciones y según la localización de los mismos en las diferentes partes del cuerpo. Así para el individuo sentado se han de considerar las siguientes curvas de ponderación:

$W_d$  para los ejes X e Y

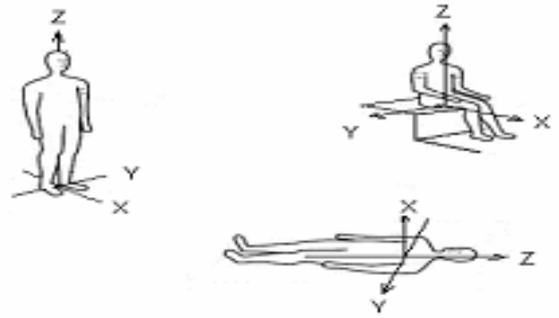
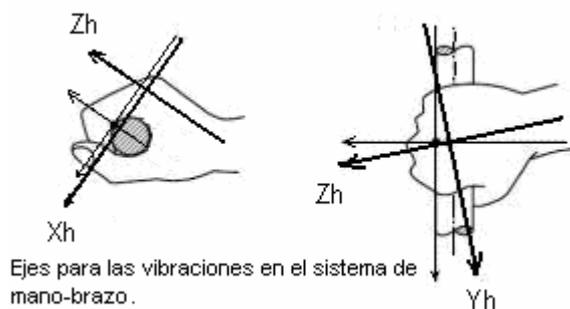
$W_k$  para el eje Z

Para la espalda del individuo sentado se considera el eje X con la ponderación  $W_c$

### Ejes de referencia en las mediciones de vibraciones

Como ya se indicó en el párrafo anterior, cualquier maquinaria capaz de originar vibraciones, genera multitud de aceleraciones en muchas y distintas direcciones. Dado que es inviable la medición de todas y cada una de las aceleraciones producidas en todas las direcciones posibles, las aceleraciones se medirán en su proyección sobre tres ejes ortogonales, X, Y, Z.

Dichos ejes se sitúan en las partes o puntos del cuerpo por donde se transmiten las vibraciones y son solidarios a los mismos. Esta última característica indica que los referidos ejes pueden moverse respecto al entorno e incluso a la propia máquina, pero su posición relativa a las partes del cuerpo donde se fijan permanece inalterada cualquiera sea el movimiento que estas realicen.



La figura muestra los ejes de referencia, X,Y,Z, situados en diferentes partes del cuerpo, para la medición de vibraciones en el sistema de cuerpo entero, según la norma ISO 2631-1 relativa a la evaluación de la exposición a las vibraciones mecánicas en el sistema de cuerpo entero.

El aparato de medida da los valores eficaces de las aceleraciones en cada uno de los ejes, X, Y,Z así como el valor del vector suma

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}$$

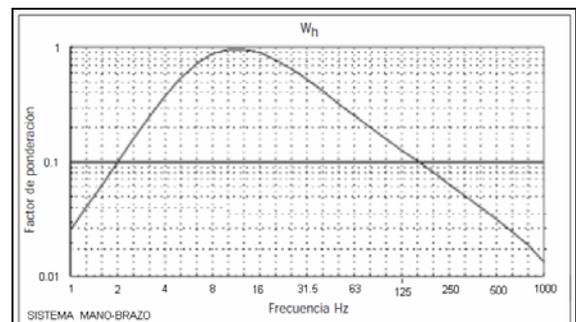
$$a = \sqrt{k_x^2 a_x^2 + k_y^2 a_y^2 + k_z^2 a_z^2}$$

Como se verá posteriormente, el valor de **a** referido al sistema de mano-brazo se identifica con  $a_{hv}$ , y con  $a_v$  para el sistema de cuerpo entero.

En el apartado relativo a la evaluación de la exposición se da cumplida descripción de la metodología de evaluación según se dispone en el RD 1311/2005, de 4 de noviembre.

### Ponderación en frecuencia

Los efectos causados por las vibraciones en cada banda de tercios de octava poseen mayor o menor importancia en función de la banda de frecuencia de la que se trate.



Para el sistema de mano-brazo, las aceleraciones originadas en la banda de 1000 Hz se han de multiplicar (lo que equivale a ponderar) por un factor igual a 0.0135 denominado factor de ponderación  $W_h$ . Para el mismo sistema las aceleraciones originadas en la banda de 16 Hz se han de multiplicar por el factor  $W_h = 0.896$ . Consecuentemente las aceleraciones de la banda de 1000 Hz quedarán notablemente disminuidas respecto de las de 16 Hz, las cuales apenas resultarán modificadas.

La curva mostrada en el gráfico superior y contenida en la Norma UNE-EN ISO 5349-1 relativa a la medición y evaluación de vibraciones transmitidas por el sistema de mano-brazo, muestra la relación existente entre la frecuencia y el correspondiente factor de ponderación.

De lo anterior se deduce que las aceleraciones originadas por las vibraciones en cada banda de frecuencia resultarán modificadas por el factor de ponderación  $W_h$  en la forma:

$$W_{hi} * a_i \text{ para toda la banda de frecuencia}$$

y con estos valores obtenemos la aceleración

$$a_w = \sqrt{\sum (W_i * a_i)^2} \text{ para cada uno de los ejes de referencia}$$

## Símbolos y terminología

El parámetro utilizado en la medición de vibraciones es la aceleración  $a$  determinada como valor eficaz y expresada en  $m/s^2$ . Como ya se ha referido con anterioridad cada aceleración  $a_i$  se ha de multiplicar por un factor de ponderación  $W_h, W_K, W_d, W_c, \dots$  etc.

La aceleración resultante de considerar todas las aceleraciones que intervienen debidamente ponderadas, expresada como valor eficaz, se determina mediante la expresión:

$$a_{hw} = \sqrt{\sum (W_{hi} * a_i)^2}$$

Referido al sistema de cuerpo entero, la expresión se simplifica con la omisión del subíndice h.

$$a_w = \sqrt{\sum (W_i * a_i)^2}$$

Hemos indicado anteriormente que las aceleraciones han de referirse a unos ejes ortogonales solidarios al punto o la parte del cuerpo por la cual penetra la vibración. Dichos ejes se simbolizan con las letras X, Y, Z por lo cual, las aceleraciones expresadas en el párrafo anterior, han de indicarse respecto a sus tres direcciones.

Los símbolos  $a_{hwx}, a_{hwy}, a_{hwz}$  o bien  $a_{wx}, a_{wy}, a_{wz}$  según se trate del sistema mano brazo o de cuerpo entero, representan los valores  $a_{hw}$  o  $a_w$  expresados en  $m/s^2$  para cada uno de los tres ejes referidos.

A partir de estos valores se obtiene el valor de la aceleración total mediante las expresiones

$$a_{hw} = \sqrt{a_{hwx}^2 + a_{hwy}^2 + a_{hwz}^2} \text{ para el sistema de mano-brazo}$$

y

$$a_w = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2} \text{ para el sistema de cuerpo entero}$$

Cada una de dichas expresiones representan la aceleración total y su valor es igual al módulo del vector resultante de esas tres componentes X, Y, Z.

En el apartado "Evaluación de la exposición" se describe el procedimiento adecuado para la obtención estos parámetros referidos y de otros necesarios para tal fin.

Llegados a este punto es conveniente realizar las siguientes consideraciones a efectos de clarificar conceptos fundamentales.

1º.- Los aparatos de medida de vibraciones dan, entre otros valores que veremos más adelante, los siguientes:

$$a_{hwx}, a_{hwy}, a_{hwz} \text{ y } a_{hv}$$

$$a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} \text{ y } a_v$$

2º.- Estableciendo un paralelismo entre ruido y vibraciones con el objeto de facilitar una comprensión adecuada, los valores  $a_{hv}, a_v$  e incluso los  $a_{wx}, a_{wy}, a_{wz}$ , considerados aisladamente, representarían un nivel de exposición continuo equivalente, bien sea para el intervalo de medida o para el intervalo de exposición, lo que en el caso de ruido lo expresábamos como  $L_{Aeq,T}$

3º.- Dicho nivel continuo equivalente nos ha de servir para calcular el término A(8) que representa la exposición diaria a las vibraciones (valor total de la energía equivalente de las vibraciones para 8 h) en metros por segundo cuadrado. Es fácil ver una relación de semejanza entre este término y el nivel diario equivalente utilizado en la evaluación de la exposición al ruido, y expresado como  $L_{Aeq,d}$

## El término A(8)

El término A(8) se obtiene mediante la aplicación de la siguiente expresión

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum a_{hvi}^2 * T_i}$$

Donde  $T_0$  representa el tiempo de referencia de 8 horas y  $T_i$  indica el tiempo de exposición a cada aceleración  $a_{hvi}$

Cuando se trata de una sola tarea la expresión anterior puede simplificarse en la forma:

$$A(8) = a_{hv} \sqrt{\frac{T_i}{T_0}}$$

Ambas se utilizan para la determinación de la exposición diaria a vibraciones referidas al sistema mano brazo.

Cuando se trata del sistema de cuerpo entero la expresión es la misma sustituyendo el término  $a_{hvi}$  o  $a_{hv}$  por el mayor de los valores

$$1,4 * a_{wx}, 1,4 * a_{wy}, a_{wz}$$

y

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum a_{wxi,y,z}^2 * T_i}$$

Como se verá más adelante este valor A(8) es el que se ha de comparar con los valores límites de exposición establecidos en el RD 1311/2005, de 4 de noviembre.

## Valores límites de exposición

El artículo 3 del RD 1311/2005, ya referido anteriormente, establece como valores límites para la exposición a vibraciones:

1.- Para la vibración transmitida al sistema mano-brazo, el valor límite de exposición diaria normalizado para un periodo de referencia de ocho horas se fija en  $5 m/s^2$ . Así mismo el valor de exposición diaria normalizado para un periodo de referencia de ocho horas que da lugar a una acción se fija en  $2,5 m/s^2$ .

2.- Para la vibración transmitida al cuerpo entero, el valor límite de exposición diaria normalizado para un periodo de referencia de ocho horas se fija en  $1.15 \text{ m/s}^2$ . Igualmente el valor de la exposición diaria normalizado para un periodo de referencia de ocho horas que da lugar a una acción se fija en  $0.5 \text{ m/s}^2$ .

Tanto los valores límites de exposición diaria como los valores que dan lugar a una acción han de referirse al valor A(8) antes descrito. Continuando con el paralelismo entre ruido y vibraciones, el valor A(8) representaría lo que en el ruido denominamos el nivel diario equivalente, que es el valor de referencia con el que se han de comparar los valores límites.

El equipo de medida nos da el valor A(8) pero en la mayoría de los aparatos de medición de vibraciones conocidos hasta el día de la fecha, dicho valor resulta ser erróneo para nuestros propósitos. Y ello es así porque el tiempo  $T_i$  integrante de la expresión A(8) aplicable en cualquiera de los sistemas, se refiere al tiempo de exposición del trabajador a las vibraciones y no al tiempo empleado en la medición. Si el aparato de medida no tiene la posibilidad de conocer el tiempo real de exposición del trabajador a las vibraciones, él tomará para los cálculos como tiempo de exposición el tiempo que duró la medición y el resultado resultará ser erróneo. Solamente en el caso muy infrecuente de que el tiempo de medición se corresponda con el tiempo de exposición, el valor del A(8) calculado resultará ser coincidente con el valor que nos indique el aparato de medida.

Se debe pues tomar del equipo de medida los valores de aceleración

$$a_{hw_x}, a_{hw_y}, a_{hw_z} \text{ y } a_{hv}$$

$$a_{wx}, a_{wy}, a_{wz} \text{ y } a_v$$

relativos al sistema en el que hayamos realizados las mediciones y posteriormente bien con calculadora o con hojas de cálculo determinar el valor A(8)

### Equipos y procedimientos de medida

El equipo con el que medimos las vibraciones consta básicamente de un acelerómetro, un receptor y un cable de unión entre ambos.

El acelerómetro es el elemento capaz de detectar la vibración y transformar la energía mecánica en una corriente eléctrica. Los acelerómetros utilizados pueden medir las vibraciones en tres ejes ortogonales simultáneamente y actualmente no presentan los problemas inherentes a los mismos relativos a los fenómenos de resonancia, intervalo de respuesta lineal en frecuencia y otros fenómenos como aceleraciones transversales y alteración de la señal eléctrica generada.

Son de uso general los del tipo IPC equipados con amplificadores de señal, de peso liviano y con rangos de frecuencia suficientemente grandes para evitar problemas de resonancia ya referidos.

El receptor recibe las señales del acelerómetro, analiza las frecuencias, determina los valores eficaces de las aceleraciones y pondera adecuadamente las mismas en función de su frecuencia.

Los datos más importantes suministrados por el medidor en el sistema mano-brazo y de cuerpo entero son:

- $a_{hw_x}, a_{hw_y}, a_{hw_z}$  y  $a_{hv}$  (Mano-brazo)
- $a_{wx}, a_{wy}, a_{wz}$  y  $a_v$  (Cuerpo entero)
- Valores máximos, Valores de pico y Factor de forma
- Valor A(8)

Los procedimientos de medida definen el conjunto de acciones adecuadas para realizar una medición correcta. Evidentemente los procedimientos son diferentes si se trata del sistema de mano-brazo o el de cuerpo entero.

Es necesario realizar aquí otra aclaración importante:

Para una correcta evaluación de la exposición a vibraciones, el técnico actuante debe conocer en profundidad los contenidos de:

- El RD 1311/2005, de 4 de noviembre, ya referido anteriormente.
- Las normas que la indicada legislación establece como guías de actuación, a saber:

UNE-EN ISO 5349-1 (2002)  
UNE-EN ISO 5349-2 (2002)  
ISO 2631-1 (1997)

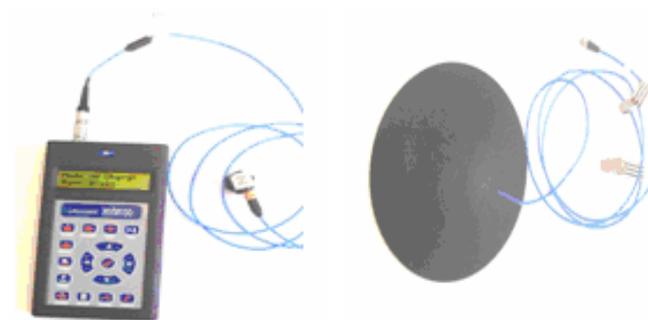
Además debería así mismo conocer:

- La guía para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las vibraciones mecánicas, del INSHT.
- La guía no vinculante sobre buenas prácticas para la aplicación de la Directiva 2002/44/CE (vibraciones en el trabajo).

La descripción pormenorizada de los procedimientos de medida es excesivamente extensa comparada con el espacio disponible para la redacción de esta ficha técnica por lo que se remite al lector a la normativa legal y la bibliografía referida en el párrafo anterior.

### Evaluación de la exposición

Según se desprende del artículo 4 del RD 1311/2005, de 4 de noviembre, no es preceptivo la realización de mediciones de vibraciones para realizar la evaluación correspondiente, siempre que de la información del equipo de trabajo facilitada por el fabricante o del propio método de trabajo, se pueda deducir con seguridad que durante la jornada laboral no se superaran los valores límites establecidos en el artículo 3 del referido real decreto.



Equipo de medición de vibraciones. Sistema mano-brazo.

Acelerómetro para medición en el sistema de cuerpo entero

Independientemente de la fuente de donde se obtengan los valores de exposición a vibraciones, se ha de proceder al tratamiento de los datos a efectos de evaluar la intensidad de la exposición.

La evaluación de la exposición en ambos sistemas, de mano-brazo y de cuerpo entero ha de realizarse separadamente, entre otras razones porque el referido RD1311/2005, así lo dispone en sus anexos A y B.

A) Evaluación de la exposición en el sistema de mano-brazo.

- Toma de datos  $a_{hw_x}, a_{hw_y}, a_{hw_z}$  y  $a_{hv}$
- Comprobar

$$a_{hv} = \sqrt{a_{hw_x}^2 + a_{hw_y}^2 + a_{hw_z}^2}$$

- Si hay más de una tarea se debe repetir el proceso anterior tantas veces como tareas diferentes se realicen.

- Calcular el valor A(8) mediante la expresión

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum a_{hvi}^2 * T_i}$$

- Comparar A(8) con los valores límites

B) Evaluación de la exposición en el sistema de cuerpo entero

B.1: Caso de una sola fuente de exposición

- Toma de datos  $a_{wx}, a_{wy}, a_{wz}$

- Determinar el mayor valor de:

$$1,4 * a_{wx}, 1,4 * a_{wy}, a_{wz}$$

- Calcular el valor A(8) mediante la expresión

$$A(8) = \text{mayor valor} \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

Lo anterior es equivalente a calcular el mayor valor de:

$$A(8)_x = 1,4 * a_{wx} \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

$$A(8)_y = 1,4 * a_{wy} \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

$$A(8)_z = a_{wz} \sqrt{\frac{T}{T_0}}$$

En el caso de que el trabajador realice varias tareas diferentes a lo largo de la jornada laboral, resultando que en cada una de ellas la exposición a vibraciones es diferente tanto en intensidad como en tiempo de exposición, el procedimiento de cálculo del valor A(8) es el siguiente:

- Realizar los cálculos descritos en el apartado anterior para cada una de las tareas y ejes de referencia:

$$A(8)_{xi} = 1,4 * a_{wxi} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \text{ para cada } i = 1,2,3,\dots$$

$$A(8)_{yi} = 1,4 * a_{wyi} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \text{ para cada } i = 1,2,3,\dots$$

$$A(8)_{zi} = a_{wzi} \sqrt{\frac{T}{T_0}} \text{ para cada } i = 1,2,3,\dots$$

-Obtener el valor A(8) para cada eje según:

$$A(8)_x = \sqrt{A_{x1}^2(8) + A_{x2}^2(8) + A_{x3}^2(8) + \dots}$$

$$A(8)_y = \sqrt{A_{y1}^2(8) + A_{y2}^2(8) + A_{y3}^2(8) + \dots}$$

$$A(8)_z = \sqrt{A_{z1}^2(8) + A_{z2}^2(8) + A_{z3}^2(8) + \dots}$$

-Tomar el mayor valor de  $A(8)_x, A(8)_y, A(8)_z$  y comparar con el valor límite establecido para la vibración de cuerpo entero.

## Duración de las mediciones

Como concepto fundamental, el tiempo de una medición debe prolongarse todo lo necesario y suficiente para que los datos obtenidos de la misma sean verdaderamente representativos de las condiciones trabajo existentes en ese puesto o tarea. No existe pues ningún tiempo preestablecido que nos indique la duración de una medición.

En el sistema de cuerpo entero es fácil encontrar actividades de larga duración, ya que por lo general se trata de tareas de conducción de vehículos o de manejo de maquinaria auto transportable.

Sin embargo en el sistema de mano-brazo existen diversas tareas repetitivas en las que el tiempo de exposición a vibraciones puede ser inferior a 1 minuto. Mediciones de vibraciones realizadas en esos periodos de tiempo no son aceptables.

La norma EN ISO 5349-2:2002, referenciada en el anexo A del RD 1311/2005, de 4 de noviembre, contiene una serie de problemas resueltos relativos a la medición de vibraciones en el sistema de mano-brazo. El conocimiento de tales planteamientos y resoluciones resulta de extraordinaria utilidad para la determinación de los tiempos de medición en múltiples tareas donde la exposición a vibraciones en el sistema de mano-brazo se realiza en breves o muy breves periodos de tiempo.

## Medidas preventivas y Vigilancia de la Salud

El artículo 5 del RD 1311/2005, ya citado, contiene un conjunto de disposiciones encaminadas a evitar o reducir la exposición a vibraciones.

La primera de ellas es un principio básico en prevención de riesgos laborales y consiste en la eliminación del riesgo en su origen o la reducción al nivel más bajo posible.

Le siguen otras actuaciones como son:

- Otros métodos de trabajo que reduzcan la exposición.
- Elección de equipos de trabajo adecuados
- Programas adecuados de mantenimiento de los equipos de trabajo.
- El diseño y concepción de los lugares y puestos de trabajo
- La información y la formación adecuadas a los trabajadores
- La limitación de la duración e intensidad de la exposición
- Una ordenación adecuada del tiempo de trabajo.
- Aplicación de medidas adecuadas para la protección frente al frío y la humedad.

Cuando la evaluación de riesgos ponga de manifiesto la existencia de un riesgo para la salud de los trabajadores, el empresario deberá llevar a cabo una vigilancia de la salud de dichos trabajadores, según se describe en el artículo 8 de RD 1311/2005.

La vigilancia de la salud tendrá por objetivo la prevención y el diagnóstico precoz de cualquier daño para la salud como consecuencia de la exposición a vibraciones mecánicas.

## Referencia legislativa, Normas y Guías

- Real Decreto 1311/2005, de 4 de noviembre
- Normas: UNE-EN ISO 5349-1 (2002)  
UNE-EN ISO 5349-2 (2002)  
ISO 2631-1 (1997)
- Guías: Guía para la evaluación y prevención de los riesgos relacionados con las vibraciones mecánicas, del INSHT.
- La guía no vinculante sobre buenas prácticas para la aplicación de la Directiva 2002/44/CE (vibraciones en el trabajo).