

REPUBLICA ARGENTINA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO



FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, INGENIERIA Y AGRIMENSURA

CARRERA DE POSGRADO  
**ESPECIALIZACIÓN EN HIGIENE  
Y SEGURIDAD EN EL TRABAJO**

**CONTAMINANTES FÍSICOS**

**2005**



## Criterios sobre vibraciones

*Federico Miyara*

### 1. Introducción

Muchos equipos y máquinas utilizados en ambientes laborales presentan, durante su operación, un comportamiento vibratorio. A veces las vibraciones son causadas por alguna anomalía, como por ejemplo la presencia de partes sueltas o masas rotativas desbalanceadas. En este caso la fuerza centrífuga somete al eje a esfuerzos oscilantes que se transmiten a la base de la máquina, produciendo vibraciones. En otros casos las vibraciones son un subproducto inevitable del funcionamiento normal, como sucede en un martillo neumático, el asiento de un conductor o un taladro de mano.

Cuando las superficies vibrantes entran en contacto con el cuerpo humano o alguna de sus partes (cabeza, espalda, nalgas, extremidades, manos) se produce una agresión mecánica cuyos efectos pueden ser la incomodidad, la reducción de la eficiencia o inclusive lesiones o estados patológicos. Estos efectos se deben en general a la aparición de fuerzas oscilantes que son contrarrestadas físicamente por tres mecanismos:

- 1) La tensión muscular
- 2) La compresión de los tejidos
- 3) La aceleración de las masas de tejido, produciendo un estrés articulario

A igualdad de esfuerzo estático la tensión muscular de origen vibratorio causa mayor fatiga y resta precisión a los movimientos. La compresión de tejidos puede producir trastornos circulatorios locales e inclusive la ruptura de vasos sanguíneos capilares que pueden afectar el suministro de oxígeno a diversos órganos. Ello se observa, por ejemplo, en vibraciones del cuello y de las manos. En el caso del cuello puede comprometerse la afluencia de sangre al laberinto, provocando sensaciones de vértigo y acúfenos. En el caso de las manos da origen al síndrome de Raynaud o dedos fríos. Por último, la aceleración de partes del cuerpo produce movimientos relativos que en general recaen en las articulaciones o en las vértebras.

Existen varias normas nacionales e internacionales que ofrecen criterios para la exposición del ser humano a las vibraciones. En relación con las vibraciones de cuerpo entero, transmitidas a través de los pies, las nalgas o la espalda según la postura, se tienen la Norma Internacional ISO 2631:1985 y su versión nacional, la norma IRAM 4078, cada una de ellas publicada en tres partes. La parte 1 trata las especificaciones generales y los criterios para vibraciones de 1 Hz a 80 Hz del cuerpo entero. La parte 2 se refiere a la aplicación específica al caso de las vibraciones en edificios en igual rango de frecuencia, y la parte 3 trata las vibraciones de muy baja frecuencia, 0,1 Hz a 0,63 Hz, que tiene lugar en vehículos tales como buques o aviones. La norma ISO 5349 y su versión nacional, la IRAM 4097, consideran el caso de las vibraciones transmitidas a través de las manos.

En términos generales los criterios cubren tres tipos de situaciones: la comodidad, la eficiencia laboral y la seguridad y la salud. Estos criterios se basan en tres clases de límites: el límite del *comfort reducido*, a partir del cual se compromete el bienestar físico o psíquico del individuo, el límite de la *capacidad reducida por la fatiga*, más allá del



Contaminantes físicos – Vibraciones

cual se ve afectada la eficiencia en las tareas, y el límite de *exposición*, luego del cual comienza a haber riesgo para la salud. Desde el punto de vista reglamentario, el Decreto N° 351/79 incorpora en su Anexo V (reformado por la Resolución N° 295/2003 del Ministerio de Trabajo, Empleo y Seguridad Social (MTESS)) criterios derivados de estas normas.

Las vibraciones se cuantifican a través de la *aceleración*, expresada en  $m/s^2$  (y a veces en términos de  $g = 9,80665 m/s^2$ , la aceleración normal de la gravedad terrestre). Si bien podrían medirse la elongación (o magnitud del desplazamiento respecto a un punto de equilibrio) o la velocidad, la medida de la aceleración es más directa (pues puede recurrirse a un *acelerómetro*, transductor que entrega una tensión eléctrica proporcional a la aceleración) y además se relaciona directamente con la fuerza de inercia.

Para las mediciones se utiliza un *vibrómetro*, consistente en un *acelerómetro*, un preamplificador, filtro o filtros apropiados, un detector de *valor eficaz* y una serie de dispositivos electrónicos destinados a convertir el valor eficaz en una lectura en un *display* o visualizador.

La magnitud típicamente medida es la *aceleración eficaz* (o promedio energético), dada por

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

Cuando el tiempo de integración es largo se suele denominar *aceleración equivalente*.

Una consideración importante es la relación entre el valor máximo y el valor eficaz. El cociente entre ambos se denomina *factor de pico*, *FP*:

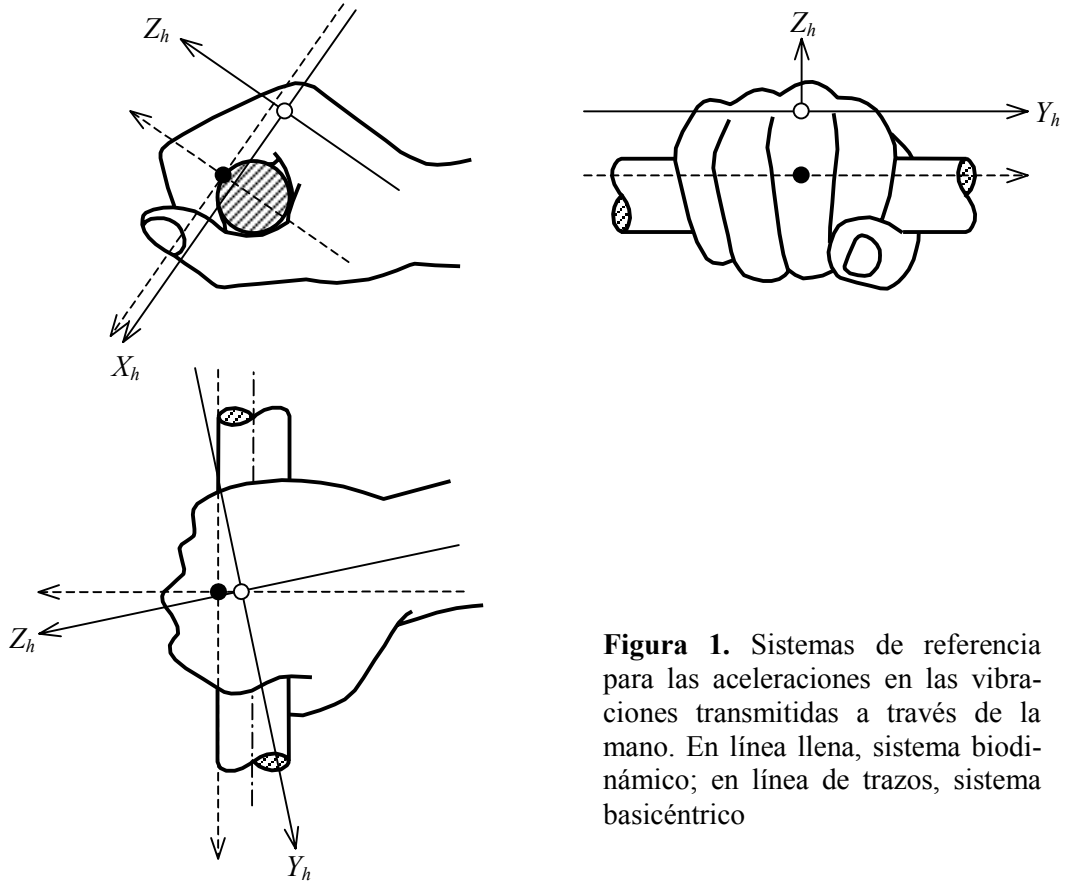
$$FP = \frac{A_{pico}}{A_{ef}} \quad (2)$$

Los criterios propuestos en las normas en general provienen de investigaciones de campo en las que  $FP < 3$ . A pesar de ello, los criterios pueden extrapolarse tentativamente hasta valores de  $FP < 6$

## 2. Vibraciones transmitidas a través de las manos

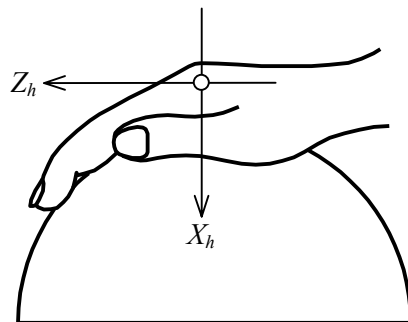
Las vibraciones transmitidas a través de las manos se evalúan mediante la aceleración medida según tres ejes de referencia. Existen dos sistemas de referencia: el sistema *biodinámico* y el del *centro básico* (o *basicéntrico*). El biodinámico tiene el origen de coordenadas ubicado en la cabeza del tercer metacarpo. El eje *Z* tiene la dirección del eje longitudinal de dicho hueso, el eje *X* es perpendicular al plano de la palma de la mano y el eje *Y* es perpendicular a ambos. El sistema basicéntrico se utiliza para la posición de sujeción y se define para la sujeción de un cilindro normalizado de 2 cm de diámetro. Los ejes *Y* y *Z* se rotan de modo que el eje *Y* quede paralelo al eje del cilindro, luego se traslada el plano *Y-Z* en la dirección *X* de manera que contenga el eje del cilindro, y finalmente se desplaza el origen en la dirección *Z* hasta quedar ubicado en la generatriz del cilindro (figuras 1 y 2). Los criterios no hacen distinción entre los dos sistemas, por lo que se optará por uno u otro según la conveniencia.

Contaminantes físicos – Vibraciones



**Figura 1.** Sistemas de referencia para las aceleraciones en las vibraciones transmitidas a través de la mano. En línea llena, sistema biodinámico; en línea de trazos, sistema basicéntrico

Para las mediciones se utiliza un vibrómetro cuyo transductor debe tener una respuesta en frecuencia entre 5 Hz y 1500 Hz. En todos los casos el transductor se colocará en el punto de máxima transmisión, directamente en contacto con la mano y con el eje de máxima respuesta paralelo a una de las direcciones. La medición se realizará en cada una de las tres direcciones, excepto si se sabe que hay una dirección fuertemente predominante frente a las restantes. Cuando entre la mano y el elemento vibrante se interpongan elementos elásticos (guantes de goma, almohadillas, acolchados), el transductor se colocará preferentemente del lado de la mano.



**Figura 2.** Sistema de referencia para las aceleraciones en las vibraciones transmitidas a través de la mano apoyada. Se utiliza una semiesfera normalizada cuyo radio es 10 cm.



Contaminantes físicos – Vibraciones

Para la aplicación de criterios relativos a las vibraciones transmitidas por la mano se utiliza una ponderación frecuencial que es constante e igual a 0 dB entre 6,3 Hz y 16 Hz y luego se reduce a razón de -6 dB por octava hasta llegar a 1250 Hz (tabla 1 y figuras 3 y 4). Esta ponderación tiene en cuenta el hecho de que la mano tiene su máxima sensibilidad a las vibraciones entre 6,3 Hz y 16 Hz, perdiendo paulatinamente sensibilidad hacia las altas frecuencias.

**Tabla 1.** Constantes de ponderación para las aceleraciones transmitidas a través de la mano en cualquier eje y de cuerpo entero a través de los ejes Z y X-Y

$f$ [Hz]	Mano, ejes X, Y y Z		Cuerpo, eje Z		Cuerpo, ejes X e Y	
	$K_h$	$K_{h,dB}$	$K_{bz}$	$K_{bz,dB}$	$K_{bx-y}$	$K_{bx-y,dB}$
1,0	-	-	0,50	-6	1,00	0
1,25	-	-	0,56	-5	1,00	0
1,6	-	-	0,63	-4	1,00	0
2,0	-	-	0,71	-3	1,00	0
2,5	-	-	0,80	-2	-0,80	-2
3,15	-	-	0,90	-1	-0,63	-4
4,0	-	-	1,00	0	-0,50	-6
5,0	-	-	1,00	0	-0,40	-8
6,3	1,00	0	1,00	0	-0,315	-10
8,0	1,00	0	1,00	0	-0,250	-12
10,0	1,00	0	0,80	-2	-0,200	-14
12,5	1,00	0	0,63	-4	-0,160	-16
16,0	1,00	0	0,50	-6	-0,125	-18
20,0	0,80	-2	0,40	-8	-0,100	-20
25	0,63	-4	0,315	-10	-0,080	-22
31,5	0,50	-6	0,250	-12	-0,063	-24
40,0	0,40	-8	0,200	-14	-0,050	-26
50,0	0,315	-10	0,160	-16	-0,040	-28
63,0	0,250	-12	0,125	-18	-0,0315	-30
80,0	0,200	-14	0,100	-20	-0,0250	-32
100	0,160	-16	-	-	-	-
125	0,125	-18	-	-	-	-
160	0,100	-20	-	-	-	-
200	0,080	-22	-	-	-	-
250	0,063	-24	-	-	-	-
315	0,050	-26	-	-	-	-
400	0,040	-28	-	-	-	-
500	0,0315	-30	-	-	-	-
630	0,0250	-32	-	-	-	-
800	0,0200	-34	-	-	-	-
1000	0,0160	-36	-	-	-	-
1250	0,0125	-38	-	-	-	-

Contaminantes físicos – Vibraciones

Suponiendo que se ha medido la aceleración  $a_h$  en un eje en las 24 bandas de tercio de octava entre 6,3 Hz y 1250 Hz, la aceleración ponderada vale

$$a_{h,w} = \sqrt{\sum_{j=1}^{24} (K_{h,j} a_{h,j})^2} \quad (3)$$

En el caso en que se tengan durante la jornada laboral  $n$  intervalos  $T_i$  en cada uno de los cuales la mano esté sometida en un eje dado a una aceleración ponderada  $a_{h,w,i}$ , puede obtenerse la aceleración ponderada equivalente o valor eficaz extendido a la totalidad del tiempo  $T$  de exposición diario,  $A_{h,w,eq,T}$  mediante la fórmula

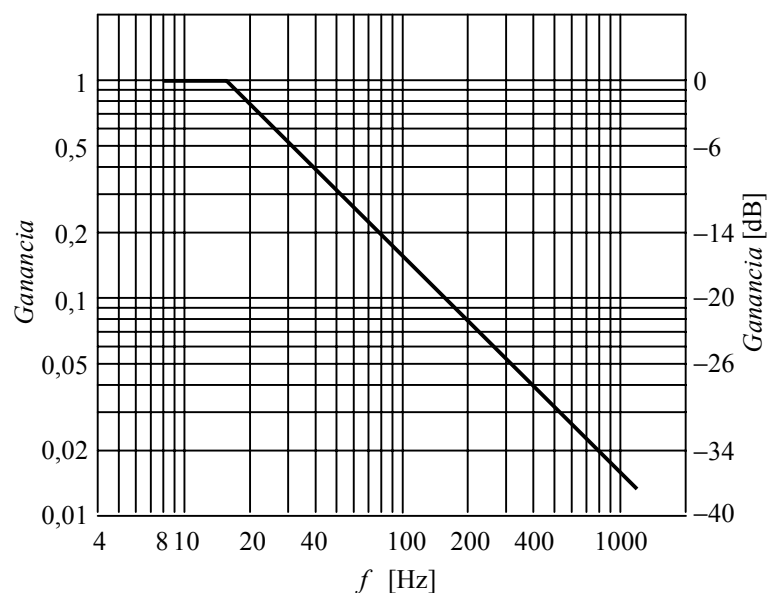
$$A_{h,w,eq,T} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n a_{h,w,i}^2 T_i} \quad (4)$$

donde

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \quad (5)$$

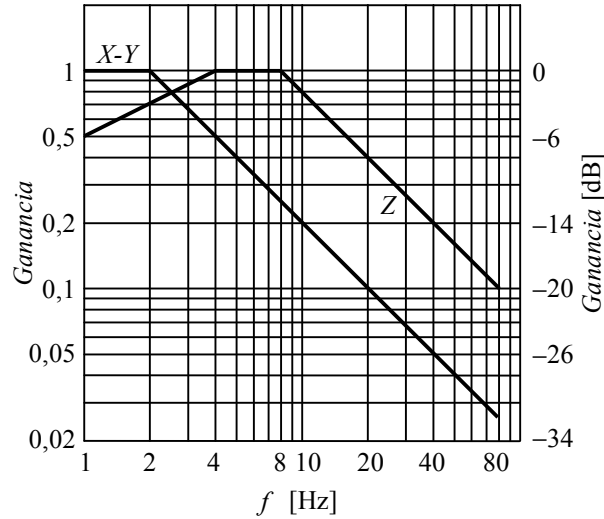
Más genéricamente, si la aceleración ponderada varía en forma continua con el tiempo,

$$A_{h,w,eq,T} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{h,w}^2(t) dt} \quad (6)$$



**Figura 3.** Curva de ponderación de frecuencias para las vibraciones transmitidas a través de la mano.

Contaminantes físicos – Vibraciones



**Figura 4.** Curva de ponderación de frecuencias para las vibraciones de cuerpo entero según los ejes transversales (X-Y) y el eje longitudinal (Z).

El criterio para la exposición diaria según la Resolución 295/2003 MTESS está dado por la tabla 2, que plantea aproximadamente el principio de la igualdad de efectos ante igual energía. En este caso equivale a decir que se admite una exposición a una aceleración ponderada de hasta  $4 \text{ m/s}^2$  durante 8 h. El valor eficaz obtenido anteriormente puede referirse a 8 h haciendo

**Tabla 2.** Criterio para la aceleración ponderada eficaz

Duración $T$ de la exposición diaria	Aceleración ponderada eficaz máxima en el eje dominante $[\text{m/s}^2]$
$T < 1 \text{ h}$	12
$1 \text{ h} < T < 2 \text{ h}$	8
$2 \text{ h} < T < 4 \text{ h}$	6
$4 \text{ h} < T < 8 \text{ h}$	4

$$A_{h,w,eq,8} = a_{h,w,eq,T} \sqrt{\frac{T}{8 \text{ h}}} \tag{7}$$

Si, por ejemplo, el valor para  $T = 5 \text{ h}$  dio  $4,5 \text{ m/s}^2$ , entonces para 8 h se tendrá

$$A_{h,w,eq,8} = \sqrt{\frac{5}{8}} 4,5 \text{ m/s}^2 = 3,56 \text{ m/s}^2,$$



Contaminantes físicos – Vibraciones

que resulta un valor aceptable. Haciendo el análisis directo mediante la tabla se obtendría que no es aceptable, ya que  $4,5 > 4$ . Ello ocurre debido a que en la tabla 2 se han redondeado algunos valores para simplificar la aplicación del criterio.

La exposición a una determinada aceleración equivalente  $A_{h,w,eq,4}$  produce un riesgo de problemas circulatorios que derivan en el denominado *fenómeno de Raynaud* o fenómeno de *emblanquecimiento de dedos* o *dedos fríos* o *síntoma de frío inducido*. Consiste en una insuficiencia irrigatoria que posee una valoración clínica vascular y otra sensoneural. Existen cuatro etapas, detalladas en la tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de Stockholm para síntomas de frío inducido periférico vascular y sensoneural.

Valoración vascular		
Etapa	Grado	Descripción
0	-	Sin agresión
1	medio	Agresiones ocasionales que afectan solamente los extremos de uno o más dedos
2	moderado	Agresiones ocasionales que afectan a las falanges distal y media (raramente también la proximal)
3	severo	Agresiones frecuentes que afectan a todas las falanges de casi todos los dedos
4	muy severo	Como en la etapa 3 con atrofia de la piel en las extremidades de los dedos
Valoración sensoneural		
Etapa		Síntomas
0 SN		Exposición a la vibración sin síntomas
1 SN		Entumecimiento intermitente con o sin molestias
2 SN		Entumecimiento intermitente o persistente con reducción de la percepción sensorial
3 SN		Entumecimiento intermitente o persistente reduciendo el tacto y/o la destreza en la manipulación

El riesgo puede evaluarse mediante la siguiente fórmula, que proporciona los percentiles  $C$  de la población afectada al nivel de la etapa 1 en una cantidad dada de años de exposición (IRAM 4097:1988):

$$C = 100 \left( \frac{A_{h,w,eq,4} T_e}{95} \right)^2 \tag{8}$$

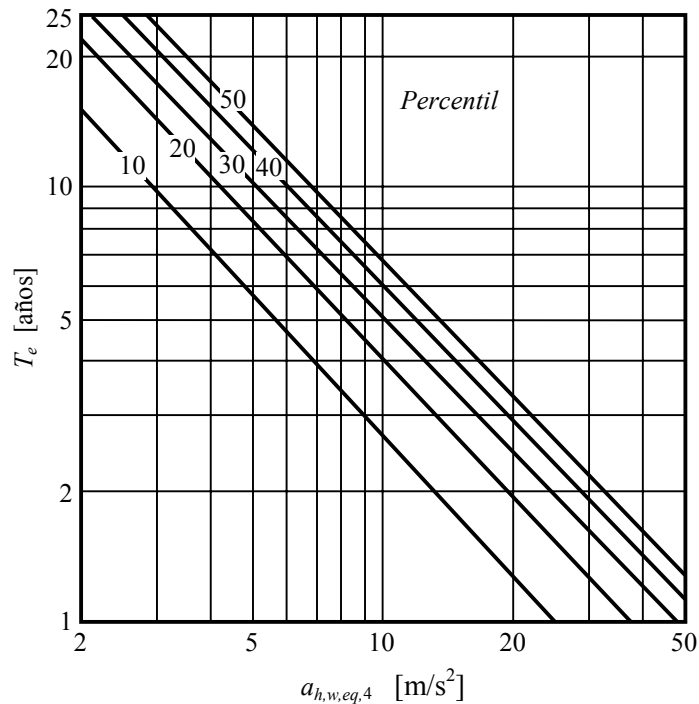
donde

$$A_{h,w,eq,4} = a_{h,w,eq,T} \sqrt{\frac{T}{4 \text{ h}}} \tag{9}$$

$T$  es el tiempo de exposición diario real, y  $T_e$  es el tiempo en años antes de alcanzarse la etapa 1 en el porcentaje  $C$  más susceptible de la población. La ecuación (8) se aplica para percentiles de hasta 50 % y para no más de 25 años de exposición ni más de  $50 \text{ m/s}^2$ . En la figura 5 se muestran gráficamente los resultados de la ecuación (8) para percentiles entre 10 y 50.



Contaminantes físicos – Vibraciones



**Figura 5.** Percentiles de la población que alcanzan la etapa 1 del fenómeno de Raynaud por exposición a determinada dosis diaria de aceleración ponderada durante determinada cantidad de años.

En el ejemplo anterior,

$$A_{h,w,eq,4} = \sqrt{\frac{5}{4}} 4,5 \text{ m/s}^2 = 5,03 \text{ m/s}^2,$$

por lo cual después de 10 años un porcentaje

$$C = 100 \left( \frac{5,03 \times 10}{95} \right)^2 = 28 \%$$

de la población así expuesta alcanzará la etapa 1.

**Nota:** Los criterios anteriores se aplican al eje de *máxima aceleración*.

**Ejemplo:** Se mide la aceleración en el manubrio de una máquina de mano y se observa que la misma está formada por una fundamental de 10 Hz y 5 armónicos con las siguientes aceleraciones:

$f$ [Hz]	10	20	30	40	50	60
$a_{hx,j}$ [m/s <sup>2</sup> ]	3,1	2,2	0,8	1,5	0,9	0,2
$a_{hy,j}$ [m/s <sup>2</sup> ]	1,9	0,5	0,3	1,8	0,1	0,1
$a_{hz,j}$ [m/s <sup>2</sup> ]	2,1	1,9	0,1	4,9	0,7	0,3



## Contaminantes físicos – Vibraciones

La exposición diaria es de 6 horas y hay 16 operarios usando este tipo de máquina. Determinar si el puesto de trabajo satisface el límite reglamentario y cuántos de los operarios tienen perspectivas de alcanzar la etapa 1 del fenómeno de Raynaud al cabo de 5 años.

**Solución:** Notemos primero que cada componente armónica está en una diferente banda de tercio de octava. En la tabla siguiente se indica la frecuencia central de la banda que contiene a cada armónico y la ponderación frecuencial correspondiente.

$f$ [Hz]	10	20	30	40	50	60	$a_{h,w}$ [ $m/s^2$ ]
$f_{oi}$ [Hz]	10	20	31,5	40	50	63	-
$K_{h,i}$	1,0	0,8	0,5	0,4	0,315	0,250	-
$K_{h,i} a_{hx,j}$ [ $m/s^2$ ]	3,1	1,76	0,4	0,6	0,284	0,05	3,65
$K_{h,i} a_{hy,j}$ [ $m/s^2$ ]	1,9	0,4	0,15	0,72	0,0315	0,025	2,08
$K_{h,i} a_{hz,j}$ [ $m/s^2$ ]	2,1	1,52	0,05	1,96	0,221	0,075	3,26

En la última columna se encuentra calculado el valor ponderado de la aceleración en los tres ejes, mediante la ecuación (3). El mayor resulta el correspondiente al eje  $X$ , y vale  $3,65 m/s^2$ . Dado que la exposición diaria es de entre 4 y 8 horas y no excede los  $4 m/s^2$  admisibles según la tabla 2, el puesto de trabajo satisface el criterio reglamentario. Para determinar la cantidad de empleados susceptibles de experimentar el fenómeno de Raynaud (dedos fríos), calculemos primero el porcentaje. Para ello debemos referir la exposición a 4 h, aplicando la ecuación (9):

$$A_{h,w,eq,4} = 3,65\sqrt{6/4} = 4,47 m/s^2$$

Aplicando ahora la ecuación (8),

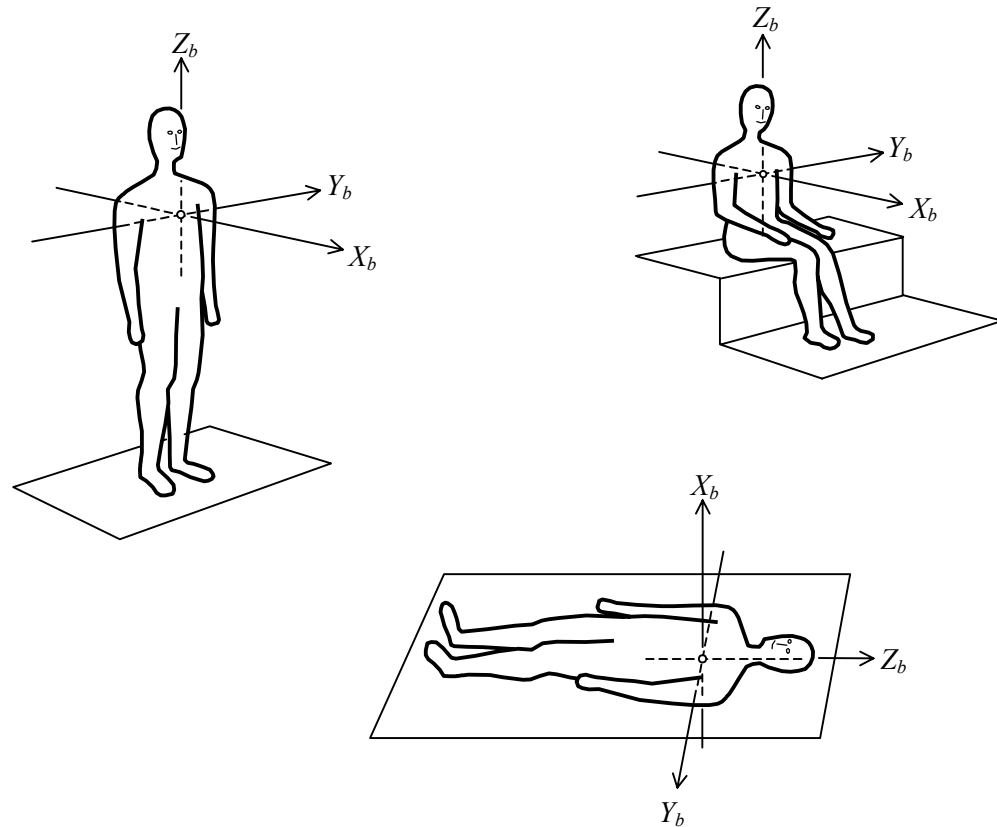
$$C = 100 \left( \frac{4,47 \times 5}{95} \right)^2 = 5,53 \%$$

Ello implica que  $0,0553 \times 16 = 0,88 \cong 1$  operario podrá alcanzar las primeras manifestaciones de la enfermedad vascular.

## 2. Vibraciones del cuerpo entero

Las vibraciones del cuerpo entero se evalúan mediante la aceleración medida según tres ejes de referencia: póstero-anterior (eje  $X$ ), derecha-izquierda (eje  $Y$ ) y pies-cabeza (eje  $Z$ ). Los ejes  $X$  e  $Y$  son los ejes *transversales*, y el  $Z$ , el eje *longitudinal*. El origen de este sistema de referencia, denominado *biodinámico*, se ubica en el corazón (figura 6). También es posible un sistema *basicéntrico*, con el origen ubicado en la superficie de apoyo, pero al ser los ejes de ambos sistemas paralelos su uso no afecta a las componentes de la aceleración.

Contaminantes físicos – Vibraciones



**Figura 6.** Sistema de referencia para la medición de vibraciones del cuerpo entero en tres posturas. El eje  $X$  (pósterio-anterior) y el  $Y$  (derecha-izquierda) son los ejes transversales, y el eje  $Z$  (pies-cabeza) es el eje longitudinal. El origen del sistema es el corazón.

Igual que en el caso de la mano, el transductor debe colocarse en la superficie de contacto entre el elemento vibrante y el cuerpo, prefiriéndose el lado del cuerpo en aquellos casos en que existan separadores resilientes (tales como almohadillas, asientos ergonómicos). En algunos casos puede ser conveniente adosar el transductor a una chapa metálica liviana en contacto con el cuerpo.

La respuesta en frecuencia del transductor deberá cubrir el rango entre 1 Hz y 80 Hz, aunque si con un mismo instrumento se deben realizar mediciones de vibración para las manos y el cuerpo, debería ser de rango extendido cubriendo entre 1 Hz y 1500 Hz.

En el caso del cuerpo se utilizan ponderaciones frecuenciales diferentes para el eje longitudinal (pies-cabeza) y para los ejes transversales (pósterio-anterior y derecha-izquierda), debido a la diferencia de sensibilidad entre ambos. En efecto, en dirección longitudinal la frecuencia de resonancia se encuentra en el rango entre 4 Hz y 8 Hz, en tanto que en las direcciones transversales la resonancia está entre 1 Hz y 2 Hz. En la tabla 1 se dan los factores de ponderación para cada frecuencia, representados gráficamente en la figura 4.



Contaminantes físicos – Vibraciones

Luego de la aplicación de estos factores a las 20 bandas de tercio de octava entre 1 Hz y 80 Hz medidas, se obtiene la aceleración ponderada mediante las fórmulas

$$a_{x,w} = \sqrt{\sum_{j=1}^{20} (K_{bx-y} a_{x,j})^2}, \quad a_{y,w} = \sqrt{\sum_{j=1}^{20} (K_{bx-y} a_{y,j})^2} \quad (10)$$

$$a_{z,w} = \sqrt{\sum_{j=1}^{20} (K_{bz} a_{z,j})^2} \quad (11)$$

Por otra parte, a igual aceleración la respuesta (molestia, reducción de capacidad) es 1,4 veces mayor en los ejes transversales. A efectos de la aplicación de criterios se obtiene la *magnitud* del vector aceleración, entonces, afectando por un factor 1,4 las componentes transversales de la aceleración ponderada:

$$a_w = \sqrt{(1,4a_{x,w})^2 + (1,4a_{y,w})^2 + a_{z,w}^2}. \quad (12)$$

En el caso en que la aceleración ponderada varíe durante la jornada identificándose  $n$  intervalos  $T_i$  en cada uno de los cuales la aceleración ponderada sea  $a_{w,i}$ , se aplicara una promediación energética dada por

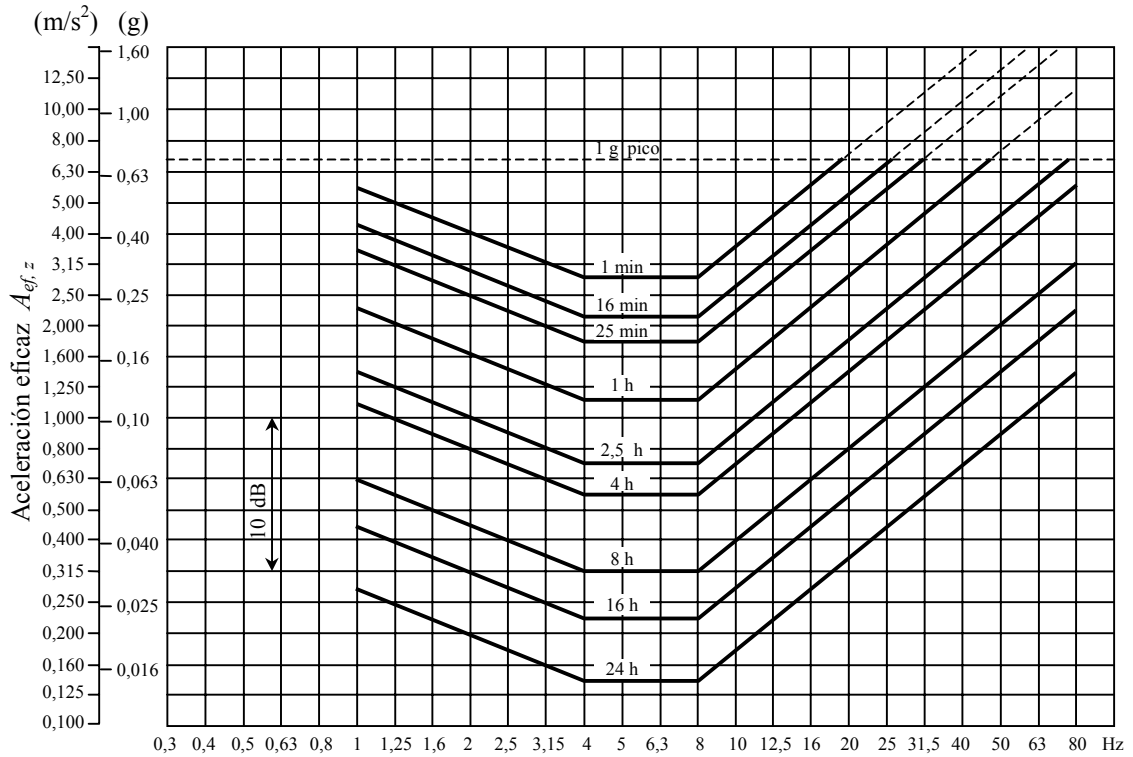
$$A_{w,eq,T} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n a_{w,i}^2 T_i}. \quad (13)$$

donde  $T = \sum T_i$ . El límite recomendado por la reglamentación (Anexo V del decreto N° 351/79 según resolución N° 295/2003 MTESS) para la aceleración ponderada equivalente según la ecuación (13) es de  $0,5 \text{ m/s}^2$  sobre la base de un tiempo diario de exposición  $T = 8 \text{ h}$ .

Otro procedimiento para la evaluación, aplicable a frecuencias individuales o bandas de tercio de octava, consiste en comparar la aceleración en una banda de tercio de octava (sin ponderar) con los valores dados por un juego de curvas para diferentes tiempos diarios de exposición. Para la aceleración longitudinal (eje Z) se utilizan las curvas de la figura 7, y para la aceleración transversal (ejes X e Y), las de la figura 8. En ambos casos las curvas tienen la misma forma que los respectivos filtros de ponderación pero invertidas.

Estas figuras se aplican al caso de la *capacidad reducida por la fatiga*. Los límites de *confort reducido* se obtienen dividiendo los valores anteriores por  $\sqrt{10}$ , mientras que los límites de *exposición*, es decir, los límites para no comprometer a mediano o largo plazo) la salud, se obtienen multiplicando los valores de las curvas por 2. A falta de relaciones dosis-efecto como en el caso de la vibración de las manos, el límite de exposición se ha tomado tentativamente como la mitad del *umbral de dolor* o *umbral de tolerancia voluntaria*.

Contaminantes físicos – Vibraciones



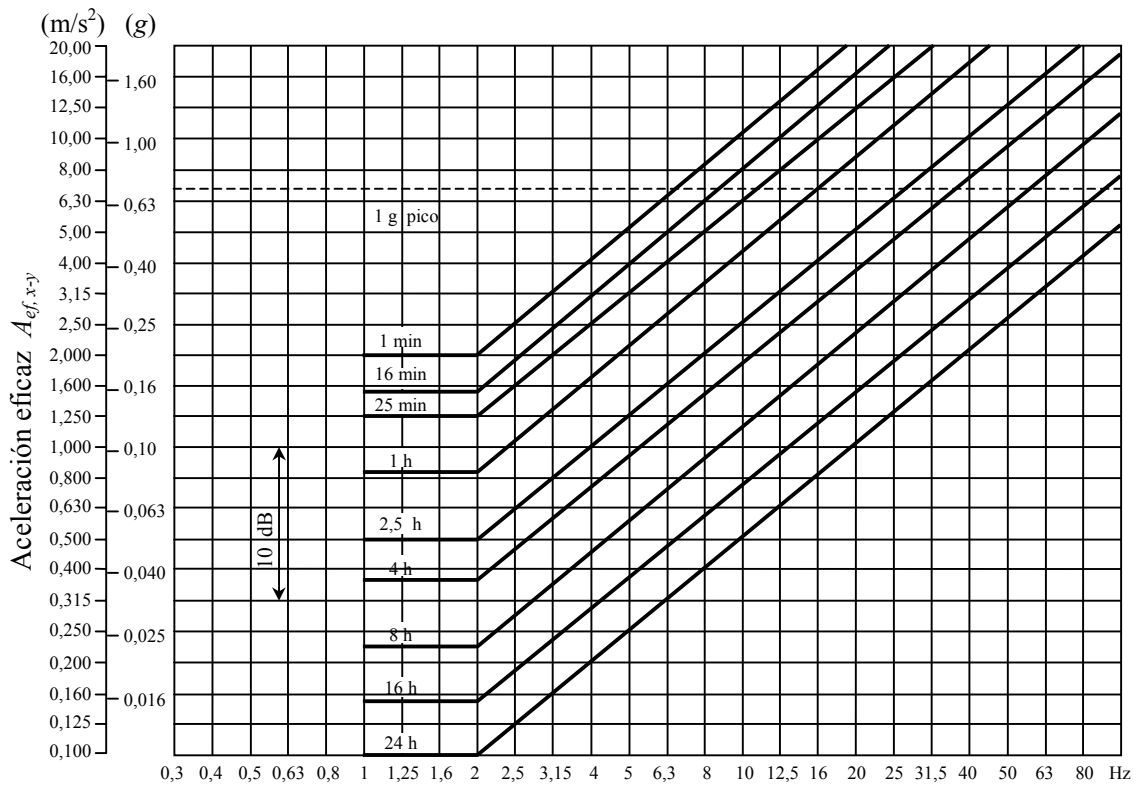
**Figura 7.** Límite de capacidad reducida por la fatiga para la aceleración eficaz en dirección longitudinal (eje Z) en función de la frecuencia y del tiempo diario de exposición (adaptado de Res. 295/2003 e IRAM 4078-1).

Supongamos, por ejemplo, que durante 4 horas diarias se está expuesto a una componente longitudinal de 31,5 Hz y 4 m/s<sup>2</sup>. De la curva correspondiente a 4 h en la figura 7 se obtiene que para 31,5 Hz el límite de exposición es de aproximadamente 2,2 m/s<sup>2</sup>, por lo cual la aceleración excede el límite admisible para la capacidad reducida por la fatiga, pero no el límite de exposición.

Para tiempos de exposición mayores de 10 min y hasta 8 horas, la relación entre tiempo de exposición y aceleración máxima admisible sigue aproximadamente el principio de la igualdad de efectos ante igual energía. Esto significa que se puede obtener la aceleración equivalente durante el tiempo  $T$  de exposición total (dada por la ecuación (13) o por la lectura de un instrumento integrador) y ver si excede o no el valor correspondiente al tiempo  $T$ . Si el tiempo  $T$  no figura entre las curvas provistas, siempre puede calcularse el valor que correspondería a cualquier otro tiempo de referencia, por ejemplo 8 h mediante

$$A_{eq,8} = \sqrt{\frac{T}{8 \text{ h}}} A_{eq,T} \quad (14)$$

Contaminantes físicos – Vibraciones



**Figura 8.** Límite de capacidad reducida por la fatiga para la aceleración eficaz en direcciones transversales (ejes X e Y) en función de la frecuencia y del tiempo diario de exposición (adaptado de Res. 295/2003 e IRAM 4078-1).

Cuando se tienen más frecuencias o más bandas con aceleración apreciable, la comparación con los límites debería efectuarse para cada frecuencia, lo cual parte de la suposición de que no existe interacción entre las diversas bandas. Debe señalarse que en el caso de vibraciones de banda ancha (vibraciones aleatorias sin componentes puras importantes) el método ponderado proporciona valores más conservativos (mayor protección) que el del análisis de las frecuencias o bandas individuales. En efecto, una vibración que tuviera una composición espectral igual al máximo admisible en todas las frecuencias para 8 h alcanzaría un valor de 0,315 m/s<sup>2</sup> en las frecuencias de máxima sensibilidad. Debido a que la ponderación es exactamente inversa a las curvas límite, se obtendrían valores ponderados iguales a 0,315 m/s<sup>2</sup> en las 20 bandas, por lo cual se tendría un valor ponderado  $\sqrt{20} = 4,47$  veces mayor, es decir, 1,41 m/s<sup>2</sup>, valor casi 3 veces más alto que el admisible según el criterio anterior de 0,5 m/s<sup>2</sup>. Para vibraciones esencialmente monofrecuenciales ambos criterios dan el mismo resultado.

**Ejemplo:** Se miden las aceleraciones en bandas de tercio de octava en las direcciones X, Y y Z en un puesto de trabajo obteniéndose los valores que se registran en la siguiente tabla durante los intervalos de tiempo indicados. Indicar si se satisfacen los límites establecidos reglamentariamente.



Contaminantes físicos – Vibraciones

$f$ [Hz]	1	2	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	$T_i$ [h]
$a_{x1}$	0,30	0,20	0,10	0	0,10	0,15	0	0	0	0	0	0	2,5
$a_{y1}$	0,25	0,17	0,10	0	0,11	0,12	0	0	0	0	0	0	
$a_{z1}$	1,20	0,80	0,50	0,04	0,30	0,20	0,01	0	0	0	0	0	
$a_{x2}$	0	0	0,30	0	0	0,27	0	0,12	0,05	0,07	0,01	0	4
$a_{y2}$	0	0	0,25	0	0	0,2	0	0,2	0,02	0,03	0	0	
$a_{z2}$	0	0	1,05	0	0	0,80	0	0,30	0,07	0,02	0,02	0	
$a_{x3}$	0	0	0	0	0,70	0	0	1,50	0	0,90	0,01	0,30	1
$a_{y3}$	0	0	0	0	0,50	0	0	1,10	0	0,80	0,03	0,25	
$a_{z3}$	0	0	0	0	1,00	0	0	1,10	0	0,30	0,10	0,05	

**Solución:** Primero aplicamos el método de la ponderación. Para ello, con ayuda de una planilla de cálculo aplicamos la ponderación correspondiente de la tabla 1 mediante las fórmulas (10) y (11). Así, a las componentes de la fila  $a_{x1}$  se las multiplica por los valores correspondientes de la fila  $K_{bx-y}$  de la tabla 1, se eleva cada resultado al cuadrado, se suma y se obtiene la raíz cuadrada. (Nótese que las bandas de 1,25 Hz, 1,6 Hz y 2,5 Hz se han omitido pues los valores medidos correspondientes fueron todos 0.) Luego se aplica la ecuación (12) para componer las componentes del vector aceleración con la correspondiente ponderación por igualdad de respuestas (1,4 para aceleración transversal y 1 para aceleración longitudinal). Estos resultados parciales se muestran en la tabla siguiente:

$i$	$a_{x,w,i}$	$a_{y,w,i}$	$a_{z,w,i}$	$a_{w,i}$	$T_i$
1	0,37122	0,31422	1,0084	1,2167	2,5
2	0,20898	0,17435	1,262	1,3183	4
3	0,42618	0,31434	1,3412	1,5325	1

Ahora se debe realizar la suma energética dada por la ecuación (13), es decir,

$$A_{w,eq,T} = \sqrt{\frac{1,2167^2 \times 2,5 + 1,3183^2 \times 4 + 1,5325^2 \times 1}{2,5 + 4 + 1}} = 1,3166 \text{ m/s}^2$$

Este valor está referido a un tiempo de exposición de  $2,5 + 4 + 1 = 7,5$  h. Para referirlo a 8 h aplicamos (14):

$$A_{w,eq,8} = \sqrt{\frac{7,5}{8}} 1,3166 \text{ m/s}^2 = 1,2748 \text{ m/s}^2.$$

Este valor supera al valor recomendado de  $0,5 \text{ m/s}^2$ .

Resolvamos ahora el mismo caso mediante el método de los límites por frecuencias individuales. Para ello obtenemos las aceleraciones equivalentes para cada banda y eje en el periodo completo de 7,5 h y las referimos a 8 h mediante (14). Se obtiene la tabla que sigue:



Contaminantes físicos – Vibraciones

$f$ [Hz]	1	2	3,15	4	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25
$a_{x,eq}$	0.17	0.11	0.27	0	0.30	0.27	0	0.62	0.04	0.37	0.01	0.11
$a_{y,eq}$	0.14	0.10	0.23	0	0.24	0.21	0	0.53	0.01	0.30	0.01	0.09
$a_{z,eq}$	<b>0.67</b>	0.45	<b>1.02</b>	0.02	<b>0.52</b>	<b>0.68</b>	0.01	0.60	0.05	0.12	0.05	0.02

La comparación con las curvas de las figuras 7 y 8 revela que en 1Hz, 3,15 Hz, 5 Hz y 6,3 Hz se superan los valores límite correspondientes a la curva de 8 h, por lo cual esta segunda metodología es coherente con el resultado anterior.

Como análisis ulterior, podemos apreciar que los valores originales no excedían los correspondientes a los respectivos tiempos (2,5 h, 4 h y 1 h), pero estaban bastante cerca, por lo que al agregar nuevos periodos con exposición importante se excedió la dosis admisible.





### Referencias bibliográficas

- Beranek, Leo L.; Vér, István L.: “Noise and Vibration Control Engineering”. John Wiley and Sons, New York, USA, 1992.
- Harris, Cyril M. (Ed): “Handbook of Acoustical Measurements and Noise Control”. Acoustical Society of America, Woodbury, NY, USA, 1998.
- Miyara, Federico: “Control de Ruido” En “Jornadas Interdisciplinarias Multidisciplinarias sobre Violencia Acústica”. ASOLOFAL. Rosario, 2000.
- IRAM 4077:1997 Vibraciones mecánicas y choques. Vibraciones de edificios. Guía para la medición de vibraciones y evaluación de sus efectos sobre los edificios
- IRAM 4078-1:1989 Guía para la exposición humana del cuerpo entero a vibraciones. Especificaciones generales
- IRAM 4078-2:1990 Acústica. Guía para la evaluación de la exposición humana del cuerpo entero a vibraciones. Estimación de la exposición humana a vibraciones continuas e inducidas por choques en edificios (1Hz a 80 Hz)
- IRAM 4078-3:1991 Guía para la evaluación de la exposición humana a vibraciones del cuerpo entero. Evaluación de la exposición a vibraciones del cuerpo entero en la dirección del eje z en la gama de frecuencias de 0,1 Hz a 0,63 Hz
- IRAM 4090:1981 Vibraciones. Definiciones
- IRAM 4097:1988 Vibraciones mecánicas. Guía para la medición y evaluación de la exposición del ser humano a vibraciones transmitidas a través de las manos
- ISO 2631:1987 Evaluation of human exposure to whole-body vibration.
- ISO 2631:1987 Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 2: Evaluation of human exposure to vibration and shock in buildings (1 to 80 Hz).
- ISO 2631:1985 Evaluation of human exposure to whole-body vibration. Part 3: Evaluation of exposure to whole-body z-axis vertical vibration in the frequency range 0,1 to 0,63 Hz
- ISO 5349:1986 Mechanical Vibration - Guidelines for the measurement of human exposure to hand-transmitted vibration