



5.2.

Vibraciones en la edificación

Marçal Serra i Joan

CESVA instruments, s.l. Director de Acústica
ms@cesva.com

¿Que son las vibraciones?

Descripción

- Vibración es un movimiento oscilatorio de un cuerpo o partícula alrededor de un punto de referencia fijo [normalmente es la variación de una magnitud, con el tiempo, de tal manera que va tomando valores mayores y menores que una referencia]
- La vibración es un efecto no deseado y molesto, debido a un proceso útil: maquinaria (partes móviles), medios de transporte (motores), ...
- La vibración puede también tener aplicaciones útiles:
 - Control final de productos por excitación
 - Limpieza por ultrasonidos, etc.

¿Que son las vibraciones?

Efectos de las vibraciones

- En la MAQUINARIA:
 - Desgaste
 - y suelen provocar roturas por fatiga
- En los EDIFICIOS:
 - Roturas
 - Grietas o fisuras en paredes o forjados
- En los SERES HUMANOS:
 - Síndrome del “Dedo Blanco”, pérdida de sensibilidad por atrofio de los nervios.
 - Alteraciones de la respiración y del habla
 - Reducción del rendimiento en el desarrollo de Tareas
 - Mareo por movimiento (Motion Sickness)
 - Molestias e insomnio



¿Que son las vibraciones?

Magnitudes

- La vibración se puede medir a partir las siguientes magnitudes
 - x = DESPLAZAMIENTO [m]
 - v = VELOCIDAD [m/s]
 - a = ACELERACIÓN [m/s² o g; 1 g = 9,8 m/s²]
- Debido a su gran margen dinámico, estas magnitudes se suelen expresar en forma de nivel referido a un valor fijo.
 - DESPLAZAMIENTO [dB] con $x_o = 1 \text{ pm}$
$$L_x = 20 \cdot \log \left(\frac{x}{x_o} \right)$$
 - VELOCIDAD [dB] con $v_o = 1 \text{ nm/s}$
$$L_v = 20 \cdot \log \left(\frac{v}{v_o} \right)$$
 - ACELERACIÓN [dB] con $a_o = 1 \text{ } \mu\text{m/s}^2$
$$L_a = 20 \cdot \log \left(\frac{a}{a_o} \right)$$

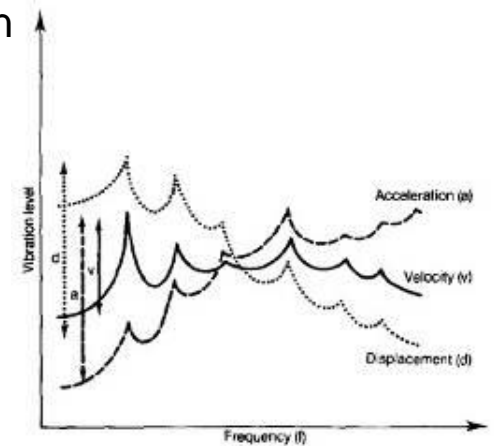
¿Que son las vibraciones?

Magnitudes

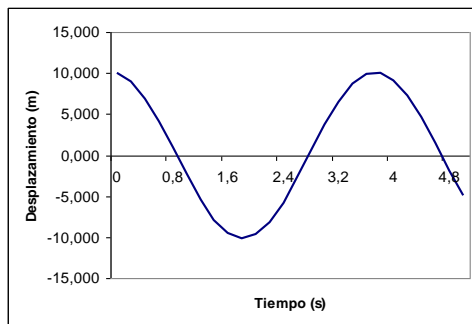
- La medición de la aceleración nos permite obtener la información de velocidad y desplazamiento por simple integración.

$$v = \frac{dx}{dt} \quad a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

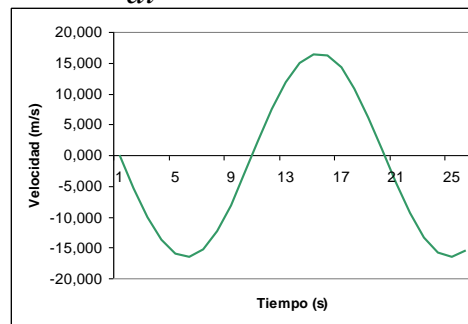
$$a \rightarrow v = \int a \, dt \rightarrow x = \int v \, dt$$



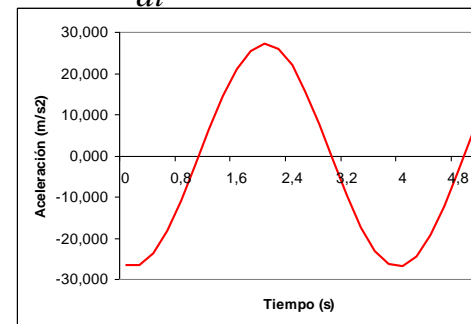
$$x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$



$$v(t) = \frac{dx(t)}{dt} = -A\omega \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$



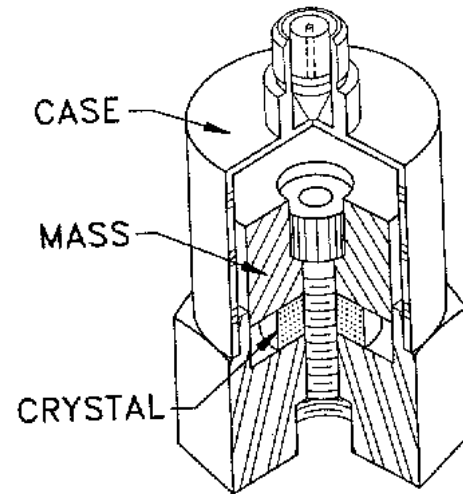
$$a(t) = \frac{dv(t)}{dt} = -A\omega^2 \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$



El acelerómetro

descripción

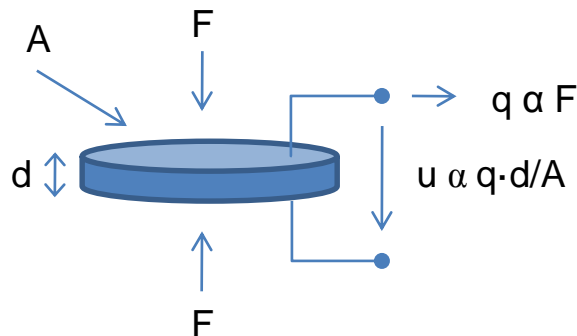
- El **acelerómetro** es un transductor electromecánico que proporciona, en sus terminales de salida, una señal proporcional a la aceleración a que está sometido.
- Acelerómetros hay de diversos tipos, los más usados son los **acelerómetros Piezoeléctricos**.



El acelerómetro piezoeléctrico

descripción

- El acelerómetro piezoeléctrico se basa en las propiedades de los materiales piezoeléctricos. Estos materiales son capaces de generar una carga eléctrica proporcional a la fuerza que se ejerce sobre ellos.
- El material piezoeléctrico suele ser una cerámica ferroeléctrica polarizada artificialmente, la cual puede ser excitada mecánicamente por una fuerza tanto de **compresión, cortadura o flexión**.
- En los extremos del material piezoeléctrico se colocan 2 electrodos

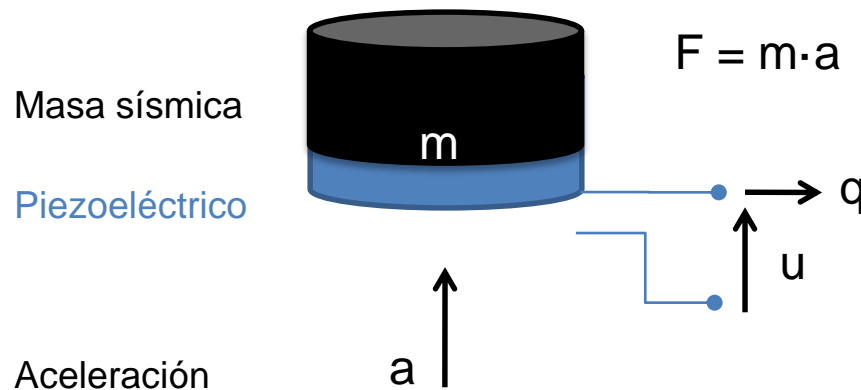


F	Fuerza
A	Área de electrodo
d	Grosor
q	Carga
u	Tensión

El acelerómetro piezoeléctrico

descripción

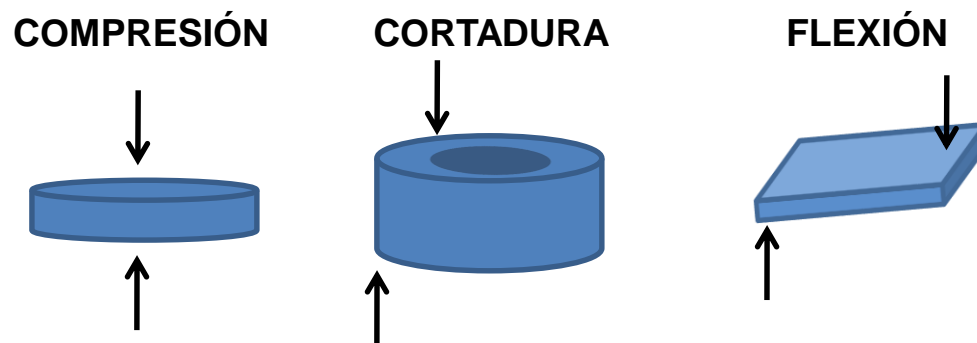
- Sobre el material piezoeléctrico se coloca la masa sísmica, de esta manera cuando el acelerómetro está sometido a una vibración, se genera una fuerza sobre el material piezoeléctrico.
- Esta fuerza es igual a la masa sísmica por la aceleración
- El material piezoeléctrico genera una carga proporcional a la fuerza aplicada
- Como la masa sísmica no varia → la carga es proporcional a la aceleración.



El acelerómetro piezoeléctrico

Tipología por construcción

- Según como se aplica la fuerza sobre el piezoeléctrico, se pueden diferenciar tres tipos de acelerómetros que tendrán propiedades distintas:
 - Acelerómetros de Compresión
 - Acelerómetros de Cortadura
 - Acelerómetros de Flexión
- Externamente no se distinguen entre ellos. Tanto unos como los otros pueden tener el conector de salida en la parte superior o en el lateral.



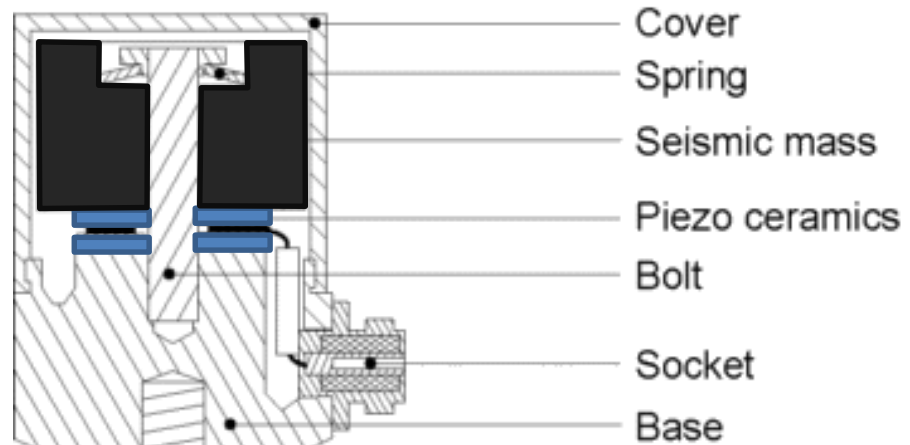
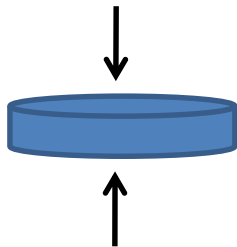
El acelerómetro piezoeléctrico

Tipología por construcción

■ ACELERÓMETROS DE COMPRESIÓN:

- Son los más intuitivos. Siguen físicamente la analogía mecánica que hemos visto
- VENTAJAS: Gran relación sensibilidad/masa, gran robustez y baja sensibilidad cruzada
- INCONVENIENTES: son muy sensibles al gradiente de temperatura y a la deformación de base

COMPRESIÓN



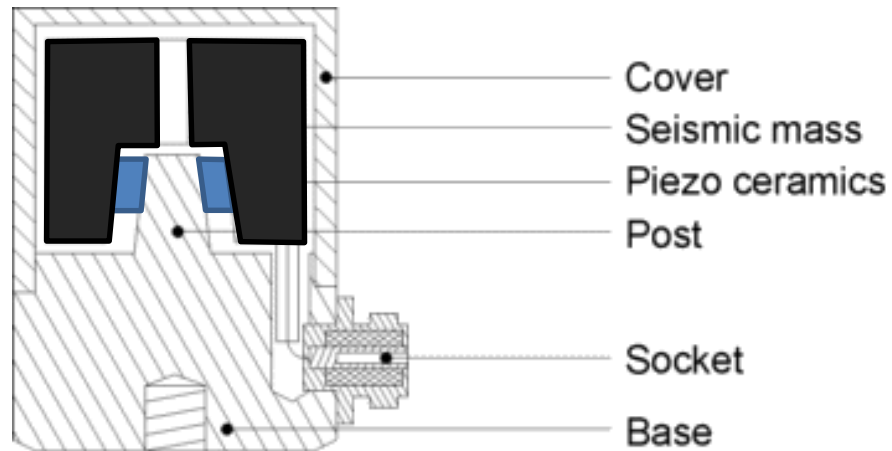
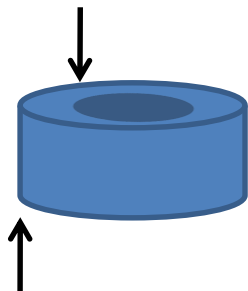
El acelerómetro piezoeléctrico

Tipología por construcción

■ ACELERÓMETROS DE CORTADURA:

- Tienen el piezoeléctrico en vertical y la masa en contacto por su lateral. El movimiento de la masa ejerce fuerza al piezoeléctrico por cortadura lateral y no por compresión sobre el.
- VENTAJAS: Son menos sensibles al gradiente de temperatura y la deformación de base
- INCONVENIENTES: relación sensibilidad/masa baja, tienen mucha sensibilidad cruzada

CORTADURA

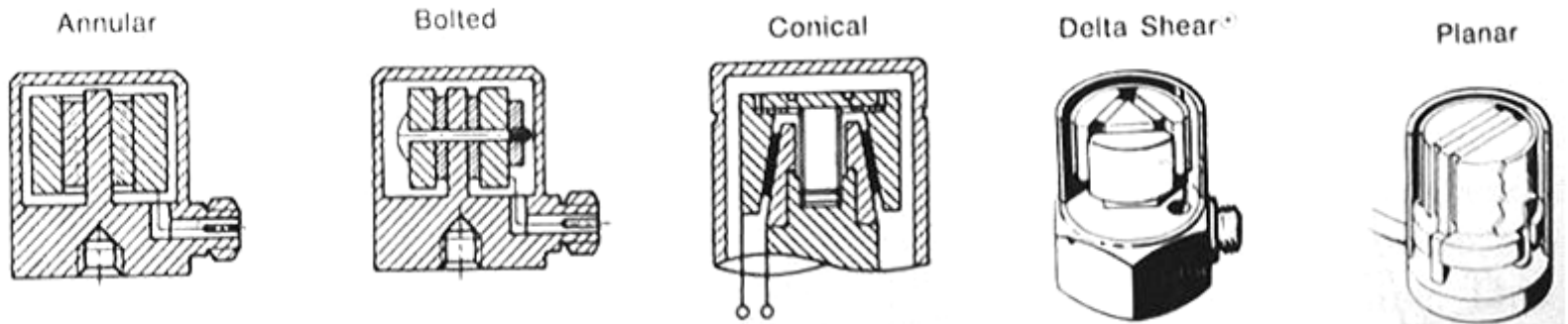


El acelerómetro piezoeléctrico

Tipología por construcción

■ ACELERÓMETROS DE CORTADURA:

- Hay de varios tipos según la forma la masa: planar shear, delta shear, anular shear...
- Son los más utilizados por su independencia de las condiciones ambientales

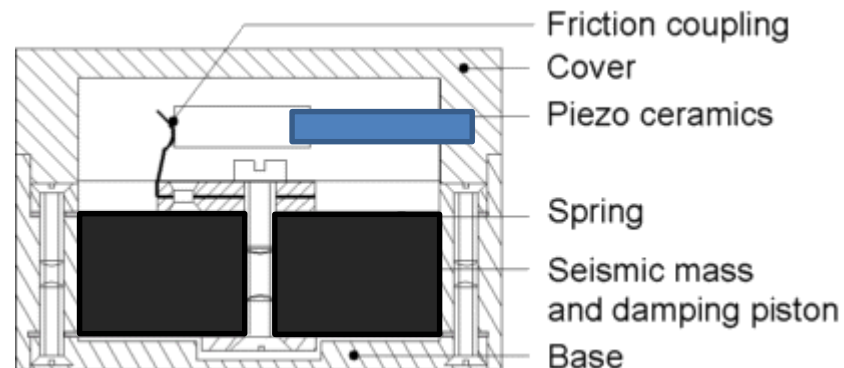
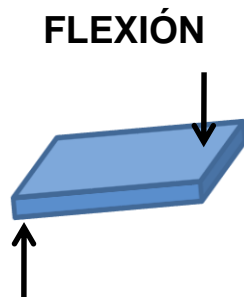


El acelerómetro piezoeléctrico

Tipología por construcción

■ ACELERÓMETROS DE CORTADURA:

- Tienen el piezoeléctrico en horizontal y fijado por uno de sus extremos. La masa está suspendida y fijada al extremo libre del piezoeléctrico de tal manera que su movimiento ejerce una fuerza de flexión sobre este.
- VENTAJAS: tienen la mejor relación sensibilidad/masa de los tres tipos.
- INCONVENIENTES: Son frágiles y sensibles a los gradientes de temperatura.



El acelerómetro piezoeléctrico

Propiedades

- Gran margen dinámico pueden medir tanto vibraciones como choques.
- Excelente linealidad dentro de su margen dinámico.
- Gran margen frecuencial, se pueden medir frecuencias altas.
- Compacto y con alta sensibilidad.
- No tiene partes móviles, larga duración.
- No necesita alimentación externa, autogenerador.
- Señal de salida proporcional a la aceleración → permite obtener fácilmente por integración la información de velocidad y desplazamiento.
- Sensibilidad
- Respuesta frecuencial
- Sensibilidad cruzada
- Margen dinámico
- Linealidad
- Respuesta al impulso

El acelerómetro piezoeléctrico

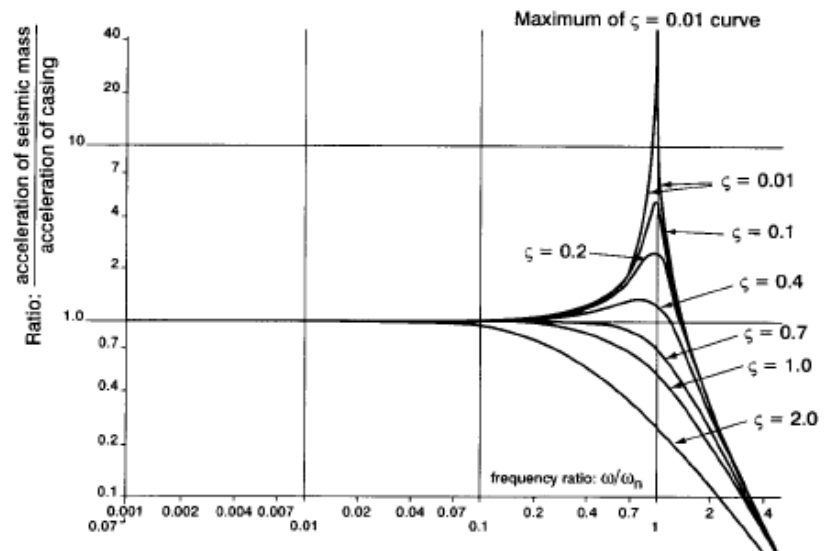
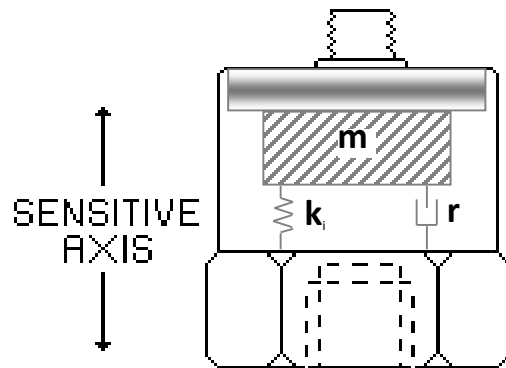
Propiedades: Sensibilidad

- La SENSIBILIDAD es la relación entre la aceleración y la salida del acelerómetro
- Un acelerómetro piezoeléctrico puede ser descrito como una fuente de carga o una fuente de tensión (con impedancia muy alta):
 - Sensibilidad de tensión → [mV/g] o [mV/ms⁻²]
 - Sensibilidad de carga → [pC/g] o [pC/ms⁻²]
- Cuanto mayor es la masa sísmica (peso) mayor es su sensibilidad

El acelerómetro piezoelectrico

Propiedades: Respuesta frecuencial

- La masa sísmica (m) forma un sistema mecánico con la elasticidad (k) y la viscosidad (r) necesarias para que la masa se mueva libremente en el eje de sensibilidad.
- Este sistema mecánico al ser excitado por una vibración mecánica forzada, presentará una respuesta frecuencial con una resonancia muy acusada.



El acelerómetro piezoeléctrico

Propiedades: Respuesta frecuencial

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r \frac{dx}{dt} + kx = F \cdot \cos(\omega t)$$

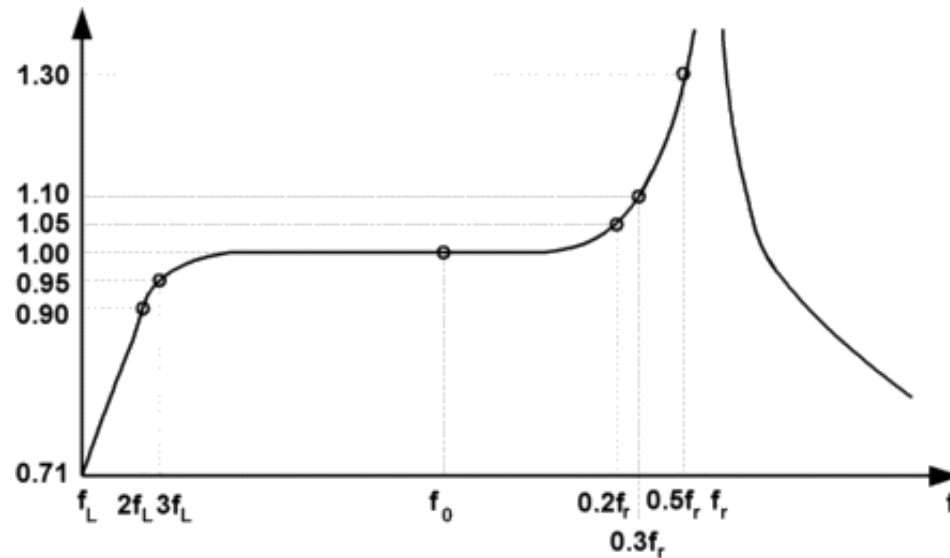
$$x(t) = A \cdot \cos(\omega t + \varphi)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{F}{\sqrt{m^2 \cdot (\omega^2 - \omega_o^2)^2 + (r\omega)^2}} \\ \omega_o = \sqrt{\frac{k}{m}} \end{array} \right.$$

El acelerómetro piezoeléctrico

Propiedades: Respuesta frecuencial

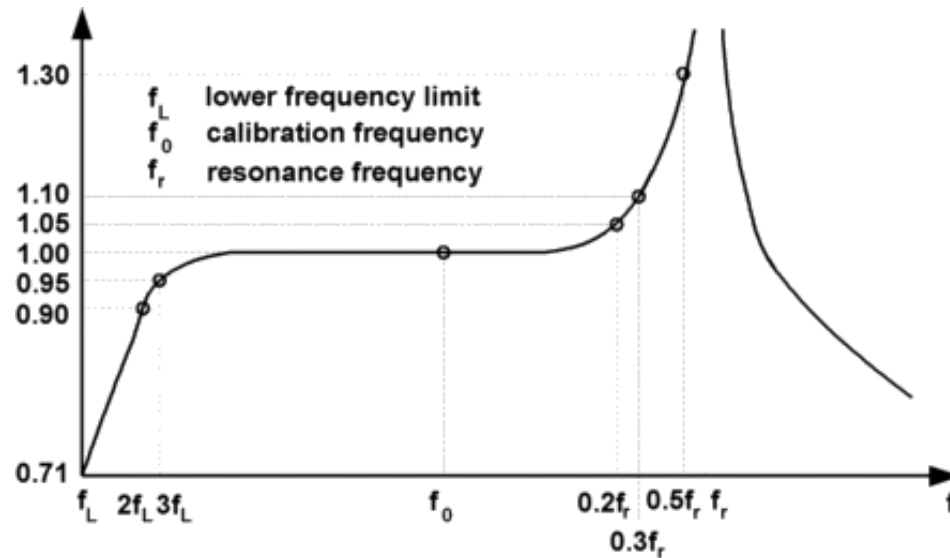
- La banda útil de trabajo del acelerómetro es la situada a la izquierda de la frecuencia de resonancia, que es la zona de respuesta plana
- Así pues interesará tener w_0 lo más grande posible para conseguir el máximo de banda de trabajo posible ($k \uparrow$ y $m \downarrow$).



El acelerómetro piezoeléctrico

Propiedades: Respuesta frecuencial

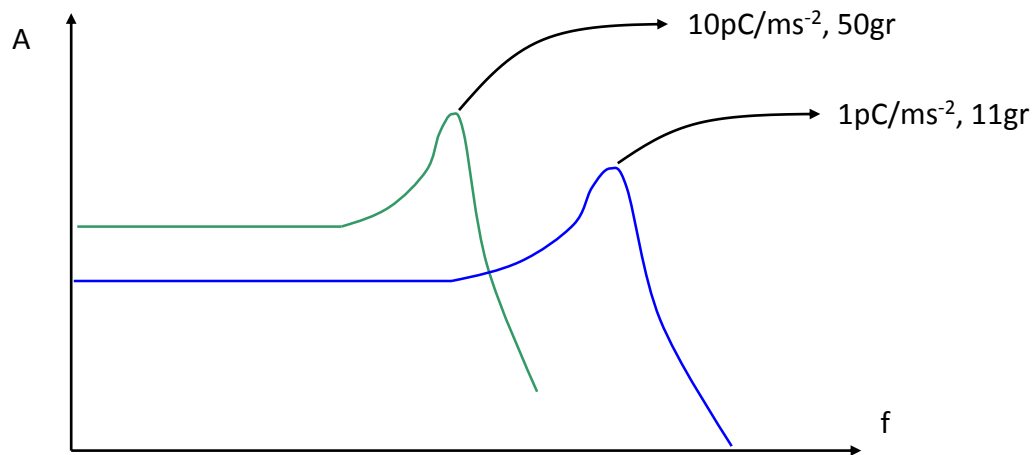
- El margen frecuencial se suele expresar:
 - Al 5 % (aproximadamente a 1/5 de la frecuencia de resonancia).
 - Al 10 % (aproximadamente a 1/3 de la frecuencia de resonancia).
 - A 3 dB (aproximadamente a 1/2 de la frecuencia de resonancia).



El acelerómetro piezoeléctrico

Propiedades: Sensibilidad vs Margen frecuencial vs Peso

- Es el compromiso más importante de los acelerómetros. Para tener una buena sensibilidad es necesaria una masa grande ($F=m \cdot a$), pero una masa grande hará pesado al acelerómetro y limitará el margen frecuencial útil ($\omega_0 = [k/m]^{-1/2}$).
- PESO grande \rightarrow SENSIBILIDAD grande \rightarrow RESPUESTA FRECUENCIAL pequeña
- PESO pequeño \rightarrow SENSIBILIDAD pequeña \rightarrow RESPUESTA FRECUENCIAL grande



El acelerómetro piezoeléctrico

Propiedades: Sensibilidad cruzada

- El acelerómetro se utiliza para medir la aceleración en un dirección espacial determinada. Pero, la realidad es que también es un poco sensible a las vibraciones en otras direcciones. Esto impide desacoplar totalmente las mediciones en una única dirección y por tanto no es nada deseable.
- La SENSIBILIDAD CRUZADA es la relación entre la aceleración media en el eje principal y la medida en la dirección perpendicular al eje principal.
- En un acelerómetro de precisión solo se tolera un 5% de sensibilidad cruzada. Es decir, que sometiendo el acelerómetro a una vibración perpendicular al eje de medición, la salida solo puede ser el 5% del que daría si la vibración fuese en la dirección correcta
- Los acelerómetros de cortadura presentan este defecto de forma más acentuada debido a su construcción.

El acelerómetro piezoeléctrico

Propiedades: Margen dinámico

- El margen dinámico viene definido por la aceleración máxima y por el ruido intrínseco del acelerómetro:
- RUIDO INTRÍNSECO:
 - Un sensor piezoeléctrico puede considerarse como puramente capacitivo; así pues el sensor está libre de ruido interno. Hay acelerómetros (IEPE, ICP[®]) que incorporan en su interior una pequeña electrónica para el acondicionamiento de señal. En este caso si existe ruido intrínseco.
- ACELERACIÓN MÁXIMA:
 - Normalmente se especifica la máxima aceleración para la dirección positiva y negativa de salida para el rango de temperaturas en interior.
 - La aceleración máxima depende del tipo de construcción del acelerómetro.
 - Si alguno de estos límites se sobrepasa accidentalmente, por ejemplo por caída a un suelo duro desde la altura de la mano (el acelerómetro se somete a miles de g, el sensor seguirá funcionando pero será necesario verificarlo con un calibrador para comprobar que no está dañado.

El acelerómetro piezoeléctrico

Propiedades: Linealidad y respuesta al impulso

■ LINEALIDAD:

- Como todo transductor de medición es necesario que el acelerómetro sea lineal.
- Es decir, que la señal eléctrica de salida reproduzca fielmente (proporcionalmente) la aceleración que a la que está sometida el acelerómetro, sea cual sea su amplitud. En otras palabras, que la sensibilidad se mantenga constante con la amplitud de la vibración.
- La componente elástica (k) es la más vulnerable a presentar no linealidades, así que el parámetro que más controlan los fabricantes es la sujeción de la masa.

■ RESPUESTA AL IMPULSO:

- Es la respuesta a una delta de Dirac. Como cualquier sistema mecánico, el acelerómetro tiene una inercia que hace que no pueda seguir movimientos muy rápidos y falsee señales de corta duración.
- La curva de respuesta impulsional depende principalmente de la masa (inercia) y de la resistencia (amortiguación).

El acelerómetro piezoeléctrico

Carta de calibración (Calibration chart)

Calibration Chart for Accelerometers

CESVA

Type AC 006
Serial number 66666

Reference Sensitivity at and	80 Hz 22 °C
Voltage Sensitivity	100,2 mV/m/s ² / 982,7 mV/g *
Transverse Sensitivity (at 40 Hz)	1,4 %
Output bias voltage (at 4mA)	12,8 V

For Resonant Frequency, see attached individual Frequency Response Curve. The lower cut-off frequency (-3 dB) is 0,15Hz.

* 1 g = 9,807 m/s²

Operating temperature Tmin/Tmax -20/90 °C

Maximum acceleration $\hat{a}+$, $\hat{a}-$ 55 m/s²

Temperature coefficient TK(Bua) --

Polarity

Polarity is positive on the output pin of the connector for an acceleration directed from the mounting surface into the body of the accelerometer.

Environmental characteristics

Temperature transients baT --

Base strain baS --

Magnetic field baB --

Acoustic noise baP --

Electric noise (20 .. 50000 Hz) < 20 μ V

Physical parameter

Material Stainless steel

Weight (without cable) 165 g

Electical Connector Binder 713

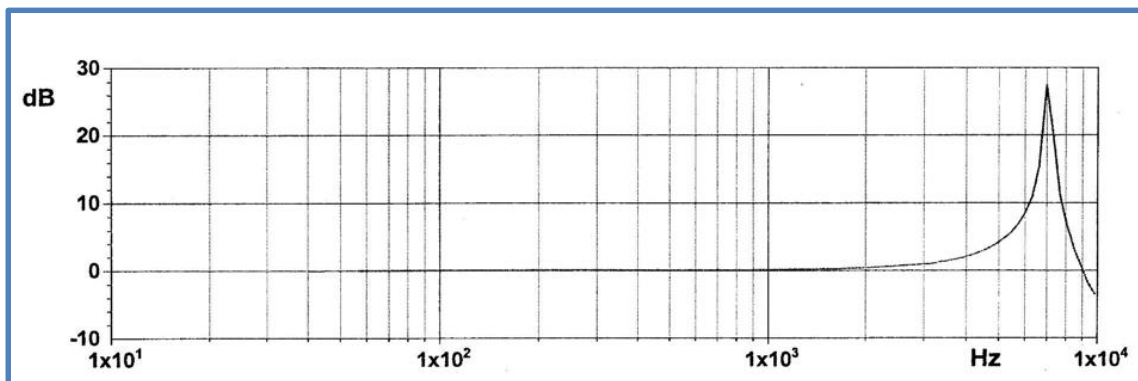
Mounting M8 thread in base

Piezo design Shear system

Current source

The supply current for the internal charge converter amount 2 .. 20 mA at a supply voltage of 24 - 30V.

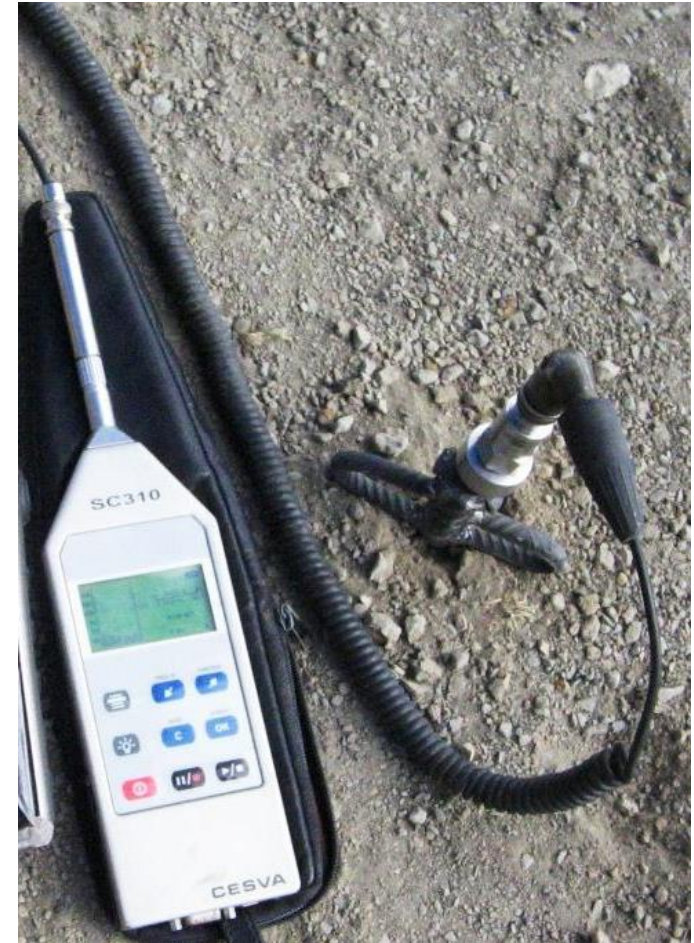
Additional data IP 67/68



Montaje de un acelerómetro

Conceptos básicos

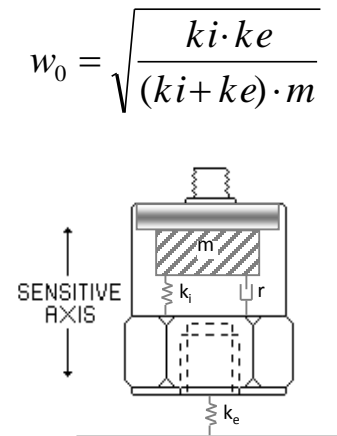
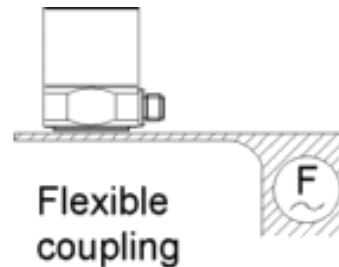
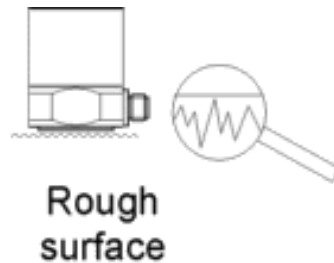
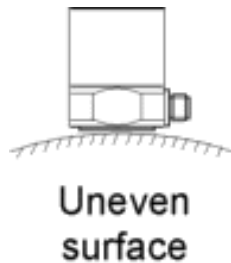
- El acelerómetro debe montarse de manera que la dirección de medición (vibración) coincida con su eje principal.
- La base del acelerómetro y el objeto deben tener superficies limpias, planas, lisas y sin ralladuras
- El sistema de montaje deberá garantizar una sujeción muy fuerte (rígida) para que el acelerómetro siga perfectamente los movimientos del objeto.



Montaje de un acelerómetro

Errores típicos en el montaje

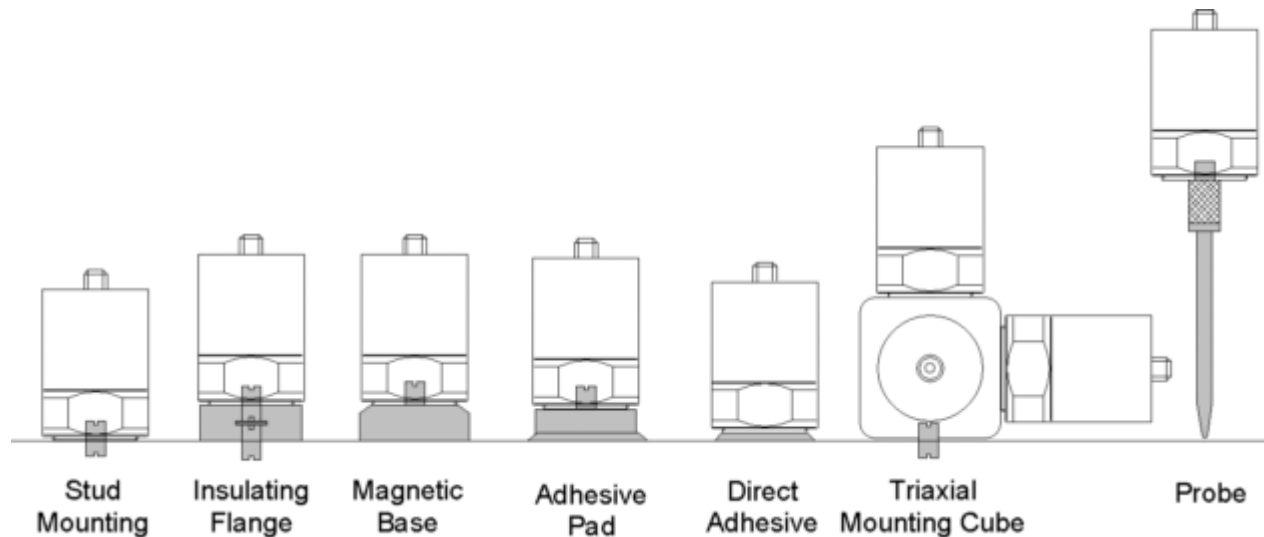
- Atornillado
- Base aisladora
- Base magnética
- Discos adhesivos
- Pegado con cola, cemento o cera de abeja



Montaje de un acelerómetro

Tipos de Montaje

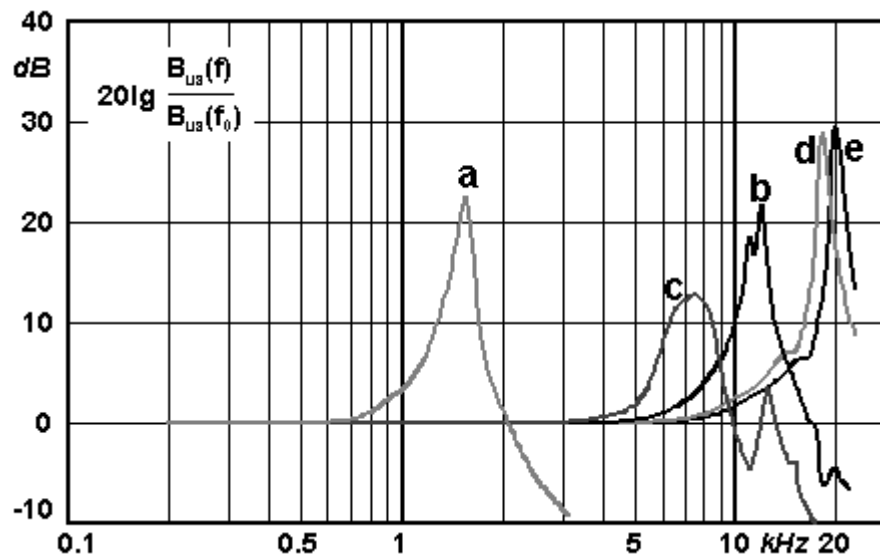
- Superficie no plana
- Superficie no lisa
- Acoplamiento flexible: Al reducir la rigidez de la sujeción (k_e) disminuimos la banda útil del acelerómetro, ya que la frecuencia de resonancia del sistema baja.



Montaje de un acelerómetro

Tipos de Montaje

- En la práctica, si queremos medir una vibración de muy baja frecuencia podemos sujetar el acelerómetro 'de cualquier manera'
- Dependiendo del montaje existe una reducción del margen frecuencial de medición:



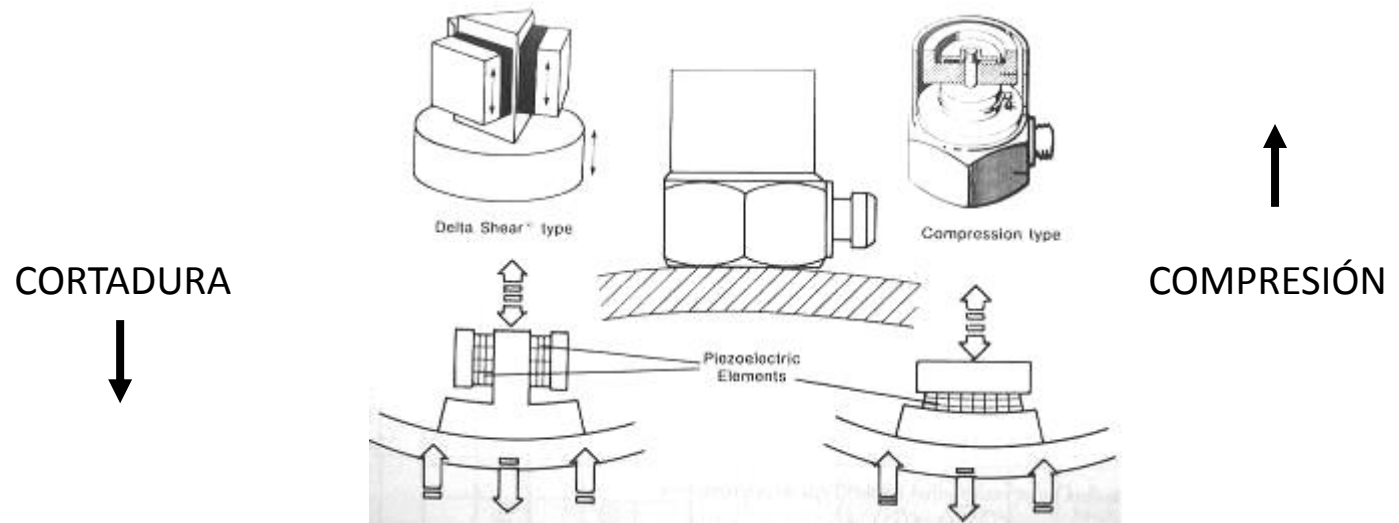
- a** Sonda
- b** Base aisladora
- c** Base magnética
- d** Pegado con adhesivo
- e** Atornillado

Montaje de un acelerómetro

Influencia del ambiente

■ DEFORMACIÓN DE LA BASE:

- Cuando la vibración deforma la superficie del objeto a medir en λ (longitud de onda superficial) comparable a las dimensiones del acelerómetro, este sufre un efecto llamado BASE STRAIN (o deformación de la base).
- Este efecto consigue ejercer unas fuerzas sobre el piezoeléctrico que se terminan traduciendo en un ruido de baja frecuencia que reduce, de esta manera, la dinámica.



Montaje de un acelerómetro

Influencia del ambiente

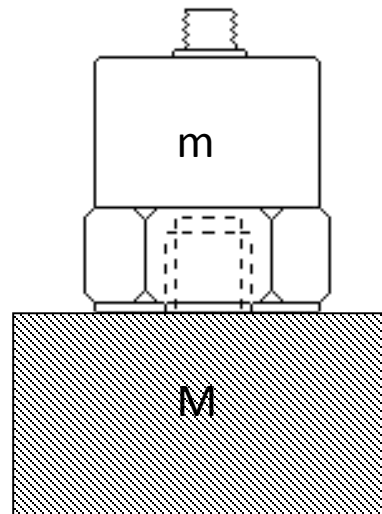
- RANGO DE TEMPERATURAS y GRADIENTES DE TEMPERATURA:
 - Por encima de una determinada temperatura (punto Curie $T > 250^{\circ}\text{C}$) las cerámicas piezoeléctricas empiezan a despolarizarse, de manera que la sensibilidad queda alterada permanentemente. Estos acelerómetros pueden seguir siendo utilizados después de su re-calibración.
 - Cuando se somete el acelerómetro a un gradiente espacial de temperatura, este genera ruido de baja frecuencia y por tanto se reduce su dinámica.
 - Para que la temperatura sea el máximo de homogénea posible (espacialmente), se puede proteger el acelerómetro de corrientes y dejarlo acoplado al objeto el tiempo suficiente para que se establezca su temperatura (p.e. en una máquina caliente).
 - CORTADURA → poco sensibles a los gradientes de temperatura
COMPRESIÓN → muy sensibles a los gradientes de temperatura

Montaje de un acelerómetro

Influencia del ambiente

■ EFECTO DE CARGA:

- La masa del acelerómetro (m) debe ser tal que al montarlo sobre el objeto a analizar no varíe su manera de vibrar.



$$M > 10 \cdot m$$

Montaje de un acelerómetro

Influencia del ambiente

■ HUMEDAD:

- Los acelerómetros están sellados, así pues la humedad solo puede entrar por el conector. Para solucionarlo, utilizar dispositivos selladores (termoretractil).

■ RUIDO ACÚSTICO

- Solo hay influencia del acelerómetro a niveles acústicos muy elevados: 145 dB. No confundir la sensibilidad del acelerómetro al ruido con la sensibilidad a la vibración del objeto donde está montado.

■ CAMPOS MAGNÉTICOS

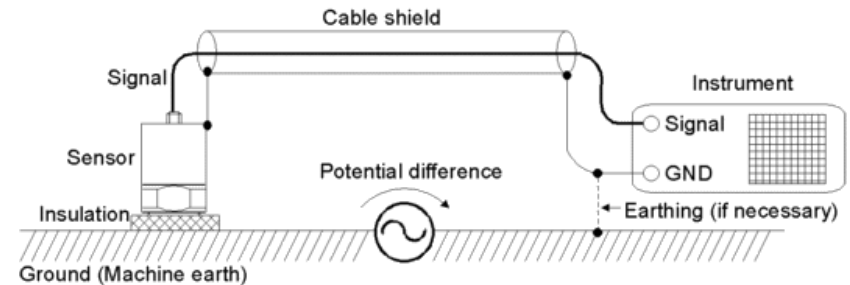
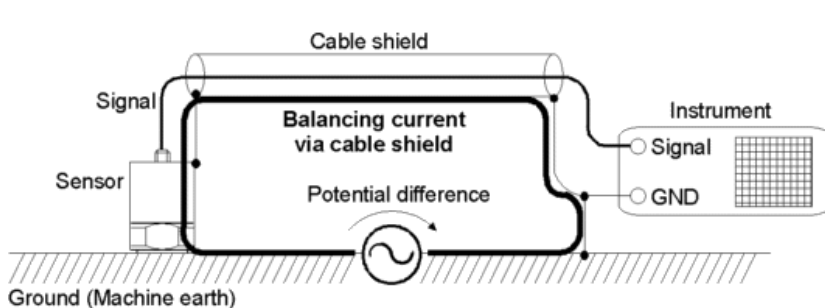
- La sensibilidad a los campos magnéticos está típicamente en el margen de 0,5 a 30 ms⁻²/T. Por lo tanto no suele haber problemas, a no ser que el campo magnético sea muy elevado.

Montaje de un acelerómetro

Influencia de los cables

■ BUCLES DE TIERRA:

- Corrientes eléctricas fluyen por la pantalla del cable que une el acelerómetro y el instrumento de medición, debido a que tienen conexiones a tierra distintas.
- El bucle de tierra se rompe aislando eléctricamente la base del acelerómetro de la superficie donde está montado. Para ello se utilizan arandelas de mica o fibra de carbono y tornillos aislantes.

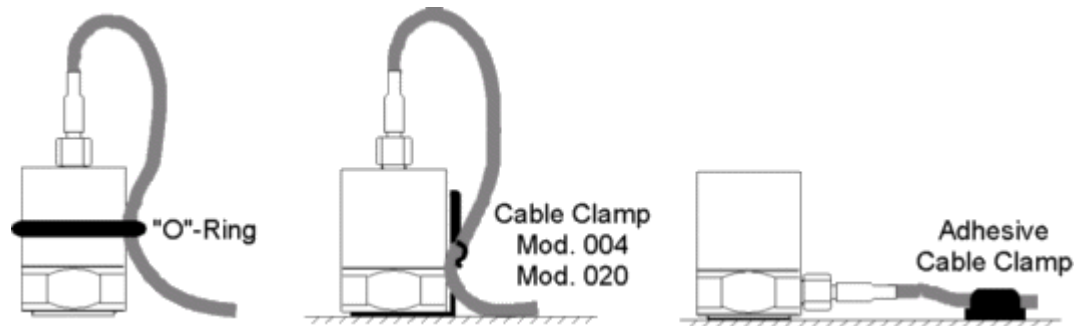


Montaje de un acelerómetro

Influencia de los cables

■ RUIDO TRIBOELÉCTICO:

- Movimiento (vibración) de los cables, durante la medición, puede provocar que la pantalla del cable se separe del aislante del cable central. Así, un campo eléctrico se crea entre la pantalla y el aislante, provocando la aparición de pequeñas corrientes en la pantalla que aparecen superpuestas a la señal de salida del acelerómetro.
- Para que esto no suceda, deben utilizarse cables de bajo ruido y fijarlos con cinta adhesiva a la superficie de medición.



Acondicionamiento de la señal del acelerómetro

El preamplificador

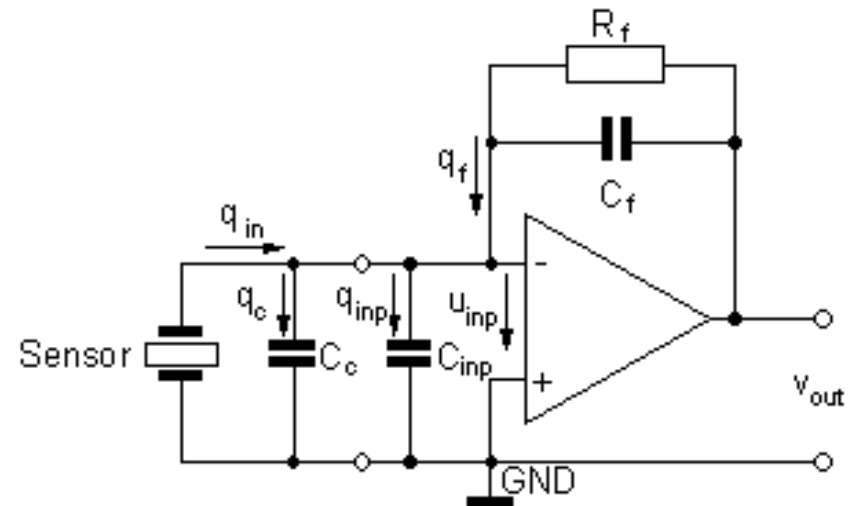
- La salida de un acelerómetro tiene: alta impedancia de salida y bajo nivel de señal. Por tanto será necesario utilizar un preamplificador antes de atacar cualquier instrumento de medida.
- Las funciones del preamplificador son:
 - Adaptar impedancias
 - Amplificar
- Tipos de preamplificador:
 - Preamplificador exterior al acelerómetro: Preamplificador de carga
 - Preamplificador en el interior del acelerómetro (IEPE)

Acondicionamiento de la señal del acelerómetro

El preamplificador de carga

- Los acelerómetros tienen salida de carga y presentan una impedancia de salida alta y de tipo capacitivo.
- Se hablará de una sensibilidad de carga, en pC/ms⁻².
- El cable se conecta a una etapa de impedancia de entrada capacitiva y muy elevada C_{inp} .
- La impedancia resultante es $C_c + C_{inp}$.
- La salida es proporcional a la carga que a su vez es proporcional a la aceleración

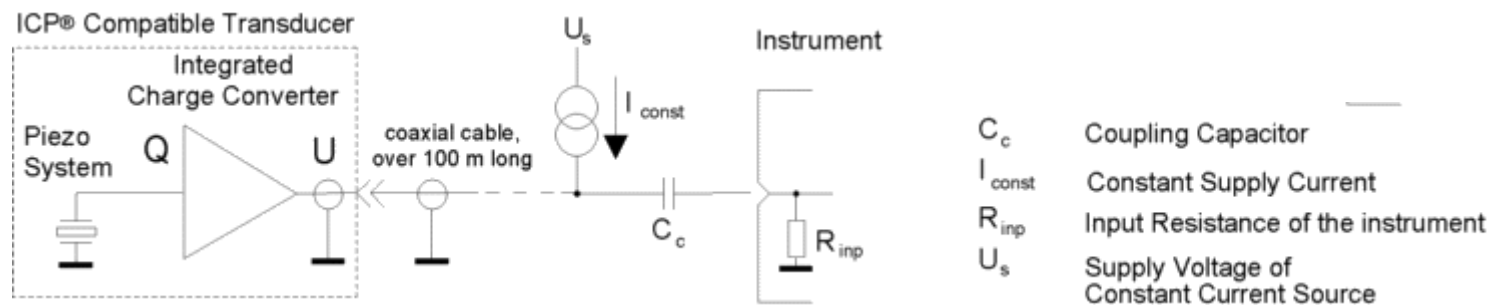
$$V_o \approx \frac{Q \cdot A}{C_p} = \frac{Q \cdot A}{C_f \cdot (A-1)} \approx \frac{Q}{C_f}$$



Acondicionamiento de la señal del acelerómetro

El Preamplificador en el interior del acelerómetro (IEPE)

- Integrated Electronics Piezo Electric (IEPE) o Integrated Circuit Piezoelectric ICP®
- Se hablará de una sensibilidad de tensión, en mV/ms^{-2} .
- Convierte la salida de carga de alta impedancia en una de tensión de baja impedancia.
- El circuito interno se alimenta con una fuente de corriente continua
- La señal de vibración se transmite de retorno añadiéndola sobre la continua
- Tanto la corriente de polarización como la tensión se transmiten por el mismo cable.



El vibrómetro

descripción

- El vibrómetro es un instrumento para medir la vibración humana y debe cumplir la norma ISO 8041 “Human response to vibration: Measuring instrumentation”



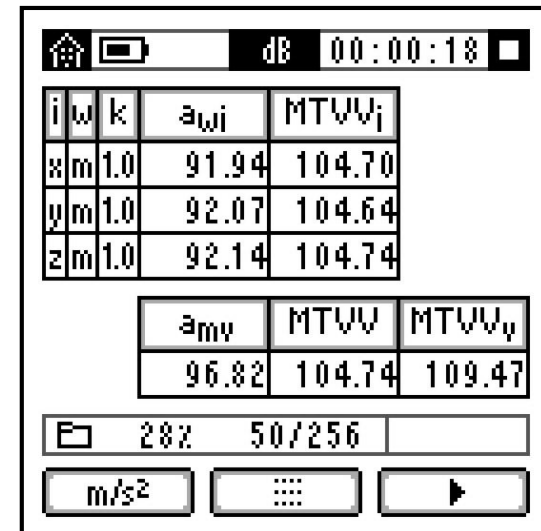
El vibrómetro

Funciones mínimas

- Como mínimo, un vibrómetro debe disponer de un medio para mostrar:
 - El valor medio a lo largo del tiempo de medición de la aceleración con ponderación frecuencial. Para cada canal.
 - El valor medio a lo largo del tiempo de medición de la aceleración sin ponderar → para poder realizar la verificación del equipo. Para cada canal.
 - El valor del tiempo de medición



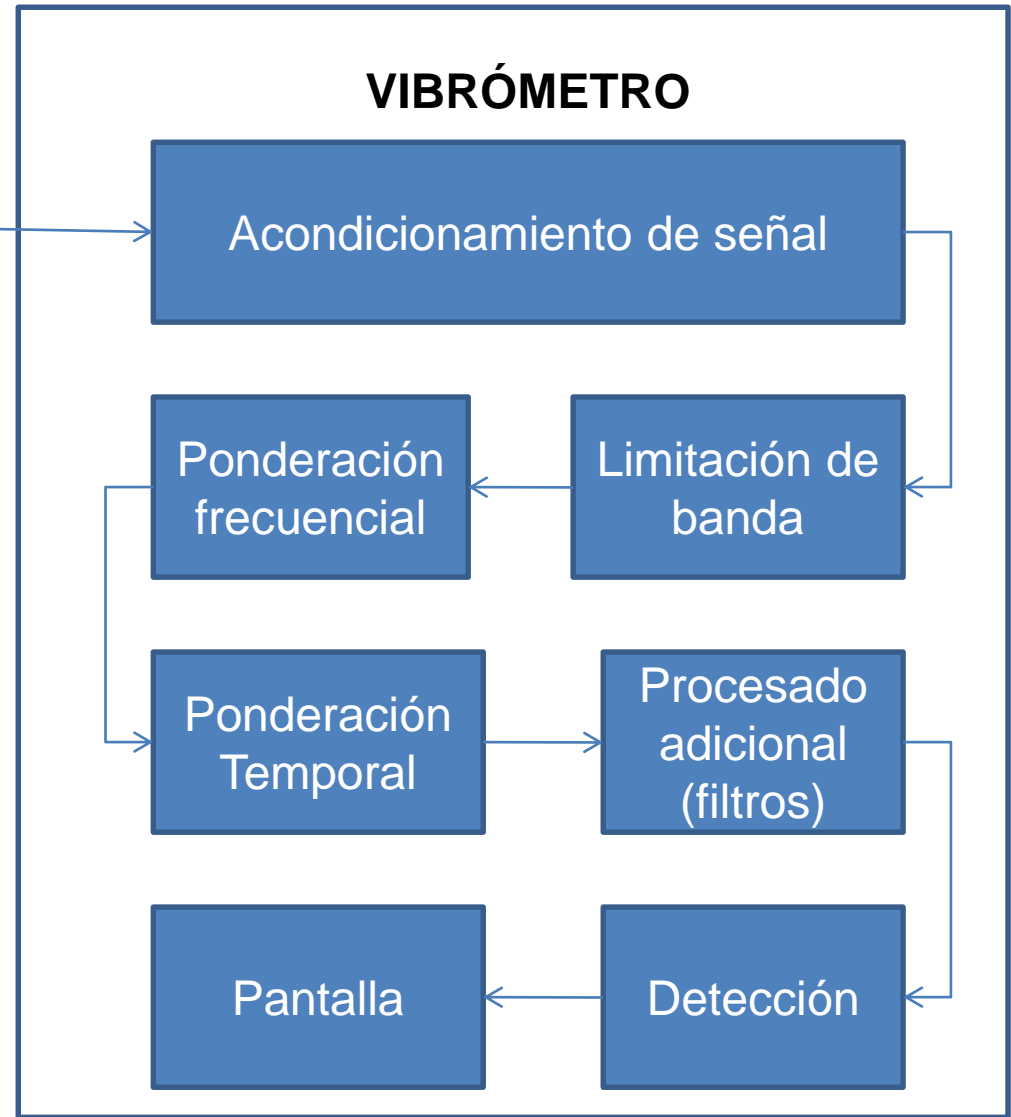
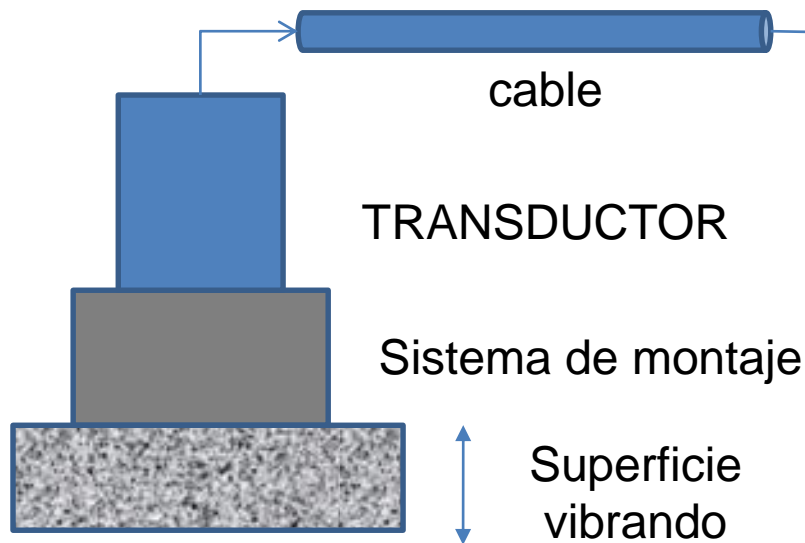
Vibrómetro monoaxial



Vibrómetro triaxial

El vibrómetro

Diagrama de bloques



El vibrómetro

Ponderación frecuencial

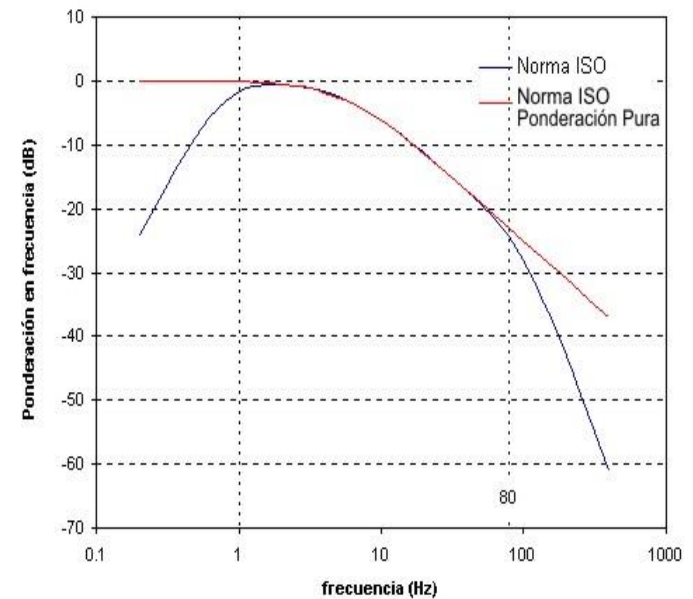


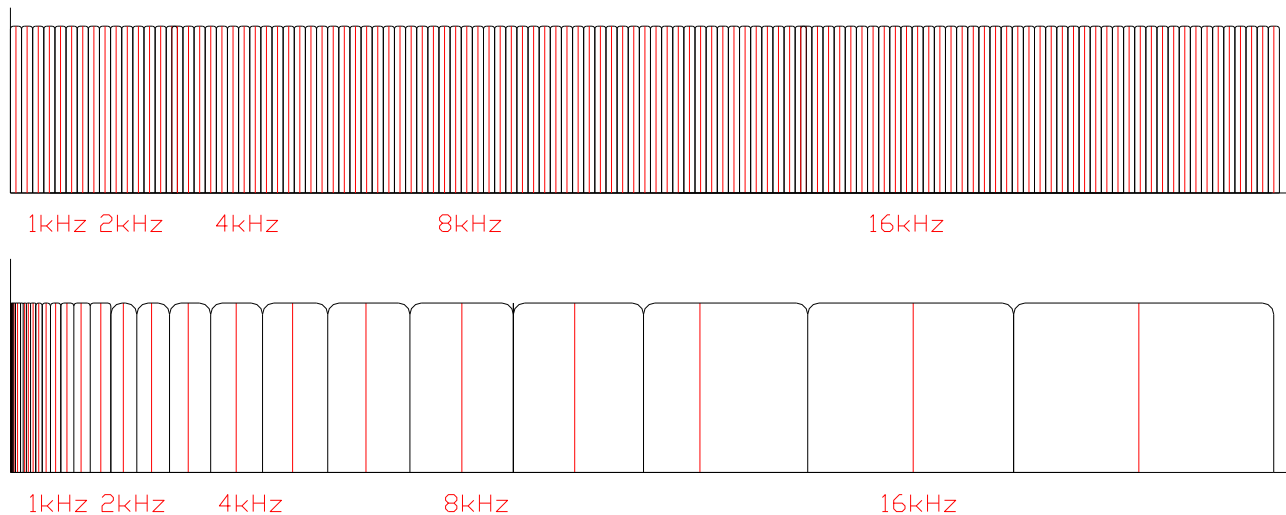
Table 1 — Guide for the application of frequency-weighting curves for principal weightings

Frequency weighting	Health (see clause 7)	Comfort (see clause 8)	Perception (see clause 8)	Motion sickness (see clause 9)
W_k	z-axis, seat surface	z-axis, seat surface z-axis, standing vertical recumbent (except head) x-, y-, z-axes, feet (sitting)	z-axis, seat surface z-axis, standing vertical recumbent (except head)	—
W_d	x-axis, seat surface y-axis, seat surface	x-axis, seat surface y-axis, seat surface x-, y-axes, standing horizontal recumbent y-, z-axes, seat-back	x-axis, seat surface y-axis, seat surface x-, y-axes, standing horizontal recumbent	—
W_t	—	—	—	vertical

El vibrómetro

Filtros de análisis frecuencial

- Filtros de ancho de banda constante
- Filtros de ancho de banda porcentual



} OCTAVE		
Lower cutoff frequency (Hz)	Center frequency (Hz)	Upper cutoff frequency (Hz)
14.1	16	17.8
17.8	20	22.4
22.4	25	28.2
28.2	31.5	35.5
35.5	40	44.7
44.7	50	56.2
56.2	63	70.8
70.8	80	89.1
89.1	100	112
112	125	141
141	160	178
178	200	224
224	250	282
282	315	355
355	400	447
447	500	562
562	630	708
708	800	891
891	1,000	1,122
1,122	1,250	1,413
1,413	1,600	1,778
1,778	2,000	2,239
2,239	2,500	2,818
2,818	3,150	3,548
3,548	4,000	4,467
4,467	5,000	5,623
5,623	6,300	7,079
7,079	8,000	8,913
8,913	10,000	11,220
11,220	12,220	14,130
14,130	16,000	17,780
17,780	20,000	22,390

El vibrómetro

Detectores

R.M.S. {

Fast

Slow

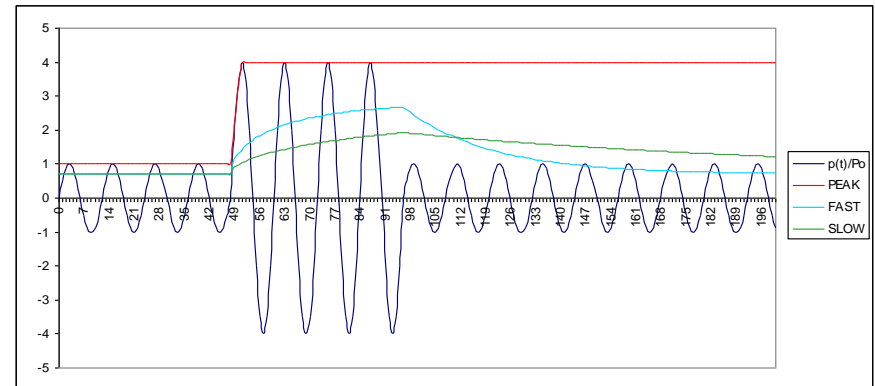
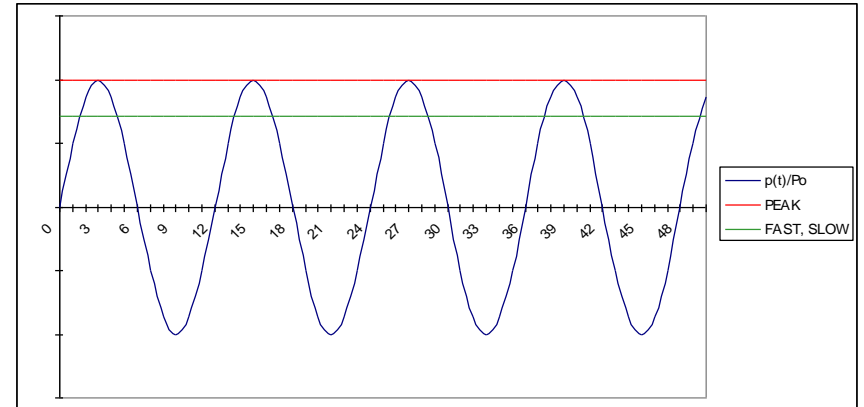
Nivel equivalente

$$a_{RMS} = \sqrt{\int_0^T a_i^2(t) dt}$$

PICO {

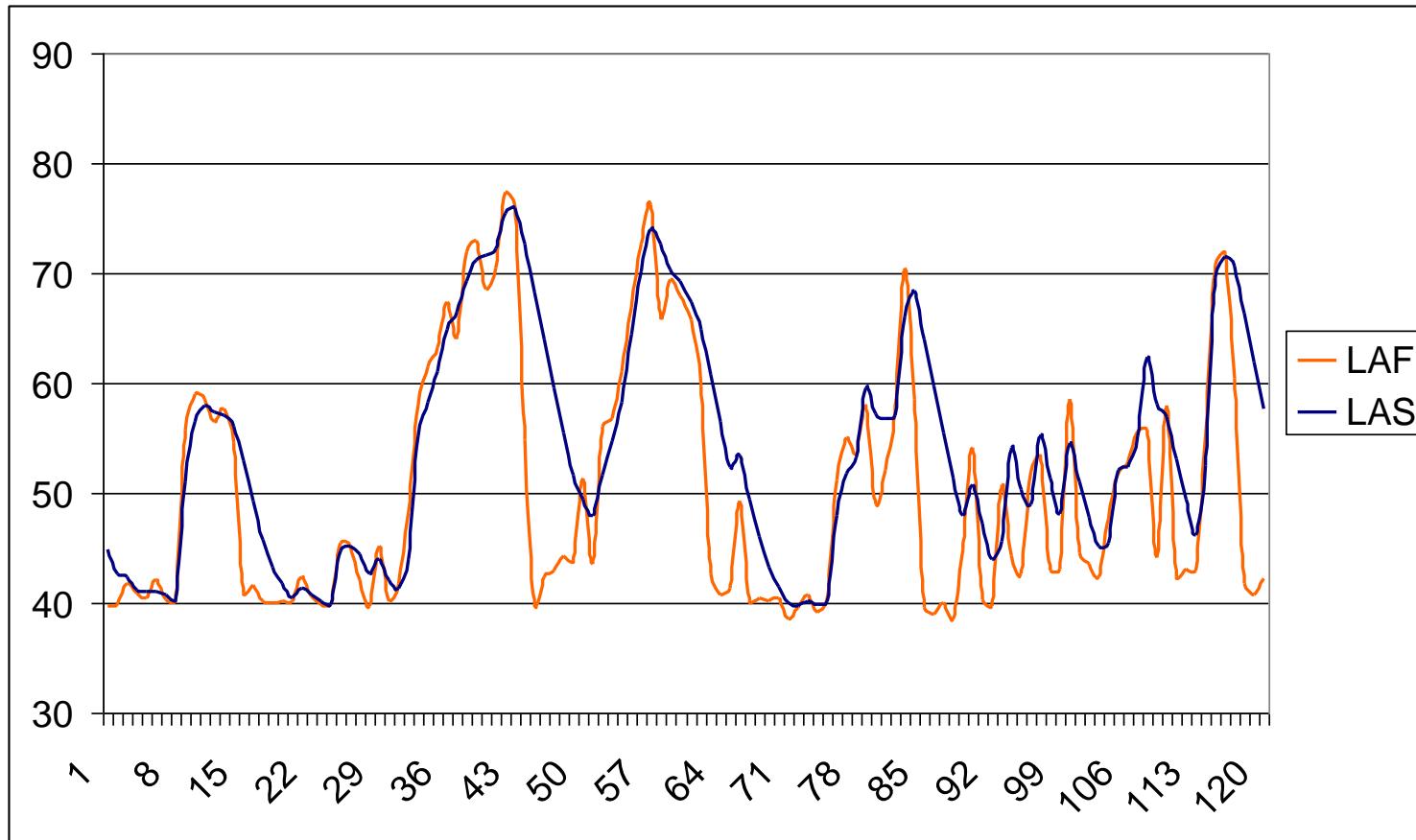
peak

$$a_{pic} = \max [|a_i(t)|]_{t=0}^{t=T}$$



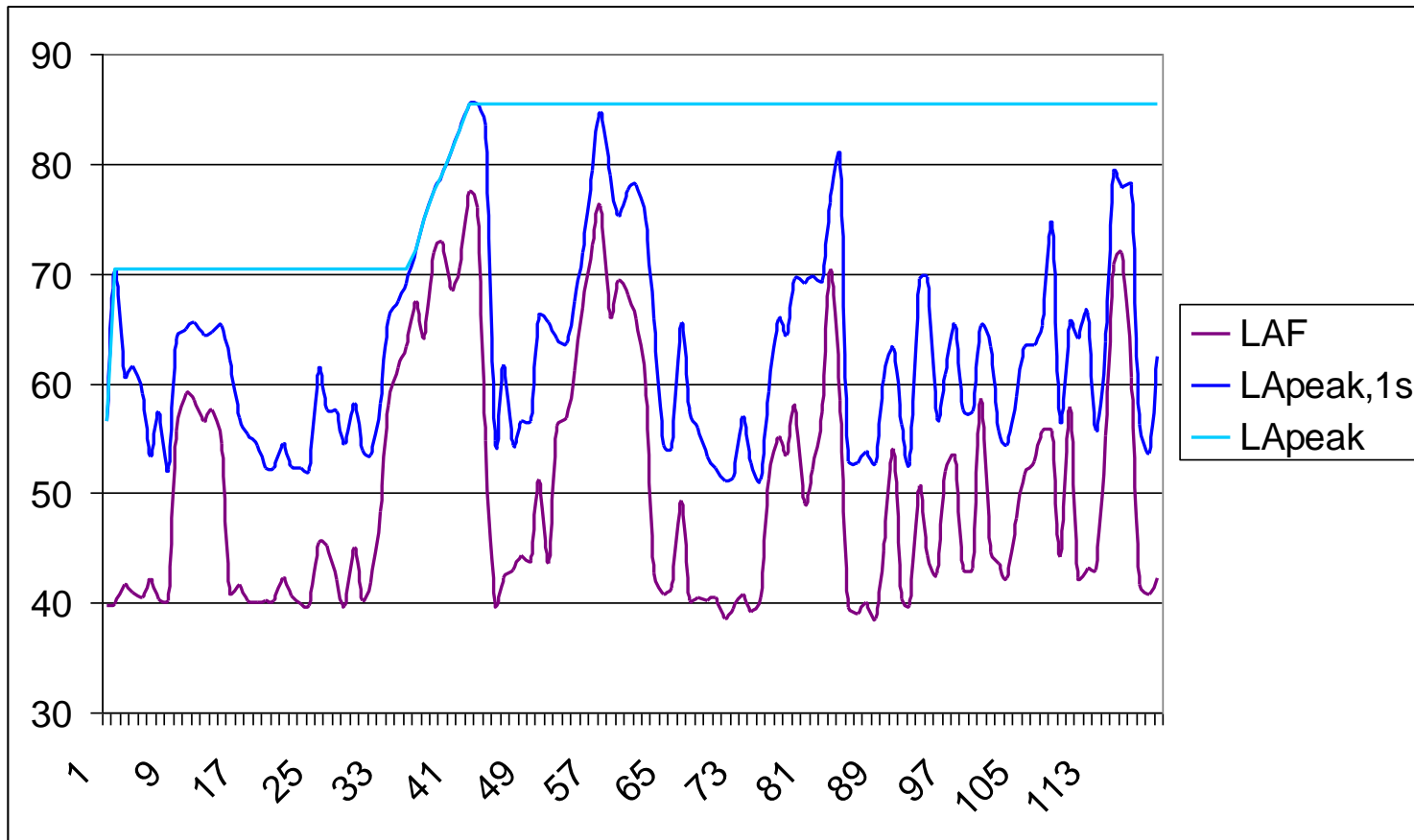
El vibrómetro

Detectores



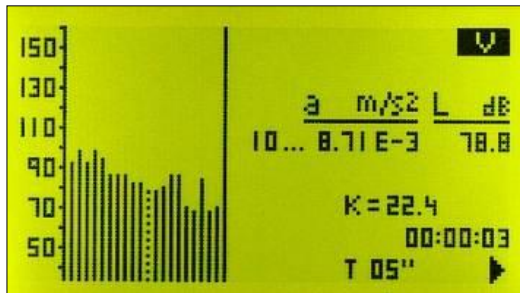
El vibrómetro

Detectores







El vibrómetro


Pantalla






	m/s²	dB
a_{wm}	1.62E-1	104.2
PEAK	9.12E-1	119.2
CF	5.62E+0	15.0
MTVV	3.55E-1	111.0
VDV 4.62E-1 m/s ^{1.75} 00:00:03		
T 05"		

				m/s² 00:00:18 	
i	w	k	a_{wi}	$A_i(8)$	$A_i(8)_p$
x	d	1.4	0.07312	0.00276	0.10236
y	d	1.4	0.19591	0.00741	0.27428
z	k	1.0	0.09787	0.00264	0.09787

	t_p hh:mm	$A(8)$	$A(8)_p$
	08:00	0.00741	0.27428

	28%	50/256	
---	-----	--------	--

 t_p		
---	---	---

i	w	k	a_{wi}	MTVV _i
x	m	1.0	91.94	104.70
y	m	1.0	92.07	104.64
z	m	1.0	92.14	104.74
		a_{mv}	MTVV	MTVV _v
		96.82	104.74	109.47
		28%	50/256	
		m/s²		

i	w	k	a_{wi}	t_p hh:mm
x	h	1.0	0.07312	08:00
y	h	1.0	0.19591	
z	h	1.0	0.09787	
		a_{hv}	$A(8)$	$A(8)_p$
		0.27428	0.10236	0.97873
		8%	5/256	
		t_p		

i	f_i Hz	v_{pki}
x	1.55	2.57566
y	1.55	1.96325
z	1.55	0.95689
		28%

El calibrador de vibraciones

Descripción

- La verificación de un vibrómetro se realiza con un calibrador de vibraciones.
- Un calibrador de vibraciones es un equipo que genera, como mínimo, una vibración estable de valor constante a una determinada frecuencia
- Un calibrador de vibraciones debe cumplir las especificaciones del ANEXO A de la norma ISO 8041
- La incertidumbre debe ser inferior al 3%
- Comprobar el peso máximo del acelerómetro que puede verificar el calibrador

Característica	Tipo de medición			
	Mano-brazo		Cuerpo-entero	Cuerpo-entero de baja-frecuencia
Frecuencia	500 rad/s \pm 0,5% (79,577 Hz)	1 000 rad/s \pm 0,5% (159,155 Hz)	100 rad/s \pm 0,5% (15,915 Hz)	2,5 rad/s \pm 0,5% ^a (0,3979 Hz)
Raíz cuadrática media de la aceleración (r.m.s.)	10 m/s ² \pm 3%	10 m/s ² \pm 3%	1 m/s ² \pm 3%	0,1 m/s ² \pm 5%

El calibrador de vibraciones

Descripción

- Valor de aceleración: $a = 10 \text{ m/s}^2 = 1 \text{ g}$
- Frecuencia de vibración:
 $f = 159,2 = 1000 / (2\pi) \rightarrow \omega = 1000 \text{ rad/s}$
 $a = 10 \text{ m/s}^2 \rightarrow L_a = 140 \text{ dB}$
 $v = 10 \text{ mm/s} \rightarrow L_v = 140 \text{ dB}$
 $x = 10 \text{ }\mu\text{m} \rightarrow L_x = 140 \text{ dB}$

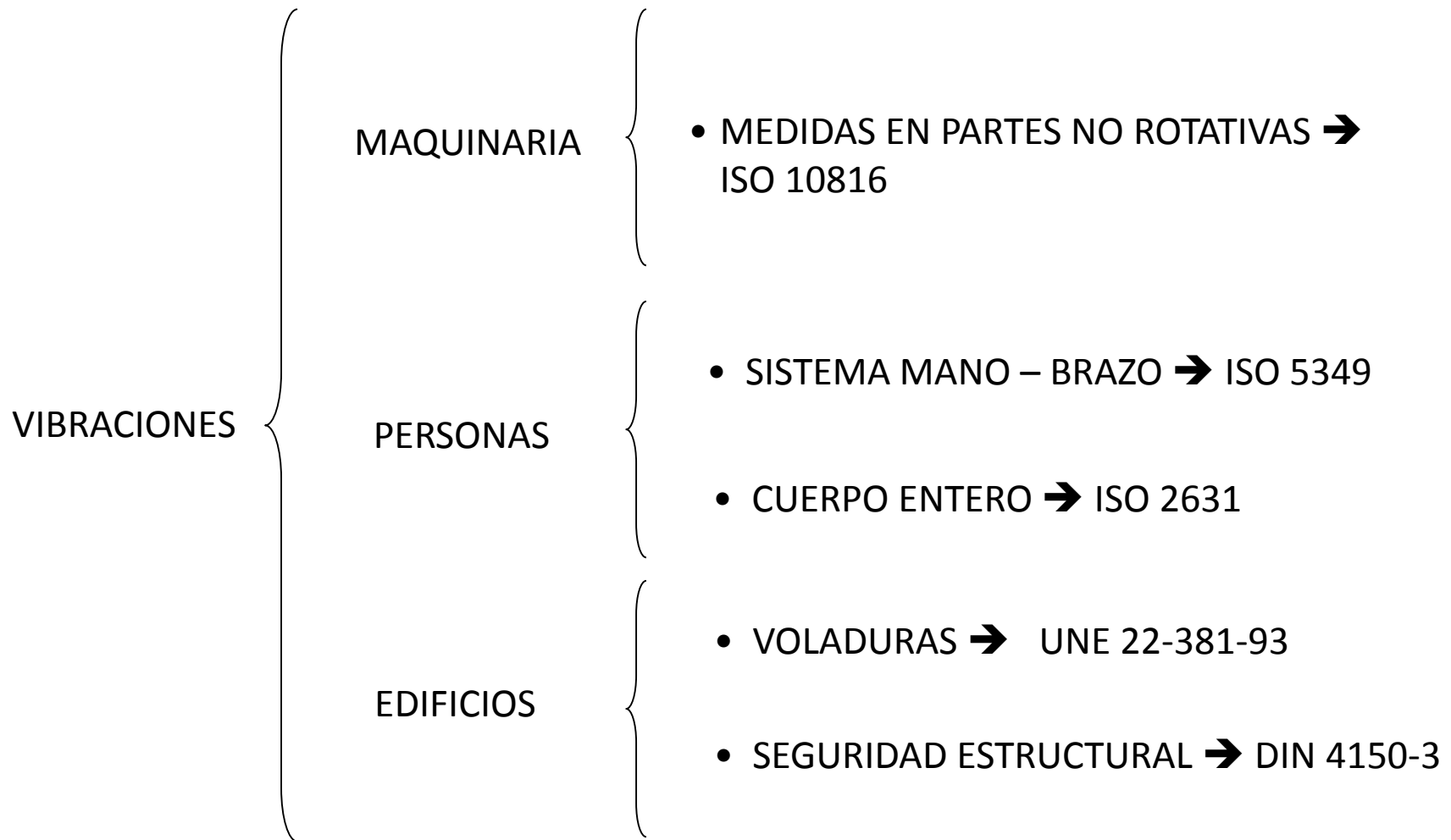


Frecuencia	10 m/s ²	10 m/s ²	1, 2, 5, 10, 20 m/s ²
Nivel	159 Hz	159 Hz	15'9, 40, 80, 159, 320, 640, 1280 Hz
Carga máxima	210 g	500 g	500 g

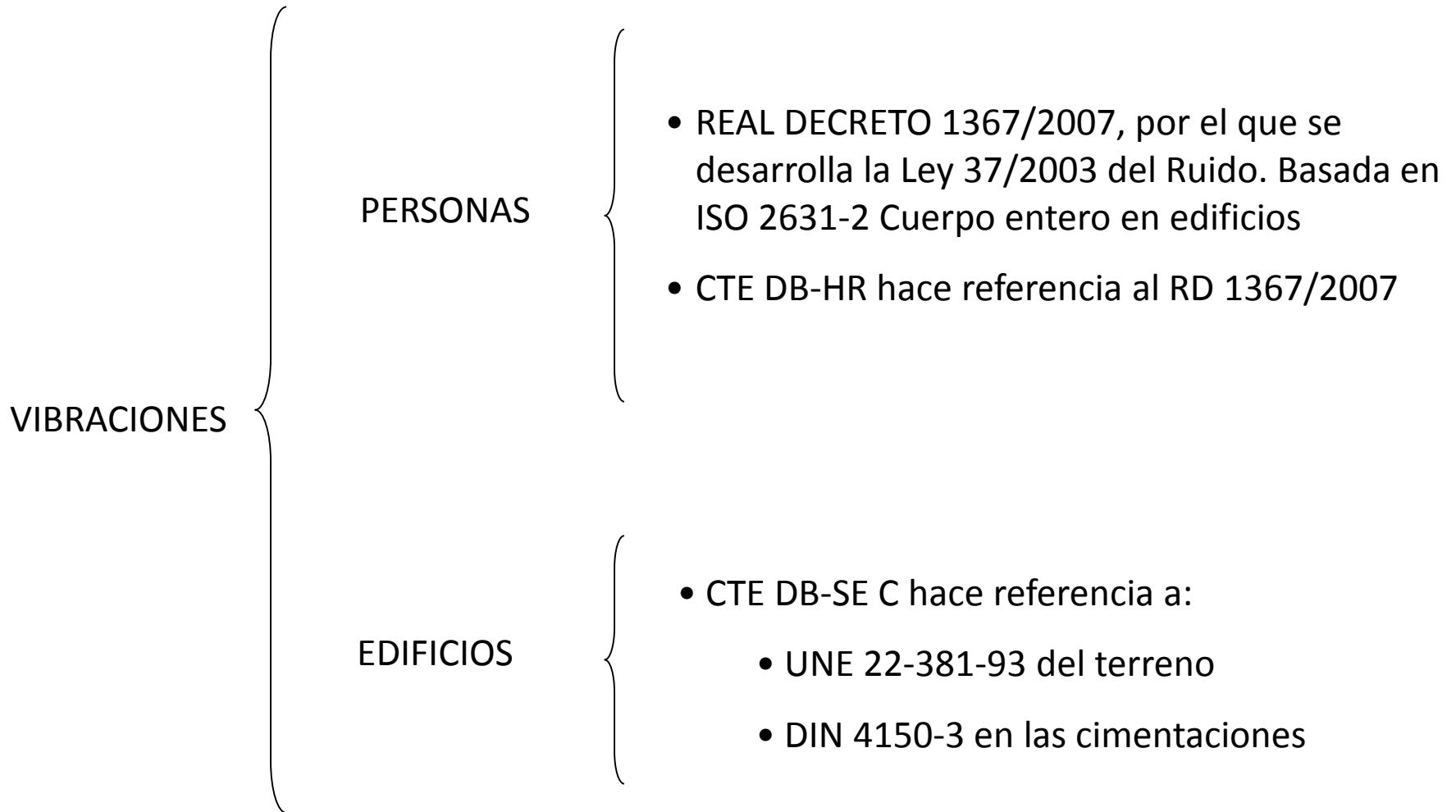
¿Por qué medir la vibración?

- Para verificar que los niveles de vibración no superan el umbral de agotamiento del material
- Para evitar resonancias en los sistemas mecánicos
- Para verificar el correcto funcionamiento de maquinaria
- Para verificar que no se superan los límites establecidos para mantener la salud de las personas expuesta ella
- Para comprobar que las personas dentro de los edificios no sufren molestias por vibraciones
- Para verificar la seguridad estructural de los edificios respecto a vibraciones de las cimentaciones
- Para verificar la seguridad estructural de los edificios respecto a vibraciones recibidas a través del terreno

Normas para la evaluación de las vibraciones



Legislación Española sobre vibraciones



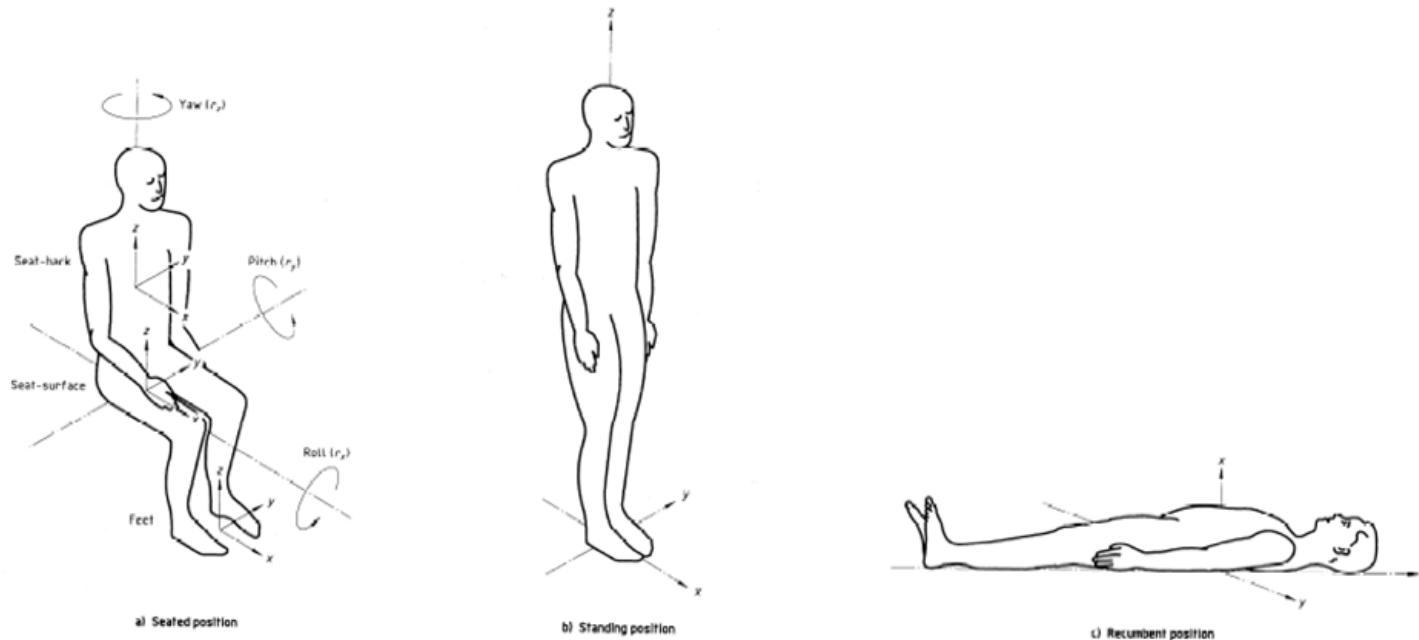
Normas para la evaluación de vibraciones en edificios

- ISO 2041 → Vibration and shock -- Vocabulary
- ISO 2631-1 → Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 1: General requirements
- ISO 2631-2 → Mechanical vibration and shock -- Evaluation of human exposure to whole-body vibration -- Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)
- UNE 22-381 → Control de vibraciones producidas por voladuras
- DIN 4150-3 → Structural vibration - Effects of vibration on structures

ISO 2631-1 Vibraciones de cuerpo entero

Generalidades

- El principal propósito de esta norma es definir métodos para cuantificar las vibraciones al cuerpo entero en relación al confort y la salud humana



ISO 2631-1 Vibraciones de cuerpo entero

Parámetros de evaluación

- Valor promedio de aceleración
- Nivel promedio de aceleración
- Valor de aceleración “running r.m.s.”
- MTVV = Maximum Transient Vibration Value
- VDV = Vibration Dose Value
- Valor de pico de aceleración
- Factor de cresta

ISO 2631-1 Vibraciones de cuerpo entero

Parámetros de evaluación

time-average weighted acceleration value

frequency-weighted r.m.s. acceleration value a_w in m/s^2 or rad/s^2 as defined by the expression:

$$a_w = \left(\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(\zeta) d\zeta \right)^{1/2}$$

where

$a_w(\zeta)$ is the translational or rotational weighted acceleration as a function of the instantaneous time, ζ , in metres per second squared (m/s^2) or radians per second squared (rad/s^2), respectively, and

T is the duration of the measurement

time-averaged weighted acceleration level

frequency-weighted r.m.s. acceleration level expressed in decibels, as defined by:

$$L_w = 20 \lg \frac{a_w}{a_0} \text{ dB}$$

where

a_0 is the reference acceleration, defined as 10^{-6} m/s^2 in ISO 1683

ISO 2631-1 Vibraciones de cuerpo entero

Parámetros de evaluación

running r.m.s. acceleration value

frequency-weighted running r.m.s. acceleration $a_{w,r}(t)$ in m/s^2 is defined by the expression

$$a_{w,r}(t) = \left(\frac{1}{\tau} \int_{t-\tau}^t a_w^2(\zeta) d\zeta \right)^{1/2}$$

where

$a_w(\zeta)$ is the frequency weighted instantaneous acceleration magnitude at time ζ , in m/s^2

τ is the integration time of the measurement

t is the observation time

Exponential averaging may be used for the running r.m.s. method, as an approximation of the linear averaging. The exponential averaging is defined as follows:

$$a_{w,r}(t) = \left(\frac{1}{\tau} \int_{-\infty}^t a_w^2(\zeta) \exp\left(\frac{\zeta-t}{\tau}\right) d\zeta \right)^{1/2}$$

Maximum Transient Vibration Value (MTVV)

maximum value of the running r.m.s. acceleration value when the integration time is equal to 1 s

ISO 2631-1 Vibraciones de cuerpo entero

Parámetros de evaluación

Vibration Dose Value (VDV)

integral of the fourth power of the weighted instantaneous acceleration $a_w(t)$ in $\text{m/s}^{1.75}$ as defined by the expression:

$$VDV = \left(\int_0^T a_w^4(t) dt \right)^{1/4}$$

where T is the duration of the measurement

NOTE The Vibration Dose Value is more sensitive to peaks than is the r.m.s. value.

peak vibration value

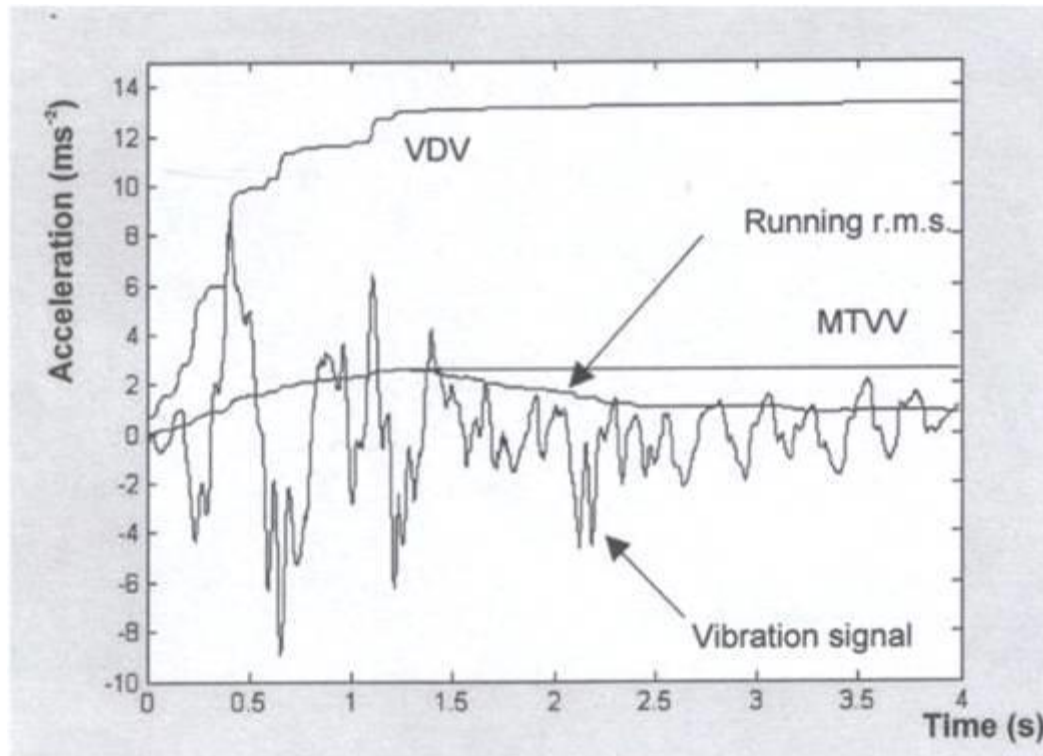
modulus of the maximum instantaneous peak value of the frequency weighted acceleration

crest factor

parameter for a measurement period, given by the peak vibration value divided by the frequency weighted acceleration value

ISO 2631-1 Vibraciones de cuerpo entero

Parámetros de evaluación



ISO 2631-1 Vibraciones de cuerpo entero

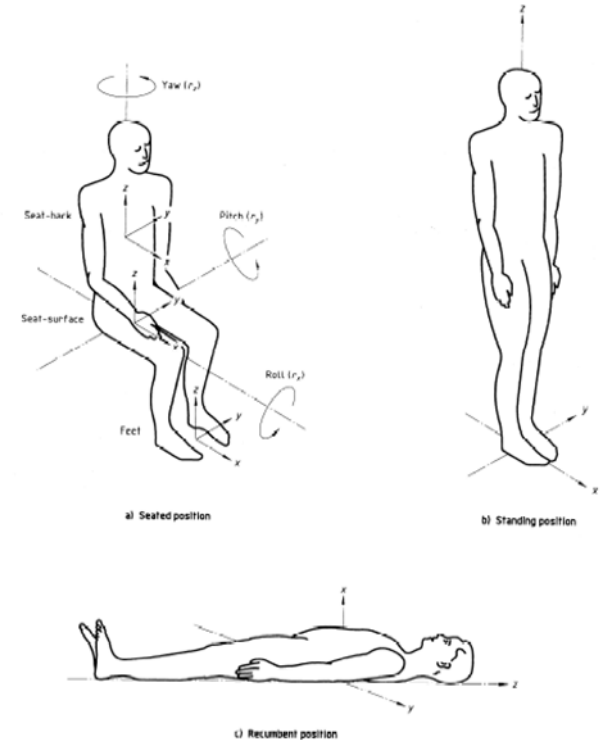
Ponderaciones frecuenciales

Table 1 — Guide for the application of frequency-weighting curves for principal weightings

Frequency weighting	Health (see clause 7)	Comfort (see clause 8)	Perception (see clause 8)	Motion sickness (see clause 9)
W_k	z-axis, seat surface	z-axis, seat surface z-axis, standing vertical recumbent (except head) x-, y-, z-axes, feet (sitting)	z-axis, seat surface z-axis, standing vertical recumbent (except head)	—
W_d	x-axis, seat surface y-axis, seat surface	x-axis, seat surface y-axis, seat surface x-, y-axes, standing horizontal recumbent y-, z-axes, seat-back	x-axis, seat surface y-axis, seat surface x-, y-axes, standing horizontal recumbent	—
W_t	—	—	—	vertical

Table 2 — Guide for the application of frequency-weighting curves for additional weighting factors

Frequency weighting	Health (see clause 7)	Comfort (see clause 8)	Perception (see clause 8)	Motion sickness (see clause 9)
W_c	x-axis, seat-back ¹⁾	x-axis, seat-back	x-axis, seat-back	—
W_o	—	r_x -, r_y -, r_z -axes, seat surface	r_x -, r_y -, r_z -axes, seat surface	—
W_l	—	vertical recumbent (head) ²⁾	vertical recumbent (head) ²⁾	—



ISO 2631-1 Vibraciones de cuerpo entero

Evaluación

■ Método básico de evaluación:

- Medición del valor de aceleración RMS ponderado durante un periodo T suficiente para caracterizar la vibración (no inferior a 1 minuto)
- Valoración de la idoneidad de la medición con el factor de cresta CF ($CF \leq 9$)

■ Método adicional de evaluación ($CF > 9$):

- El método básico infravalora los efectos de vibraciones transitorias y golpes
- Medición de los parámetros MTVV o VDV

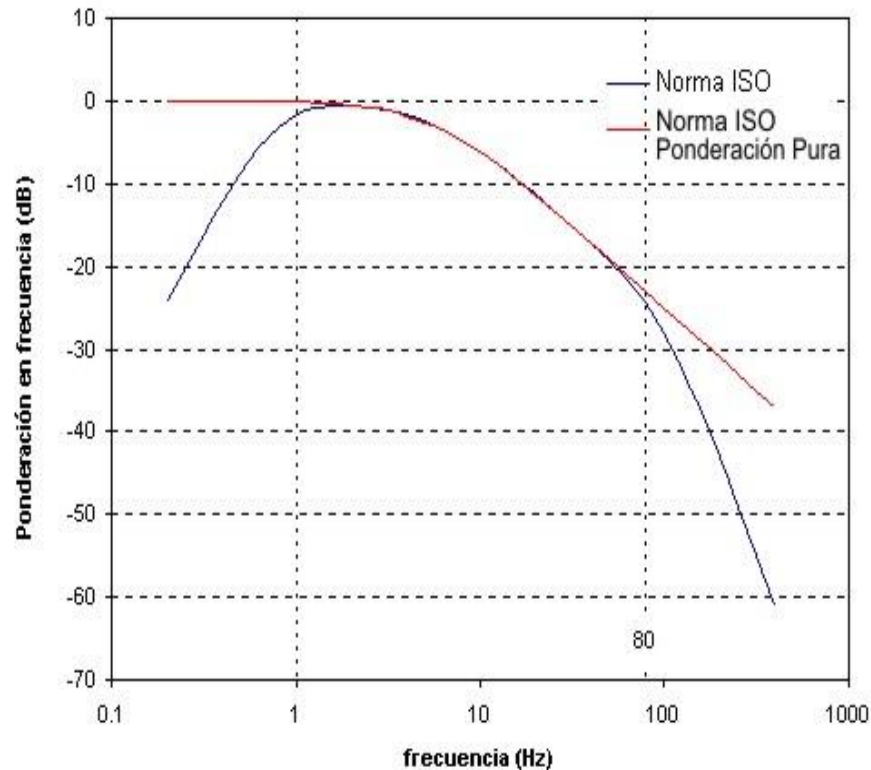
ISO 2631-2 Vibraciones de cuerpo entero en edificios 1 a 80 Hz

Generalidades

- ISO 2631-2:2003 trata de la exposición humana al cuerpo entero a las vibraciones y golpes en edificios con respecto al confort y la molestia de sus ocupantes. Especifica un método para su medición y evaluación. Define la ponderación frecuencial W_m que se aplica al margen frecuencial de 1 Hz a 80 Hz con la que la postura del ocupante no necesita ser definida.
- ISO 2631-2 no proporciona criterios para valorar daños estructurales en los edificios. Así pues, no es aplicable para la valoración de la seguridad en edificios..
- Magnitudes para la valoración de las vibraciones se especifican en la norma ISO 2631-1.

ISO 2631-2 Vibraciones de cuerpo entero en edificios 1 a 80 Hz

Ponderación frecuencial W_m



ISO 2631-2 Vibraciones de cuerpo entero en edificios 1 a 80 Hz

Medición de MTVV ISO 2631-2:2003

- **Con instrumentos con ponderación W_m :** Lectura directa
- **Con instrumentos sin ponderación W_m :**
 - Procedimiento no valido cuando se miden vibraciones transitorias
 - Realizar un análisis espectral, con resolución mínima de banda de 1/3 de octava de acuerdo con la metodología que se indica a continuación.
 - El análisis consiste en obtener la evolución temporal de los valores eficaces de la aceleración con un detector de media exponencial de constante de tiempo 1s (slow) para cada una de las bandas de tercio de octava especificadas la normativa ISO 2631-2:2003 (1 a 80 Hz) y con una periodicidad de cómo mínimo un segundo para toda la duración de la medición.
 - A continuación se multiplicará cada uno de los espectros obtenidos por el valor de la ponderación frecuencial W_m (ISO 2631-2:2003)

ISO 2631-2 Vibraciones de cuerpo entero en edificios 1 a 80 Hz

Medición de MTVV ISO 2631-2:2003

■ Con instrumentos sin ponderación Wm:

- Seguidamente se obtendrán los valores de aceleración global ponderada para los distintos instantes de tiempo (para cada espectro) mediante la siguiente fórmula:

$$a_{w,i} = \sqrt{\sum_j (w_{m,j} a_{w,i,j})^2}$$

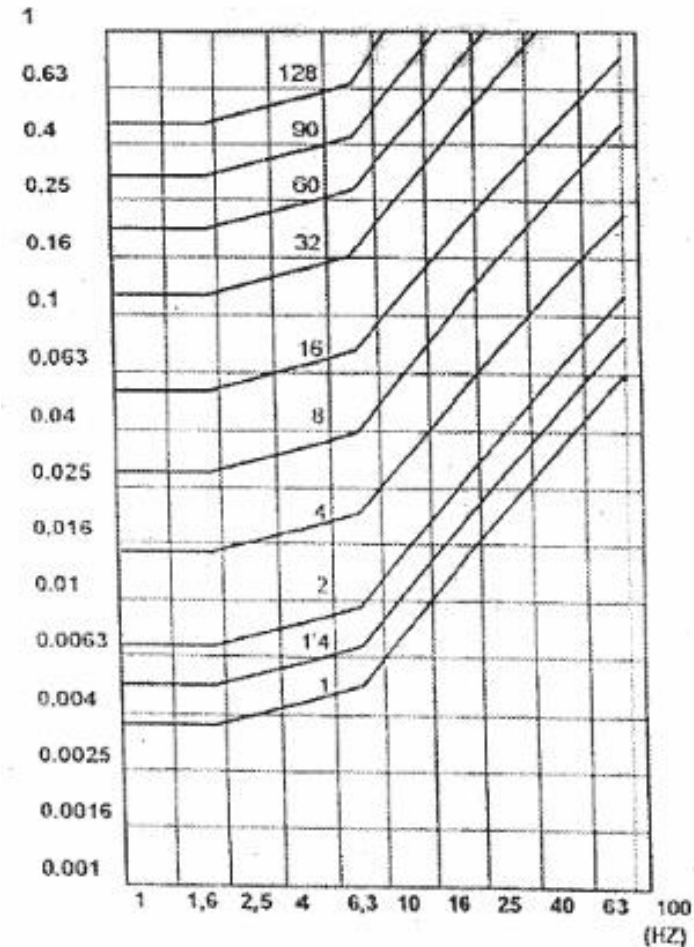
- Finalmente, para encontrar el valor de a_w (MTVV) debe escogerse el valor máximo de las distintas aceleraciones globales ponderadas, para los distintos instantes de medición

$$a_w = \max \{ a_{w,i} \}_i$$

ISO 2631-2 Vibraciones de cuerpo entero en edificios 1 a 80 Hz

Medición del factor k ISO 2631-2:1989

- Medición del espectro de la vibración considerada en bandas de tercio de octava (entre 1 y 80 Hz) y determinación posterior de la curva límite mínima que contiene dicho espectro. A estos efectos se utilizará el siguiente diagrama.



EJEMPLO DE ORDENANZA MUNICIPAL (ISO 2631-2:1989)

1. Las medidas de vibraciones se realizarán midiendo aceleraciones (m/s^2) en el margen de frecuencias 1 a 80 Hz.
2. Para asegurar una medición correcta, además de las especificaciones establecidas por el fabricante de la instrumentación, se tendrán en cuenta las siguientes consideraciones:
 1. Elección de la ubicación del acelerómetro: El acelerómetro se debe colocar de forma que la dirección de medida deseada coincida con la de su máxima sensibilidad (generalmente en la dirección de su eje principal). Se buscará una ubicación del acelerómetro de manera que las vibraciones de la fuente le lleguen al punto de medida por el camino mas directo posible (normalmente en dirección axial al mismo).
 2. Colocación del acelerómetro: El acelerómetro se debe colocar de forma que la unión con la superficie de vibración sea lo mas rígida posible. El montaje ideal es mediante un vástago roscado que se embute en el punto de medida. La colocación de una capa delgada de grasa en la superficie de montaje, antes de fijar el acelerómetro, mejora de ordinario la rigidez del conjunto. Se admite el sistema de colocación consistente en el pegado del acelerómetro al punto de medida mediante una delgada capa de cera de abejas. Se admite asimismo, un imán permanente como método de fijación cuando el punto de medida esta sobre superficie magnética plana.

EJEMPLO DE ORDENANZA MUNICIPAL (ISO 2631-2:1989)

3. Influencia de ruido en los cables: Se ha de evitar el movimiento del cable de conexión del acelerómetro al analizador de frecuencias, así como los efectos de doble pantalla en dicho cable de conexión producida por proximidad a campos electromagnéticos.
3. Todas las consideraciones que el responsable de la medición haya tenido en cuenta en la realización de la misma se harán constar en el informe.
4. La determinación del nivel de vibración se realizará de acuerdo con lo establecido en la norma ISO-2631-2, ó en aquélla que la sustituya.

La magnitud determinante de la vibración será su aceleración eficaz (r. m. s.) en m/s^2 medida sobre un eje y corregida mediante la aplicación de la ponderación combinada sobre los tres ejes.

EJEMPLO DE ORDENANZA MUNICIPAL (ISO 2631-2:1989)

5. Para cuantificar la intensidad de la vibración se utilizará cualquiera de los procedimientos que se indican en los apartados siguientes.
 1. Determinación por lectura directa del factor K correspondiente a la vibración considerada.
 2. Medición del espectro de la vibración considerada en bandas de tercio de octava (entre 1 y 80 Hz) y determinación posterior de la curva límite mínima que contiene dicho espectro. A estos efectos se utilizará el diagrama del Anexo II.
6. En el informe de la medición se consignarán, además, los datos siguientes
 - Croquis acotado sobre la situación del acelerómetro.
 - Vibración de fondo una vez paralizada la fuente generadora de las vibraciones.

R.D. 1367/2007, por el que se desarrolla la Ley del Ruido, zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas

B. Métodos de evaluación para el índice de vibraciones.

1. Métodos de medición de vibraciones.

Los métodos de medición recomendados para la evaluación del índice de vibración L_{aw} son los siguientes:

a) *Con instrumentos con la ponderación frecuencial w_m .*

Este método se utilizará para evaluaciones de precisión y requiere de un instrumento que disponga de ponderación frecuencial w_m , de conformidad con la definición de la norma ISO 2631-2:2003.

Se medirá el valor eficaz máximo obtenido con un detector de media exponencial de constante de tiempo 1s (slow) durante la medición. Este valor corresponderá al parámetro a_w , Maximum Transient Vibration Value, (MTVV), según se recoge en la norma ISO 2631-1:1997.

b) *Método numérico para la obtención del indicador L_{aw}*

Cuando los instrumentos de medición no posean ponderación frecuencial y/o detector de media exponencial, o como alternativa a los procedimientos descritos en los apartados a) y c), se podrá recurrir a la grabación de la señal sin ponderación y posterior tratamiento de los datos de conformidad con las normas ISO descritas en el apartado a).

c) *Calculando la ponderación frecuencial w_m .*

Teniendo en cuenta que este procedimiento no es adecuado cuando se miden vibraciones transitorias (*a causa de la respuesta lenta de los filtros de tercio octava de más baja frecuencia (108 s) respecto a la respuesta "slow"*) su uso queda limitado a vibraciones de tipo estacionario.

Cuando los instrumentos no dispongan de la ponderación frecuencial w_m se podrá realizar un análisis espectral, con resolución mínima de banda de tercio de octava de acuerdo con la metodología que se indica a continuación.

El análisis consiste en obtener la evolución temporal de los valores eficaces de la aceleración con un detector de media exponencial de constante de tiempo 1s (slow) para cada una de las bandas de tercio de octava especificadas en la norma ISO 2631-2:2003 (1 a 80 Hz) y con una periodicidad de cómo mínimo un segundo para toda la duración de la medición.

R.D. 1367/2007, por el que se desarrolla la Ley del Ruido, zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas

A continuación se multiplicará cada uno de los espectros obtenidos por el valor de la ponderación frecuencial w_m (ISO 2631-2:2003)

En la siguiente tabla se detallan los valores de la ponderación w_m (ISO 2631-2:2003) para las frecuencias centrales de las bandas de tercio de octava de 1 Hz a 80 Hz.

Frecuencia	w_m	
	factor	dB
Hz		
1	0,833	-1,59
1,25	0,907	-0,85
1,6	0,934	-0,59
2	0,932	-0,61
2,5	0,910	-0,82

Frecuencia	w_m	
	factor	dB
Hz		
3,15	0,872	-1,19
4	0,818	-1,74
5	0,750	-2,50
6,3	0,669	-3,49
8	0,582	-4,70
10	0,494	-6,12
12,5	0,411	-7,71
16	0,337	-9,44
20	0,274	-11,25
25	0,220	-13,14
31,5	0,176	-15,09
40	0,140	-17,10
50	0,109	-19,23
63	0,0834	-21,58
80	0,0604	-24,38

R.D. 1367/2007, por el que se desarrolla la Ley del Ruido, zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas

Seguidamente se obtendrán los valores de aceleración global ponderada para los distintos instantes de tiempo (para cada espectro) mediante la siguiente fórmula:

$$a_{w,i} = \sqrt{\sum_j (w_{m,j} a_{w,i,j})^2}$$

Donde:

- $a_{w,i,j}$: el valor eficaz (RMS, slow) de la señal de aceleración expresado en m/s^2 , para cada una de las bandas de tercio de octava (j) y para los distintos instantes de la medición (i).
- $w_{m,j}$: el valor de la ponderación frecuencial w_m para cada una de las bandas de tercio de octava (j).
- $a_{w,i}$: el valor eficaz (RMS, slow) de la señal de aceleración global ponderada para los distintos instantes de la medición.

Finalmente, para encontrar el valor de a_w (MTVV) debe escogerse el valor máximo de las distintas aceleraciones globales ponderadas, para los distintos instantes de medición

$$a_w = \max \{ a_{w,i} \}_i$$

R.D. 1367/2007, por el que se desarrolla la Ley del Ruido, zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas

2. Procedimientos de medición de vibraciones.

Los procedimientos de medición in situ utilizados para la evaluación del índice de vibración que establece este real decreto se adecuarán a las prescripciones siguientes:

a) Previamente a la realización de las mediciones es preciso identificar los posibles focos de vibración, las direcciones dominantes y sus características temporales.

b) Las mediciones se realizarán sobre el suelo en el lugar y momento de mayor molestia y en la dirección dominante de la vibración si esta existe y es claramente identificable. Si la dirección dominante no está definida se medirá en tres direcciones ortogonales simultáneamente, obteniendo el valor eficaz $a_{w,i}(t)$ en cada una de ellas y el índice de evaluación como suma cuadrática, en el tiempo t , aplicando la expresión:

$$a_w(t) = \sqrt{a_{w,x}^2(t) + a_{w,y}^2(t) + a_{w,z}^2(t)}$$

c) Para la medición de vibraciones generadas por actividades, se distinguirá entre vibraciones de tipo estacionario o transitorio.

i) Tipo estacionario: se deberá realizar la medición al menos en un minuto en el periodo de tiempo en el que se establezca el régimen de funcionamiento más desfavorable; si este no es identificable se medirá al menos un minuto para los distintos regímenes de funcionamiento.

ii) Tipo transitorio: se deberán tener en cuenta los posibles escenarios diferentes que puedan modificar la percepción de la vibración (foco, intensidad, posición, etc.). A efectos de la aplicación de los criterios señalados en el

R.D. 1367/2007, por el que se desarrolla la Ley del Ruido, zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas

artículo 17, apartado 1.b), en la medición se deberá distinguir entre los periodos diurno y nocturno, contabilizando el número de eventos máximo esperable.

d) En la medición de vibraciones generadas por las infraestructuras igualmente se deberá distinguir entre las de carácter estacionario y transitorio. A tal efecto el tráfico rodado en vías de elevada circulación puede considerarse estacionario.

i) Tipo estacionario: se deberá realizar la medición al menos en cinco minutos dentro del periodo de tiempo de mayor intensidad (principalmente de vehículos pesados) de circulación. En caso de desconocerse datos del tráfico de la vía se realizarán mediciones durante un día completo evaluando el valor eficaz a_{wL} .

ii) Tipo transitorio: se deberán tener en cuenta los posibles escenarios diferentes que puedan modificar la percepción de la vibración (p.e: en el caso de los trenes se tendrá en cuenta los diferentes tipos de vehículos por cada vía y su velocidad si la diferencia es apreciable). A efectos de la aplicación de los criterios señalados en el artículo 17, apartado 1.b), en la medición se deberá distinguir entre los periodos diurno y nocturno, contabilizando el número de eventos máximo esperable.

e) De tratarse de episodios reiterativos, se realizará la medición al menos tres veces, dándose como resultado el valor más alto de los obtenidos; si se repite la medición con seis o más eventos se permite caracterizar la vibración por el valor medio más una desviación típica.

f) En la medición de la vibración producida por un emisor acústico a efectos de comprobar el cumplimiento de lo estipulado en el artículo 26 se procederá a la corrección de la medida por la vibración de fondo (vibración con el emisor parado).

g) Será preceptivo que antes y después de cada medición, se realice una verificación de la cadena de medición con un calibrador de vibraciones, que garantice su buen funcionamiento.

GENERALITAT DE CATALUÑA. Decreto 176/2009, Reglamento de la Ley 16/2002, de protección contra la contaminación acústica

ANEXO 7

Inmisión de las vibraciones en los interiores de los edificios

1. *Ámbito de aplicación*

Este anexo es de aplicación a las vibraciones que se perciben en el espacio interior de las edificaciones destinadas a vivienda o usos residenciales, hospitalarios, educativos o culturales.

2. *Valores límite de inmisión*

Uso del edificio	Valores límite de inmisión L_{aw}
Vivienda o uso residencial	75
Hospitalario	72
Educativo o cultural	72

GENERALITAT DE CATALUÑA. Decreto 176/2009, Reglamento de la Ley 16/2002, de protección contra la contaminación acústica

3. *Cumplimiento*

Se considera que se respetan los valores límite de inmisión de vibraciones establecidos en este anexo cuando los niveles de evaluación cumplen lo siguiente:

a) Vibraciones estacionarias

Los niveles de evaluación no superan los valores límite de la tabla de este anexo.

b) Vibraciones transitorias

Los valores límite de la tabla de este anexo pueden superarse para un número de acontecimientos determinado de conformidad con el procedimiento siguiente:

- Se consideran los dos periodos de evaluación siguientes: periodo diurno comprendido entre las 07:00-23:00 horas y periodo nocturno comprendido entre las 23:00-07:00 horas.

- En el periodo nocturno no se permite ningún exceso.

- En ningún caso se permiten excesos superiores a 5 dB.

- El conjunto de superaciones no debe ser mayor de 9. A tales efectos, cada acontecimiento cuyo exceso no supere los 3 dB debe ser contabilizado como 1, y si los supera como 3.

GENERALITAT DE CATALUÑA. Decreto 176/2009, Reglamento de la Ley 16/2002, de protección contra la contaminación acústica

4. *Determinación de los niveles de inmisión*

Los niveles de inmisión se pueden determinar mediante métodos de cálculo o medición.

1. Determinación mediante mediciones

Para la medición, se debe distinguir entre vibraciones generadas por actividades o por infraestructuras y vibraciones estacionarias o transitorias.

a) Vibraciones generadas por actividades

- Tipo estacionario: se debe realizar la medición de una duración mínima de dos minutos mientras la actividad está en régimen normal de funcionamiento, y debe ser representativa de la fuente que se evalúa.

- Tipo transitorio: se debe realizar la medición en función del escenario. La medición debe distinguir entre periodos diurnos y nocturnos, y contabilizar el número de acontecimientos de acuerdo con el apartado 3.b.

b) Vibraciones generadas por infraestructuras

- Tipo estacionario: las vibraciones generadas por vías de tráfico de elevada circulación pueden considerarse estacionarias. Se debe realizar la medición de una duración mínima de 5 minutos durante el periodo de mayor intensidad de circulación.

- Tipo transitorio: se debe realizar la medición en función del escenario. La medición debe distinguir entre periodos diurnos y nocturnos, y contabilizar el número de acontecimientos como consta en el apartado 3.b.

GENERALITAT DE CATALUÑA. Decreto 176/2009, Reglamento de la Ley 16/2002, de protección contra la contaminación acústica

2. Las condiciones de medición son las siguientes:

a) El nivel de inmisión de las vibraciones se mide en las edificaciones situando el acelerómetro en el suelo o en los forjados, en función de donde se detecte un nivel de vibración más alto (normalmente en el centro de la superficie), en las dependencias de uso sensible a las vibraciones (dormitorios, salas de estar, comedores, aulas escolares u otras dependencias asimilables).

b) Si la dirección dominante de la vibración no está definida, se debe medir en los tres ejes ortogonales (x,y,z) simultáneamente.

c) Antes y después de las mediciones, se debe realizar una verificación acústica de la cadena de medición mediante calibrador de vibraciones que garantice un margen de desviación no superior a 0,5 dB respecto al valor de referencia inicial.

5. Evaluación

1. Determinación del nivel de evaluación L_{aw}

Los métodos recomendados para la evaluación del índice de vibración L_{aw} son los siguientes:

a) Con instrumentos con la ponderación frecuencial w_m

Este método se utilizará para evaluaciones de precisión y requiere de un instrumento que disponga de ponderación frecuencial w_m , según establece la norma ISO 2631-2:2003.

Se determina el valor máximo del valor eficaz del nivel de aceleración en el intervalo de medición. El valor eficaz se obtiene con un detector de media exponencial de constante de tiempo 1 s. Este valor corresponde al parámetro a_w , *Maximum Transient Vibration Value (MTVV)*.

GENERALITAT DE CATALUÑA. Decreto 176/2009, Reglamento de la Ley 16/2002, de protección contra la contaminación acústica

b) Método numérico para la obtención del indicador L_{aw}

Cuando los instrumentos de medición no dispongan de ponderación frecuencial y/o detector de media exponencial, o como alternativa a los apartados a y c, se podrá utilizar la grabación de la señal sin ponderación y el tratamiento posteriormente de los datos obtenidos según establece la norma ISO 2631-2:2003.

c) Cálculo de la ponderación frecuencial w_m

Este procedimiento no es adecuado cuando se trata de vibraciones transitorias; por lo tanto, este método queda limitado a vibraciones de tipo estacionario.

El nivel de evaluación se determina mediante la medición del valor eficaz del nivel de aceleración, ponderado en frecuencia, entre las frecuencias de 1 a 80 Hz, durante un periodo de tiempo representativo del funcionamiento de la fuente de vibración que se evalúa.

Se determina el valor máximo del valor eficaz del nivel de aceleración en el intervalo de medición.

El valor eficaz se obtiene con un detector de media exponencial de constante de tiempo 1 s.

El factor de ponderación w_m para las frecuencias centrales de las bandas de 1/3 de octava se detalla en la tabla siguiente:

GENERALITAT DE CATALUÑA. Decreto 176/2009, Reglamento de la Ley 16/2002, de protección contra la contaminación acústica

Frecuencia			Frecuencia		
w_m			w_m		
Hz	factor	dB	Hz	factor	dB
1	0,833	-1,59	10	0,494	-6,12
1,25	0,907	-0,85	12,5	0,411	-7,71
1,6	0,934	-0,59	16	0,337	-9,44
2	0,932	-0,61	20	0,274	-11,25
2,5	0,910	-0,82	25	0,220	-13,14
3,15	0,872	-1,19	31,5	0,176	-15,09
4	0,818	-1,74	40	0,140	-17,10
5	0,750	-2,50	50	0,109	-19,23
6,3	0,669	-3,49	63	0,0834	-21,58
8	0,582	-4,70	80	0,0604	-24,38

La ponderación en frecuencia se efectúa multiplicando el nivel de aceleración en cada 1/3 de octava por el factor de ponderación. Se obtiene así el nivel de aceleración a_{wp} para cada 1/3 de octava. A continuación, se suman cuadráticamente las a_{wp} para obtener el valor máximo del valor eficaz del nivel de aceleración a_w , *Maximum Transient Vibration Value (MTVV)*.

GENERALITAT DE CATALUÑA. Decreto 176/2009, Reglamento de la Ley 16/2002, de protección contra la contaminación acústica

En las vibraciones generadas por infraestructuras, cuando la dirección dominante de la vibración no está definida, el valor máximo del valor eficaz del nivel de aceleración a_w se calculará como la suma cuadrática, en el tiempo t , según la expresión:

$$a_w(t) = \sqrt{a_{w,x}^2(t) + a_{w,y}^2(t) + a_{w,z}^2(t)}$$

El nivel de evaluación L_{aw} se calcula a partir de las mediciones y su ponderación mediante la expresión siguiente:

$$L_{aw} = 20 \log \frac{a_w}{a_0}$$

donde:

a_w es el valor máximo del valor eficaz del nivel de aceleración, suma cuadrática de todos los componentes frecuenciales de 1 a 80 Hz, expresado en m/s² y ponderado en frecuencia;

a_0 es la aceleración de referencia ($a_0 = 10^{-6}$ m/s²).

GENERALITAT DE CATALUÑA. Decreto 176/2009, Reglamento de la Ley 16/2002, de protección contra la contaminación acústica

a_0 es la aceleración de referencia ($a_0 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$).

2. Nivel de vibración residual

a) Se entiende por vibración residual de un entorno determinado el nivel de vibración sin la contribución de la fuente o las fuentes a evaluar.

b) Si el nivel de vibración de un entorno, incluyendo la fuente o las fuentes a evaluar, es superior a 10 dB respecto al nivel de vibración residual, no se debe efectuar ninguna corrección.

Si la diferencia es de entre 3 y 10 dB, hay que sustraer el nivel de vibración residual según la expresión:

$$10 \log \left(10^{L_{aw}/10} - 10^{L_{aw,resid}/10} \right)$$

donde:

L_{aw} es el nivel de evaluación;

$L_{aw,resid}$ es el nivel de la vibración residual.

Si la diferencia es de menos de 3 dB, no se puede aplicar esta corrección. Se debe repetir la medición en un momento en que sea posible incrementar dicha diferencia.

Documento Básico SE-C Seguridad estructural Cimientos

- 11 Para las vibraciones previstas de corta duración se comprobará que los valores máximos de los componentes del vector velocidad del terreno y cimentación quedan por debajo de los valores establecidos en las tablas 2.4 y 2.5.
- 12 Para vibraciones estacionarias se comprobará que las vibraciones horizontales medidas en el piso más alto sean inferiores a 5 mm/s, y las verticales medidas en el centro de los forjados o techos permanezcan por debajo de 10 mm/s.

Documento Básico SE-C Seguridad estructural Cimientos

Tabla 2.4. Valores de referencia para el valor pico de la vibración del terreno en su mayor componente frente a vibraciones de corta duración (UNE 22-381-93)

Clase de edificio	Frecuencia principal (Hz)		
	2-15	15-75	>75
	Velocidad [mm/s]	Desplazamiento ⁽¹⁾ [mm]	Velocidad [mm/s]
Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas.	20	0,212	100
Edificios de viviendas y otros similares en su construcción y/o en su utilización.	9	0,095	45
Edificios especialmente sensibles a las vibraciones.	4	0,042	20

⁽¹⁾ En los tramos de frecuencias comprendidas entre 15 y 75 Hz se podrá calcular la velocidad equivalente conociendo la frecuencia principal a través de la ecuación:

$$v = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot d$$

siendo

v la velocidad de vibración equivalente en mm/s

f la frecuencia principal en Hz

d el desplazamiento admisible en mm indicado en la tabla

Documento Básico SE-C Seguridad estructural Cimientos

Tabla 2.5. Valores de referencia para la velocidad de vibración (mm/s) de las cimentaciones frente a vibraciones de corta duración

Clase de edificio	Cimientos			Nivel del techo del piso mas alto habitable	Forjados o Techos
	Valor máximo de las 3 componentes del vector velocidad			Vibraciones horizontales en dos direcciones	Vibración vertical en el centro
	Frecuencias			Todas las frecuencias	Todas las frecuencias
	< 10 Hz	10 a 15 Hz	50 a 100 ⁽¹⁾ Hz		
Edificios utilizados para actividades industriales y edificios industriales	20	20 a 40	40 a 50	40	
Edificios de viviendas y otros similares en su construcción y/o su utilización. Edificios con enlucidos	5	5 a 15	15 a 20	15	20
Edificios especialmente sensibles a las vibraciones	3	3 a 8	8 a 10	8	

(1) Para frecuencias superiores a 100 Hz se deben aplicar, como mínimo, los valores de referencia para 100 Hz

Bibliografia

- “Piezoelectric Accelerometers. Theory and application” Johannes Wagner and Jan Burgemeister. Manfred Weber.
- UNE-EN ISO 8041:2006 Respuesta humana a las vibraciones. Instrumentos de medida.
- UNE-ISO 2631-1:2008 Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero. Parte 1: Requisitos generales.
- UNE-ISO 2631-2:2011 Vibraciones y choques mecánicos. Evaluación de la exposición humana a las vibraciones de cuerpo entero. Parte 2: Vibración en edificios (1 Hz a 80 Hz).
- REAL DECRETO 1367/2007, por el que se desarrolla la Ley 37/2003 del Ruido, zonificación acústica, objetivos de calidad y emisiones acústicas
- GENERALITAT DE CATALUÑA. DECRETO 176/2009, de 10 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de la Ley 16/2002, de protección contra la contaminación acústica, y se adaptan sus anexos
- Código Técnico de la Edificación DB-SEC (Seguridad estructural. Cimientos)