

**TÉRMINOS DE REFERENCIA EN ESTUDIO DE IMPACTO
AMBIENTAL PARA EL AEROPUERTO INTERNACIONAL
ELDORADO DE LA CIUDAD DE BOGOTÁ D.C.**



AERONÁUTICA CIVIL
Unidad Administrativa Especial

**Unidad Administrativa Especial
Aeronáutica Civil**

**Procedimiento de medición y
evaluación de vibraciones en
estructuras.**

Contrato No. 18001608 H3 – 2018

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|---------|--|----|
| 1. | OBJETO..... | 7 |
| 2. | DEFINICIONES Y SIGLAS | 7 |
| 3. | METODOLOGÍA..... | 8 |
| 3.1 | GENERALIDADES Y CONCEPTOS..... | 8 |
| 3.1.1 | Parámetros de medición..... | 8 |
| 3.1.1.1 | Principios | 8 |
| 3.1.1.2 | Períodos | 9 |
| 3.1.2 | Factores relacionados con la fuente de vibraciones..... | 9 |
| 3.1.2.1 | Clasificación de eventos vibratorios según su duración | 9 |
| 3.1.2.2 | Clasificación de eventos vibratorios según la variación de su amplitud en el tiempo | 9 |
| 3.1.2.3 | Clasificación de eventos vibratorios según la categoría de las señales emitidas 9 | 9 |
| 3.1.3 | Factores relacionados con la estructura..... | 10 |
| 3.1.3.1 | Tipo y condición de estructuras | 10 |
| 3.1.3.2 | Daño estructural | 10 |
| 3.1.3.3 | Incidencia del suelo | 11 |
| 3.1.4 | Tipos de transductores y su montaje mecánico..... | 11 |
| 3.1.4.1 | Requerimientos para lograr el rendimiento óptimo del transductor .. | 12 |
| 3.1.4.2 | Consideraciones adicionales para el montaje | 12 |
| 3.1.4.1 | Tipos de montaje y su respuesta en frecuencia típica | 13 |
| 3.2 | PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES..... | 16 |
| 3.2.1 | Aplicabilidad..... | 16 |
| 3.2.1.1 | Consideraciones para la selección de puntos de observación | 17 |
| 3.2.1.2 | Características constructivas en las estructuras | 19 |
| 3.2.1.1 | Tipología de viviendas sobre el AI | 20 |
| 3.2.2 | Parámetros a ser medidos..... | 23 |
| 3.2.3 | Rango de frecuencia..... | 23 |
| 3.2.4 | Instrumentación..... | 23 |
| 3.2.5 | Relación Señal-Ruido (SNR)..... | 23 |
| 3.2.6 | Posicionamiento, orientación y número de transductores..... | 24 |
| 3.2.6.1 | Generalidades | 24 |
| 3.2.6.2 | Puntos de medición y posición | 24 |



| | | |
|---------|--|----|
| 3.2.6.3 | Número de transductores | 24 |
| 3.2.6.4 | Orientación de los transductores | 25 |
| 3.2.6.5 | Direcciones de medición | 25 |
| 3.2.7 | Montaje y acoplamiento de transductores | 26 |
| 3.2.7.1 | Aspectos importantes en el acoplamiento de los transductores | 26 |
| 3.2.7.2 | Acoplamiento a elementos estructurales | 26 |
| 3.2.7.3 | Acoplamiento a suelo | 29 |
| 3.2.7.4 | Accesorios adicionales de acoplamiento | 30 |
| 3.2.8 | Duración de la medición | 33 |
| 3.2.9 | Consideraciones adicionales | 35 |
| 3.3 | EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE VIBRACIÓN MEDIDOS EN LAS ESTRUCTURAS | 35 |
| 3.3.1 | Evaluación de los efectos de las vibraciones en las edificaciones | 35 |
| 3.3.1.1 | DIN 4150-3:1999 Efecto de las vibraciones en estructuras | 36 |
| 3.3.1.2 | BS 7385-2:1993 Guía de niveles dañinos por vibración transmitida por suelo 37 | 37 |
| 3.3.1.3 | Otros estándares internacionales | 38 |
| 3.3.2 | Evaluación de los efectos de las vibraciones en ocupantes de las edificaciones 39 | 39 |
| 3.3.2.1 | NTC 5436-2:2006 Evaluación de la exposición de los seres humanos a vibración en todo el cuerpo. Vibración en edificaciones (1 Hz - 80 Hz) | 39 |
| 3.3.2.2 | BS 6472:1992 Guía para evaluar la exposición del ser humano a vibración en edificaciones (1 Hz – 80 Hz) | 43 |
| 3.3.2.3 | DIN 4150-2:1999 Exposición humana a la vibración en edificaciones | 48 |
| 3.4 | INFORMACIÓN A REPORTAR EN LAS MEDICIONES | 51 |
| 3.5 | CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO | 52 |
| 3.5.1 | Instalación y características del sistema ORION 01dB | 52 |
| 3.5.2 | Configuraciones de medición | 52 |
| 3.5.3 | Prerrequisitos para los casos de uso | 53 |
| 3.5.4 | Consideraciones del sistema | 54 |
| 3.5.5 | Conexión a tierra | 54 |
| 3.5.1 | Software de procesamiento | 55 |
| 3.6 | RESUMEN | 55 |
| 3.6.1 | Diagrama de flujo | 55 |
| 3.6.2 | Proceso de medición | 55 |

| | | |
|----|-------------------------------|----|
| 4. | DOCUMENTOS RELACIONADOS | 56 |
|----|-------------------------------|----|

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------------|--|----|
| Figura 1. | Esquema montaje del transductor | 12 |
| Figura 2. | Transductor con conector axial (izquierda) y radial (derecha) | 13 |
| Figura 3. | Montaje pernado y su respuesta en frecuencia típica | 13 |
| Figura 4. | Montaje en cemento y su respuesta en frecuencia típica | 14 |
| Figura 5. | Montaje en cinta adhesiva de doble cara y su respuesta en frecuencia típica..... | 14 |
| Figura 6. | Montaje magnético y su respuesta en frecuencia típica..... | 15 |
| Figura 7. | Montaje manual y su respuesta en frecuencia típica..... | 15 |
| Figura 8. | Montaje de ajuste rápido | 16 |
| Ilustración 9. | Destinos nacionales del SKBO..... | 18 |
| Ilustración 10. | Cantidad de operaciones por modelos de aeronave. | 19 |
| Ilustración 11. | Consolidado número de pisos por predio, para el análisis del estudio de vibraciones..... | 21 |
| Ilustración 12. | Porcentaje de predios por número de pisos. | 22 |
| Figura 13. | Corte estructural de una partición | 27 |
| Figura 14. | Base de montaje sola (izquierda) y con transductor acoplado (derecha)..... | 30 |
| Figura 15. | Tipos de patas para la base del sensor. Sección A-A para montaje en superficies blandas o elásticas (tres patas puntiagudas) y sección B-B para montaje en superficie dura (tres patas redondeadas)..... | 31 |
| Ilustración 16. | Acelerómetro triaxial Orion 01 dB..... | 32 |
| Figura 17. | Intervalos de tiempo..... | 34 |
| Figura 18. | Curvas de valores guías de velocidad máxima de vibración en la cimentación para eventos de corta duración..... | 37 |
| Figura 19. | Curvas de valores guías de PPV para daño cosmético | 38 |
| Figura 20. | Curvas de la ponderación de frecuencia W_k y W_d | 40 |
| Figura 21. | Curva de la ponderación de frecuencia W_m | 41 |
| Figura 22. | Direcciones del sistema de coordenadas basicéntrico para humanos bajo vibración | 44 |
| Figura 23. | Curvas de aceleración para vibración estructural horizontal (izquierda) y lateral (derecha)..... | 47 |



| | |
|--|----|
| Figura 24. Curvas de PPV para vibración estructural horizontal (izquierda) y lateral (derecha) | 48 |
| Figura 25. Parámetros en una señal registrada en un período de 4,5 minutos (9 ciclos).... | 50 |
| Figura 26. Diagrama de flujo para la instalación | 53 |
| Figura 27. Sistema de conexión a tierra | 55 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Criterios que afectan los diferentes tipos de montaje y su selección | 16 |
| Tabla 2. Métodos de montaje y acoplamiento de sensores a superficies horizontales en estructuras..... | 28 |
| Tabla 3. Límites para medidas lineales..... | 30 |
| Tabla 4. Medidas límite para el radio de curvatura y la altura del chaflán..... | 31 |
| Tabla 5. Límites para medidas angulares | 31 |
| Tabla 6. Intervalos de tiempo de observación y de medición..... | 34 |
| Tabla 7. Valores guía de velocidad de vibración para eventos de corta duración..... | 36 |
| Tabla 8. Valores guía de velocidad máxima de vibración para eventos de larga duración . | 37 |
| Tabla 9. Valores guía de transientes de vibración (PPV) para daño cosmético | 37 |
| Tabla 10. Valores guía de velocidad pico de partícula según el estándar AS 2187.2..... | 38 |
| Tabla 11. Valores guía de velocidad pico de partícula según la norma SN 640 312 | 38 |
| Tabla 12. Valores umbrales para generar distintos tipos de daño según la norma PAN50. | 39 |
| Tabla 13. Valores máximos de vibración para la prevención de daños según norma UNE 22-381-93..... | 39 |
| Tabla 14. Valores guía de aceleración r.m.s. para confort..... | 40 |
| Tabla 15. Valores de la ponderación de frecuencia W_m para aceleración r.m.s. como entrada | 41 |
| Tabla 16. Valores de aceleración de la curva base horizontal (izquierda) y lateral (derecha) | 45 |
| Tabla 17. Valores de velocidad de la curva base horizontal (izquierda) y lateral (derecha) | 45 |
| Tabla 18. Factores multiplicadores para especificación de nivel de vibración estructural en humanos | 46 |
| Tabla 19. Aceleración r.m.s. ponderada correspondiente a baja probabilidad de quejas en viviendas | 48 |
| Tabla 20. VDV a partir de los cuales se esperarían quejas en viviendas | 48 |
| Tabla 21. VDV a partir de los cuales se esperarían quejas en viviendas | 50 |
| Tabla 22. Especificaciones técnicas de medición | 52 |
| Tabla 23. Fuente de alimentación | 53 |

1. OBJETO

Definir y establecer la metodología para la medición y evaluación de vibraciones en estructuras, siguiendo los lineamientos de normativa nacional e internacional.

2. DEFINICIONES Y SIGLAS

Área de influencia (AI): espacio geográfico de donde se obtiene información necesaria para predecir y evaluar impactos en el medio ambiente (en este caso, los impactos de la vibración).

Daño cosmético: evento que no afecta de manera relevante las propiedades estructurales de la vivienda. Este tipo de daño solo conlleva a medidas cosméticas de restauración.

Evento de vibraciones: modificación de las vibraciones ambientales existentes debido a fuentes únicas o múltiples.

Frecuencia: magnitud que mide el número de oscilaciones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o movimiento periódico. Su unidad de medida es Hertz (Hz).

Fuente de vibraciones: uno o varios cuerpos en estado sólido, líquido o gaseoso, que causan vibraciones en un entorno.

Intervalo de medición: mínima duración de medición de vibraciones que representa, de manera precisa, la respuesta de una estructura sometida a una vibración conocida.

Intervalo de observación: tiempo durante el cual se realizan mediciones continuas o no continuas para caracterizar las actividades de vibración

Receptor de vibraciones: todas personas o estructuras que responden a la energía de vibración emitida por una fuente interna o externa.

Velocidad pico de partícula (PPV): la máxima velocidad instantánea de una partícula en un punto durante el intervalo de tiempo considerado.

Vibración: movimiento de un cuerpo sólido alrededor de una posición de equilibrio sin sufrir desplazamiento neto o global.

3. METODOLOGÍA

La capacidad de una edificación para resistir vibraciones es una característica cada vez más importante y es considerada tanto en la etapa de diseño para asegurar integridad estructural como en la serviciabilidad, a fin de garantizar el cumplimiento de los requerimientos de aceptabilidad ambiental. Las mediciones de vibraciones en estructuras son llevadas a cabo con el propósito de reconocer un problema incidente, para el monitoreo de control de niveles permitidos, para documentar predicciones de respuesta de la estructura ante cargas dinámicas reconocidas y para diagnosticar las consecuencias y efectos en las edificaciones.

3.1 GENERALIDADES Y CONCEPTOS

3.1.1 Parámetros de medición

3.1.1.1 Principios

Normalmente los humanos que habitan una edificación deberían estar expuestos a una percepción de vibraciones tan bajo como sea posible. Sin embargo, no es posible eliminar toda la vibración con la tecnología actual. El grado de inconformidad a las vibraciones depende de la naturaleza de la vibración y a las características individuales de cada persona, y a otros factores físicos. Efectos negativos pueden ser solamente eliminados cuando la vibración es completamente imperceptible.

Los parámetros de vibración que deben ser considerados son:

- Magnitud de la vibración (severidad)
- Frecuencia de la vibración
- Duración de la exposición
- La frecuencia y la hora de la exposición y su naturaleza
- El tipo y modo de operación de la fuente de vibración
-

Entre los factores humanos, se incluyen:

- El estado de salud de la persona (físico y psicológico)
- Actividades llevadas a cabo en cierto tiempo
- El grado en que la persona se ha acostumbrado a la vibración
- Expectativas en cuanto a las condiciones de vida
- Efectos secundarios
-

Entre los factores estructurales, se incluyen:

- Frecuencia natural de la edificación
- Tipo de suelo
- Proceso constructivo
- Característica de los materiales
- Respuesta a las cargas dinámicas

3.1.1.2 Períodos

- Período de medición: Está dado en horas y contiene N número de ciclos y se obtiene el valor promedio de la señal. El período de medición es normalmente más corto que el período de evaluación. El período de medición comprende varios periodos cortos.
- Período de exposición: Equivale a la sumatoria de todos los ciclos durante los cuales la vibración tiene un efecto. Puede ser dividido en varios períodos cortos para describir distintos tipos de efectos de vibración
- Período de evaluación: Es el período al cual se refiere la exposición a la vibración, basado en una jornada diaria. El día tiene una duración de 16 horas (6:00 – 22:00) y la noche de 8 horas (22:00 – 6:00)
- Período de descanso: Durante el día, el período de evaluación incluye diversos períodos de descanso como:
 - Días de trabajo (de lunes a sábado): 6:00 - 7:00 y 19:00 – 22:00
 - Domingos y vacaciones: 6:00 – 22:00

3.1.2 Factores relacionados con la fuente de vibraciones

La fuente originaria de los eventos vibratorios debe ser identificada y descrita de manera precisa a fin de considerar sus características al momento de establecer un programa de mediciones o para comparar los resultados con límites regulatorios. Para realizar la descripción de la fuente es necesario clasificar sus eventos según la duración de la exposición, la variación de la amplitud con el tiempo y la categoría de las señales.

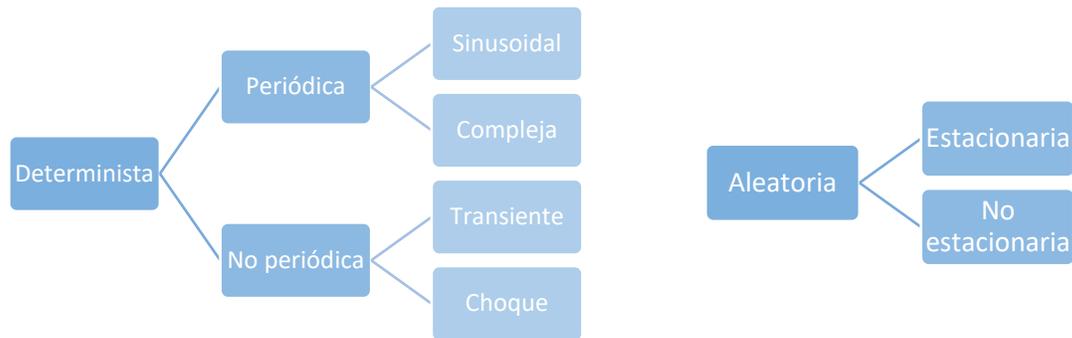
3.1.2.1 Clasificación de eventos vibratorios según su duración

- Permanente: la fuente de emisión es permanente durante el intervalo de referencia seleccionado.
- Intermitente: sucesión de eventos de corta duración separados por intervalos de tiempo irregulares.
- De ocurrencia única: eventos individuales de corta duración que ocurren más de cinco (5) veces por día.

3.1.2.2 Clasificación de eventos vibratorios según la variación de su amplitud en el tiempo

- Estable: la variación de la amplitud con el tiempo no excede el 10%.
- Cíclico: eventos repetidos con la misma magnitud.
- Otros eventos: aquellos que no pueden ser clasificados como estables o cíclicos.

3.1.2.3 Clasificación de eventos vibratorios según la categoría de las señales emitidas



3.1.3 Factores relacionados con la estructura

La reacción de las estructuras y sus componentes a las cargas dinámicas depende de las características de su respuesta (frecuencias naturales, modos de vibración y amortiguamiento) y del contenido espectral de la excitación. Es importante considerar los efectos y el grado de exposición donde pueda ocurrir daño por fatiga.

3.1.3.1 Tipo y condición de estructuras

Se deben clasificar las edificaciones para describir y categorizar los efectos visibles de la vibración. Se recomienda determinar la frecuencia natural de la estructura a medir (por medio de métodos numéricos computacionales o por excitación artificial) con el fin de conocer la influencia de la excitación en la respuesta de la edificación. Como guía se pueden asumir las siguientes frecuencias naturales para un suelo de rigidez promedio caracterizado por velocidades de onda transversales entre 150 m/s y 200 m/s:

- Edificaciones de 1 – 2 pisos \approx 15 Hz
- Edificaciones de 2 – 6 pisos \approx 8 Hz – 12 Hz
- Edificaciones de más de 6 pisos $<$ 8 Hz

La norma DIN 4150 presenta una fórmula para estimar aproximadamente la frecuencia natural de edificaciones de al menos cinco (5) pisos a partir de observación y medición a estructuras (por lo que puede no ser muy confiable para edificaciones colombianas con estándares constructivos, arquitectónicos y estructurales distintos):

$$f_n = \frac{10}{n} [Hz] \quad \text{Ec. 1}$$

donde n es el número de pisos

Las dimensiones de la cimentación (fundación) de las edificaciones domésticas suelen ser menores a las longitudes de onda de las excitaciones transmitidas por el suelo, razón por la cual las estructuras suelen ser mayormente afectadas por vibraciones de baja frecuencia (a diferencia de las frecuencias altas para las cuales la fundación puede actuar como un filtro).

3.1.3.2 Daño estructural

Los daños en las edificaciones están clasificados en tres (3) categorías:

- Daño cosmético: corresponde a la aparición de pequeñas fisuras en las superficies de yeso o el crecimiento de fisuras existentes. Adicionalmente, formación de grietas finas en las juntas de ladrillo o concreto
- Daño menor: corresponde a la formación de largas fisuras y aflojamiento (o caída) de superficies en yeso o grietas a través de bloques de concreto.
- Daño mayor: corresponde al detrimento de los elementos estructurales de la edificación, grietas en las columnas de soporte, aflojamiento de juntas y ensanchamiento de grietas en mampostería.

Exceptuando las estructuras construidas con materiales metálicos, las edificaciones casi nunca están libres de fisuras. Sólo se consideran fisuras que son visibles al ojo desde una distancia de un (1) metro, correspondiente a una anchura de mínimo 0,05mm. Las fisuras pueden ser descritas como:

- Fisura fina: $\leq 0,2$ mm
- Fisura mediana: 0,2 mm – 1 mm
- Fisura ancha: 1 mm – 3 mm
- Fisura abierta: ≥ 3 mm

3.1.3.3 Incidencia del suelo

También es de gran influencia las condiciones del suelo sobre el cual está edificada la estructura ya que la cimentación en suelos y rellenos pobres pueden estar sujetos a asentamiento o pérdida de capacidad de carga debido a la vibración del suelo. El riesgo de dichos efectos está relacionado con el tamaño de partícula y la forma del suelo, su uniformidad de nivelación, el grado de saturación, el estado de esfuerzo interno, la amplitud máxima de movimiento multiaxial y la duración de la vibración del suelo. La interacción entre el suelo y la estructura influye en la respuesta dinámica de las estructuras. Una edificación rígida unida a un suelo rígido respondería en la misma manera que el suelo, pero en la realidad el suelo no es de rigidez infinita por lo cual puede proveer un mecanismo de radiación y disipación de energía (actuando como un resorte bajo la fundación de la estructura).

3.1.4 Tipos de transductores y su montaje mecánico

El método más usado para determinar el movimiento vibratorio de un cuerpo o estructura es por medio de transductores (sensores) electromecánicos. Existen dos grandes clases de transductores para el monitoreo de vibraciones:

- De contacto: son aquellos colocados en contacto mecánico con la estructura. Dentro de estos se encuentran los acelerómetros piezoeléctricos y piezo-resistivos, además de transductores sísmicos de velocidad.

- De no contacto: son aquellos colocados en la proximidad de la estructura sin tocarla. Dentro de estos se encuentran las sondas de corriente de Eddy y las sondas ópticas de proximidad.

El acoplamiento mecánico entre el transductor y la estructura puede alterar significativamente la respuesta del transductor o de la estructura. El montaje mecánico cambia la respuesta la precisión del rango de frecuencia con respecto a la amplitud y a la fase. Por otro lado, puede haber desviaciones en los resultados de las mediciones debido a la desalineación del eje sensible del sensor, pandeo en su base, Transientes de temperatura, torque (par) de montaje y movimiento del cable. Un esquema de montaje de transductor es presentado en la Figura 1, donde S es la estructura vibrante, T es el transductor, F es el tipo de montaje del sensor, V_s es el movimiento vibratorio de la estructura y V_T es el movimiento vibratorio del sensor.

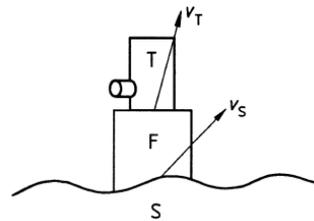


Figura 1. Esquema montaje del transductor
Fuente: ISO 5348:1998

3.1.4.1 Requerimientos para lograr el rendimiento óptimo del transductor

Un transductor logrará un rendimiento óptimo solamente si cumple con las siguientes condiciones ideales:

- El transductor debe desempeñar el mismo movimiento que la estructura vibrante.
- El movimiento de la estructura debe cambiar muy poco con la adición del transductor.
- La relación entre la señal del transductor y su movimiento no debe ser distorsionada por operar cerca de su frecuencia de resonancia de montaje.

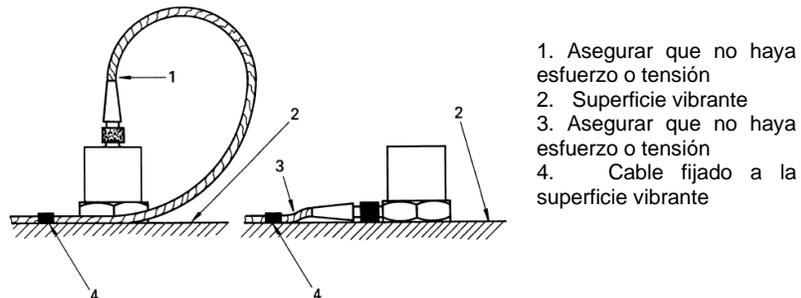
Para lograr dichas condiciones ideales es necesario asegurar que:

- El transductor y su montaje deben ser rígidos y firmes (las superficies de montaje deben ser limpias y lo más planas posibles).
- El montaje debe introducir una mínima distorsión propia por el movimiento.
- La masa del transductor y el montaje deben ser pequeños en comparación con la estructura analizada (según ISO 2954).

3.1.4.2 Consideraciones adicionales para el montaje

- Los transductores deben trabajar bien por debajo de su frecuencia natural.
- El fabricante del transductor debe recomendar el torque para el montaje pernado.

- Los cables rígidos pueden generar tensión en sensores de conexión axial por lo que se recomienda sujetar el cable con cinta. Cables sueltos pueden generar efectos triboeléctricos en transductores piezoeléctricos.
- La superficie de montaje debe ser examinada para evitar contaminación y garantizar que esté lisa.
- Se debe minimizar cualquier desalineación entre el eje sensitivo del sensor y la dirección de medición para evitar errores.
- Los accesorios de montaje (incluyendo los pernos de aislamiento eléctrico) deben ser rígidos, de baja masa, con bajo momento de inercia y preferiblemente ser simétricos en el eje sensible.



1. Asegurar que no haya esfuerzo o tensión
2. Superficie vibrante
3. Asegurar que no haya esfuerzo o tensión
4. Cable fijado a la superficie vibrante

Figura 2. Transductor con conector axial (izquierda) y radial (derecha)
Fuente: ISO 5348:1998

3.1.4.1 Tipos de montaje y su respuesta en frecuencia típica

- Montaje pernado

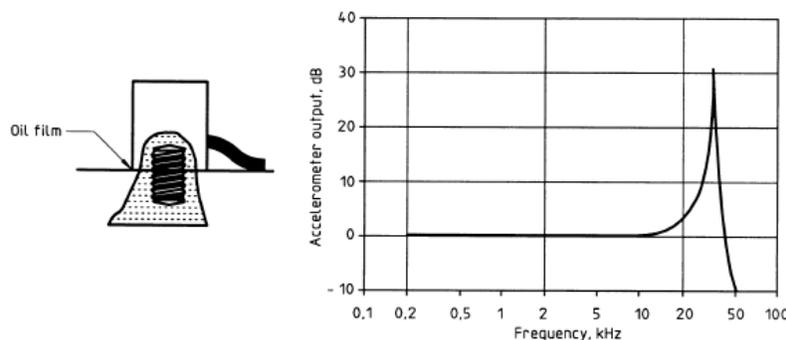


Figura 3. Montaje pernado y su respuesta en frecuencia típica
Fuente: ISO 5348:1998

- Una fina película de aceite o grasa entre las superficies ayuda a lograr un buen contacto, aumentando la rigidez.
- La superficie debe ser limpia y plana.
- El eje de los huecos para los pernos debe ser normal a la superficie de montaje.
- Se debe considerar el torque (par) recomendado por el fabricante para lograr un montaje firme sin dañar el transductor.
- Su respuesta es afectada por la perpendicularidad del montaje, la llanura de la superficie, la aspereza de la superficie y el torque (par) de montaje.

- Montaje en cemento

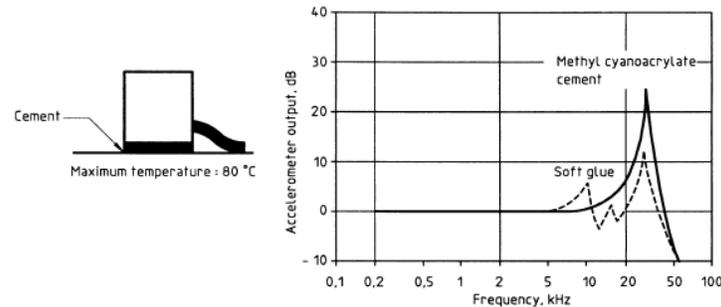


Figura 4. Montaje en cemento y su respuesta en frecuencia típica
Fuente: ISO 5348:1998

- Es usado cuando la estructura no puede ser perforada, cuando se necesita aislamiento eléctrico del sensor o cuando la superficie no es plana.
 - Usualmente se usa un tornillo o perno con un extremo roscado para posicionar el transductor y en el otro extremo se acopla un disco plano a ser cementado en la estructura.
 - El cemento aplicado constará de una capa delgada para representar un resorte rígido.
 - Se deben usar cementos duros de variedad catalítica ya que los cementos de secado solvente tienen d permanecer suaves internamente (disminuyendo la frecuencia natural)
 - La máxima temperatura en la capa de cemento debe ser 80°C.
 - Para aumentar su banda operativa de frecuencia, el cemento debe estar ligeramente amortiguado ($< 0,01$), ser duro y la capa de acople debe ser delgada.
 - Su respuesta es afectada por el almacenaje y la mezcla del cemento, la contaminación por aceite o grasa, el grosor de la capa de cemento y el módulo elástico complejo de temperatura del cemento.
- Montaje en cinta adhesiva de doble cara

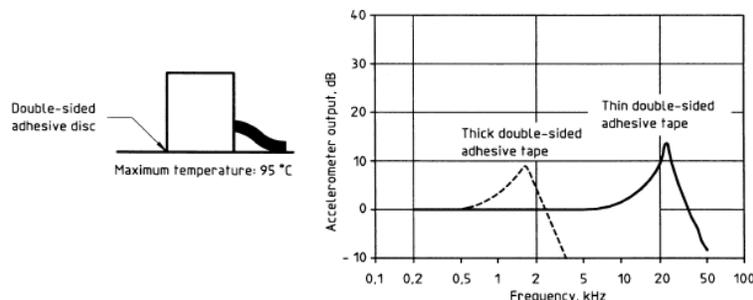


Figura 5. Montaje en cinta adhesiva de doble cara y su respuesta en frecuencia típica
Fuente: ISO 5348:1998

- La máxima temperatura en la cinta debe ser de 95°C.

- Su respuesta es afectada por la cantidad de superficie de contacto, la llanura de la base y de la superficie, el material de la cinta y el complejo módulo elástico de la cinta.
- El grosor de la cinta es inversamente proporcional a la frecuencia natural.
- Montaje magnético

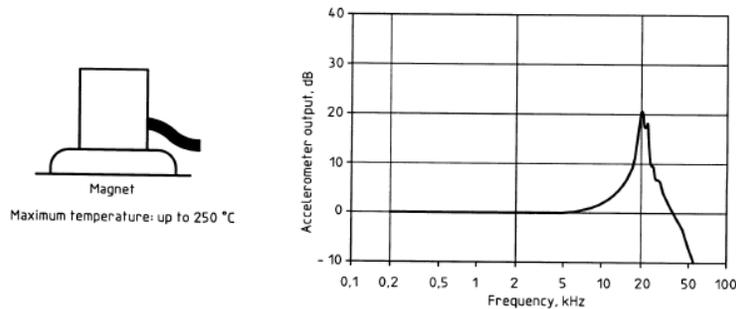


Figura 6. Montaje magnético y su respuesta en frecuencia típica
Fuente: ISO 5348:1998

- La máxima temperatura en el imán debe ser de 250°C.
- Su respuesta es afectada por la dirección del montaje, la llanura de la base y la superficie, la masa del imán, la rigidez del imán y las propiedades magnéticas del material.
- Montaje manual (sostenido con la mano)

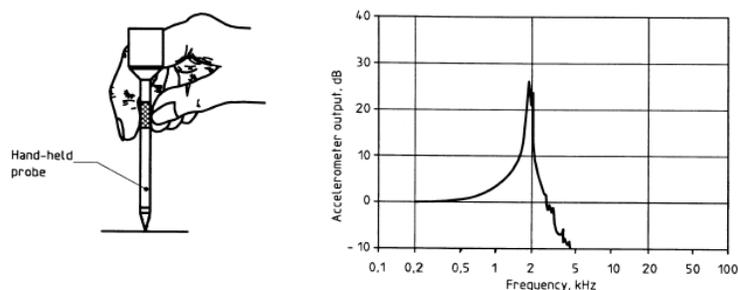


Figura 7. Montaje manual y su respuesta en frecuencia típica
Fuente: ISO 5348:1998

- Requiere de una sonda que ha de ser sostenida manualmente.
- Su respuesta es afectada por la constancia en la dirección de medición, constancia en la presión ejercida por la mano, la suficiente presión necesaria para medir, el área de contacto y la orientación.
- Montaje de ajuste rápido

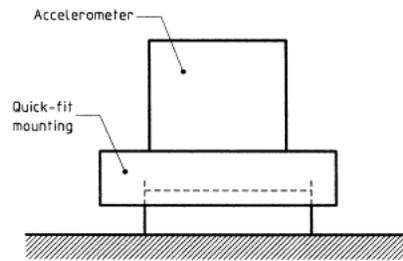


Figura 8. Montaje de ajuste rápido
Fuente: ISO 5348:1998

- Su frecuencia natural y límite en amplitud debe ser investigado experimentalmente para determinar el límite de la frecuencia superior y la máxima amplitud que puede ser medida antes de que ocurra distorsión de la señal.
- Su respuesta se ve afectada por el montaje del perno, el torque de montaje, el tamaño del dispositivo de montaje en relación con el transductor, la calidad de la superficie de montaje y la fuerza mecánica de acoplamiento.

La Tabla 1 presenta un resumen de los criterios que afectan los diferentes tipos de montaje:

- Bueno
- ◐ Promedio
- Pobre

Tabla 1. Criterios que afectan los diferentes tipos de montaje y su selección

| Tipo de montaje | Respuesta en frecuencia | Temperatura | Masa del transductor o Rigidez del montaje | Importancia de la preparación de la superficie |
|------------------------------|-------------------------|-------------|--|--|
| Perno | ● | ● | ● | ● |
| Cemento | ● | ● | ● | ◐ |
| Cinta adhesiva de doble cara | ○ | ◐ | ○ | ● |
| Magnético | ◐ | ● | ○ | ● |
| Manual | ○ | ○ | ○ | ○ |
| Ajuste rápido | ◐ | ● | ◐ | ◐ |

Fuente: ISO 5348:1998

3.2 PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN DE VIBRACIONES.

3.2.1 Aplicabilidad

Este procedimiento aplica tanto para estructuras existentes sujetas a diferentes tipos de excitación, como para nuevas estructuras erigidas en un entorno con fuentes de excitación significativas. Razón por la cual, se define el criterio de clasificación de las estructuras de estudio, las cuales deberán localizarse dentro del área de influencia, esto en función de la configuración operacional dispuesta para el Aeropuerto Internacional El Dorado,

características zonales de construcciones por número de pisos y la regulación aplicada para los respectivos levantamientos de predios.

Este análisis interdisciplinar se realizará por parte de profesionales acústicos y especializados en vibraciones de mecánica estructural, los cuales definieron la metodología para el criterio de clasificación a partir de varios conceptos y a raíz del contexto de hechos entre las fechas de estudio.

Las condiciones para la selección de los puntos de mediciones son provenientes de los hechos sucedidos a lo largo del periodo de medición, el cual inicia desde el 27 de agosto de 2020 y finaliza el 4 de septiembre del mismo año.

3.2.1.1 Consideraciones para la selección de puntos de observación

Uno de los criterios ingenieriles que se implementó para la selección de los puntos de observación se basó en la configuración operacional dispuesta para el total de días del estudio. Por tal motivo y teniendo en cuenta que, tal configuración se desarrolló en su totalidad con recorridos en sentido oriente-occidente y occidente-oriente para operaciones de aterrizaje y decolaje sobre las cabeceras 13L y 31R. Esto a causa de los respetivos mantenimientos programados en la pista sur (13R/31L), primando la seguridad operacional de las tripulaciones y personal dentro de las instalaciones del Aeropuerto Internacional El Dorado – SKBO. Que de igual forma se articula al Decreto 2230 de 2020 donde se establece la prórroga de la emergencia sanitaria causada por el virus COVID-19 hasta nueva orden, esto a su vez, generó la extensión del Decreto 569 de 2020, por medio del cual, se levantan las restricciones ambientales para el Aeropuerto Internacional El Dorado. Lo que indica que, el periodo de estudio de medición se vinculó y desarrollo conforme a las condiciones operativas permisibles y realidades que afrontaba la situación de emergencia sanitaria a nivel mundial y la operación de la terminal aérea.

Es preciso mencionar que, debido a las mencionadas condiciones, el Aeropuerto Internacional El Dorado enfocó sus esfuerzos en funciones de abastecimiento de alimentos, productos de salud y de primera necesidad a los 39 destinos nacionales, con una operación aproximada de 25 aerolíneas de transporte de carga, lo que permite conectar a las ciudades del país. Esto permite inferir de antemano al desarrollo del estudio, que si bien el aeropuerto no se encontraba a su capacidad habitual previo a la pandemia en cantidad de operaciones aéreas, si se presentaban eventos de operatividad de las aeronaves con mayores índices de masa máxima de despegue y aterrizaje y modelos menos recientes que las de pasajeros; las cuales competen en su mayoría al transporte aéreo de carga, que de hecho esta operación fue duplicada al generar planes de abastecimiento mediante este medio de transporte con la emergencia sanitaria. Induciendo a su vez, una significativa caracterización de este componente a partir de los eventos vibratorios posibles por el sobrevuelo de las aeronaves operativas con mayores índices de peso en sus procedimientos.

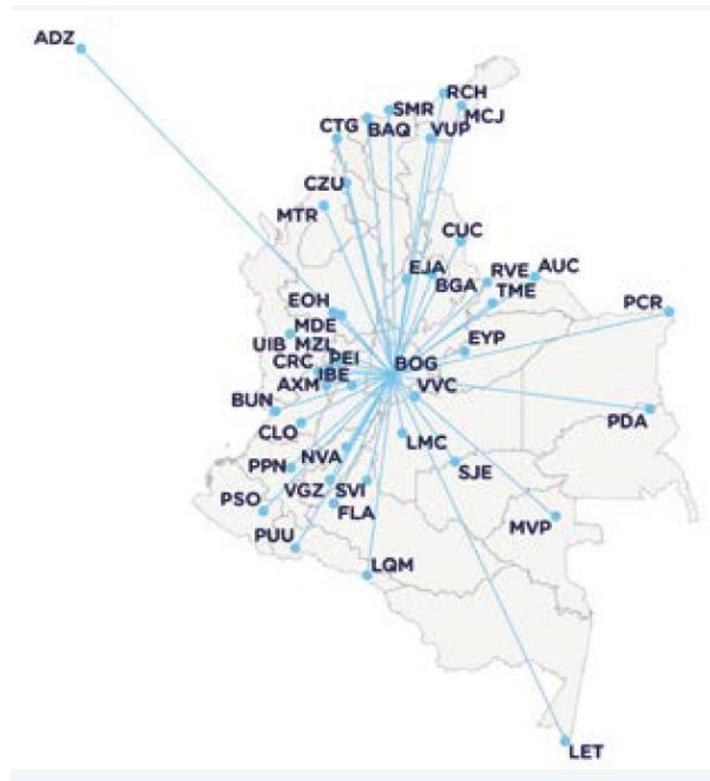


Ilustración 9. Destinos nacionales del SKBO.

Fuente: Alcaldía Mayor de Bogotá.

Dicho contexto, permite identificar que las UPZ que presentan las características óptimas para el análisis del impacto de vibraciones producto de la operación aérea son: UPZ Engativá y UPZ Álamos, las cuales se encuentran colindando con las limitaciones del área del Aeropuerto Internacional El Dorado. En cuanto a las trayectorias de vuelo, esta área de importante análisis se encuentra cubierta dentro de los márgenes del estudio mediante.

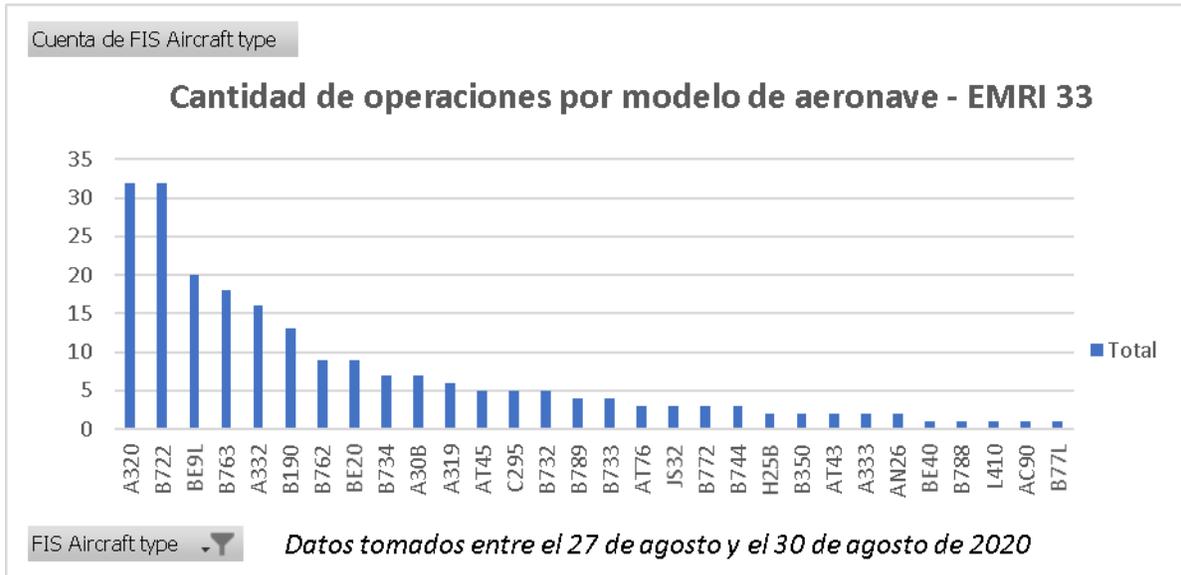


Ilustración 10. Cantidad de operaciones por modelos de aeronave.
Fuente: Aerocivil

No obstante, los datos registrados por la estación más cercana a los puntos de observación localizados sobre el cono de aproximación de la cabecera 31R, registró que la mayor cantidad de eventos operacionales detectados pertenece en mayor medida a las aeronaves identificadas con los modelos: A320, B727-200, B767-300, A332, B190, BE9L, entre otros. Cabe precisar que en totalidad se registraron más de 30 operaciones con modelos A320 y B727-200 y más de 15 operaciones con los modelos BE9L, B767-300 y A332. Lo cual permite inferir que, durante los días de estudio se realizaron operaciones aéreas con aeronaves de gran envergadura, y especialmente con funciones de carga, siendo las aeronaves con mayor capacidad de potencia operacional y con mayores proporciones de emisión respecto a los niveles de ruido y posibles fenómenos vibratorios.

3.2.1.2 Características constructivas en las estructuras

Conociendo el área óptima de estudio en relación con las operaciones de la fuente de interés, el proceso de caracterización de las construcciones se basa como primera medida en la regulación distrital de la ciudad de Bogotá D.C. y las diferentes entidades que tiene como objetivo regular, controlar y revisar todos los proyectos de construcciones que se desarrollen en las áreas del estudio. Por tal motivo y según lo estipulado en el Decreto 824 de 2019, "Por medio del cual se adopta la Operación Estratégica Fontibón – Aeropuerto El dorado – Engativá – Aeropuerto Guaymaral – ‘Distrito Aeroportuario’, y se dictan otras disposiciones" en el artículo 1 profiere, "adoptar la ‘Operación Estratégica Fontibón – Aeropuerto El dorado – Engativá – Aeropuerto Guaymaral’, incluidos los lineamientos para su ejecución.

Por consiguiente, las UPZ que integran el Plan Maestro del Aeropuerto Internacional El Dorado son las siguiente: Fontibón San Pablo, Capellanía, Aeropuerto Internacional El Dorado, Engativá, Fontibón Centro, Zona Franca y Álamos. Lo cual determina el área designada para la Operación Estratégica Fontibón – Aeropuerto Internacional El Dorado – Engativá – Aeropuerto Guaymaral.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, las entidades territoriales no han vinculado una regulación que permite verificar la construcción y el uso del suelo de los predios circundantes al Aeropuerto Internacional El Dorado. Cabe precisar que las características constructivas y de materialidad de las edificaciones objeto de estudio varían, así como su cimentación, el tipo de suelo en el que están construidas y las fuentes de ruido y vibraciones circundantes diferentes a la operación aérea; los cuales son factores influyentes en la respuesta estructural a la vibración incidente.

Así, el desarrollo de la caracterización de la estructuración y del material estructural empleado requeriría de una intervención profesional, social y técnica en cada uno de los puntos de estudio por las entidades territoriales competentes ya establecidas. Sin embargo, por las medidas de salubridad estipuladas en la reglamentación nacional, causadas por la emergencia sanitaria casada por el virus COVID-19, realizar este tipo de intervención sería impracticable teniendo en cuenta la participación de terceros. Así las cosas, se seccionaron puntos estratégicos que cumplieron con una representatividad ecuánime de los análisis objeto de este estudio y satisfagan las expectativas de estos en cuanto a los procedimientos metodológicos de caracterización de este componente.

Al entender que en Colombia cada entidad reglamenta de forma independiente los temas relacionados con el sector de la construcción. Algunos ejemplos son por medio de la Secretaria de Planeación de Bogotá D.C. (SDP) el cual se adopta la Microzonificación Sísmica de Bogotá D.C. en el Decreto 532 de 2010. Este a su vez, acoge las disposiciones de acuerdo con los resultados del estudio de zonificación de la respuesta sísmica de Bogotá y de conformidad con el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10, expedido de acuerdo con la Ley 400 de 1997 por medio de sus Decretos 926 y 2525 de 2010.

Por otro lado, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial por medio de la Comisión asesora permanente para el régimen de construcciones sismo resistentes (creada por la Ley 400 de 1997) estipula en el año 2010 el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente -NSR-10m en el cual se aclara el procedimiento de diseño estructural para edificaciones nuevas y existentes, por ende, la caracterización de la estructuración y del material estructural empleado en cada edificación.

Con el desarrollo de este estudio, no se logró acceder a ningún tipo de caracterización constructiva y/o de sismo resistencia para las estructuras del área de influencia por parte de las entidades oficiales competentes o en registros de bases de datos de estas; optando por validar la metodología propuesta de medición de este estudio sin el grado de detalle de información estructural de cada vivienda dentro del área de análisis. Además, es preciso citar que dentro de los alcances y competencias de la autoridad aeronáutica Aerocivil, no se encuentra el desarrollo de censos que permitan verificar la situación constructiva actual de las edificaciones, sin prescindir del difícil acceso por parte de las comunidades a la especificación de cada predio localizado dentro del Área de Influencia.

3.2.1.1 Tipología de viviendas sobre el AI

Una vez se identifica el área de estudio y la reglamentación de las áreas No reglamentadas Operación Estratégica Fontibón – Aeropuerto Internacional El Dorado – Engativá –

Aeropuerto Guaymaral, se deberá optar otro criterio ingenieril para la identificación de las viviendas dentro del AID y la zona de estudio.

Por tal motivo, se clasificarán todas las estructuras dentro del AI con relación al número de pisos para cada una de las construcciones, esta información deberá obtenerse por medio la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de Bogotá D.C. De tal forma que se podrá conocer las áreas que presentan mayor densidad de construcciones en relación con la cantidad de pisos por cada una. En la siguiente ilustración se podrá observar la cartografía respectiva a este análisis.

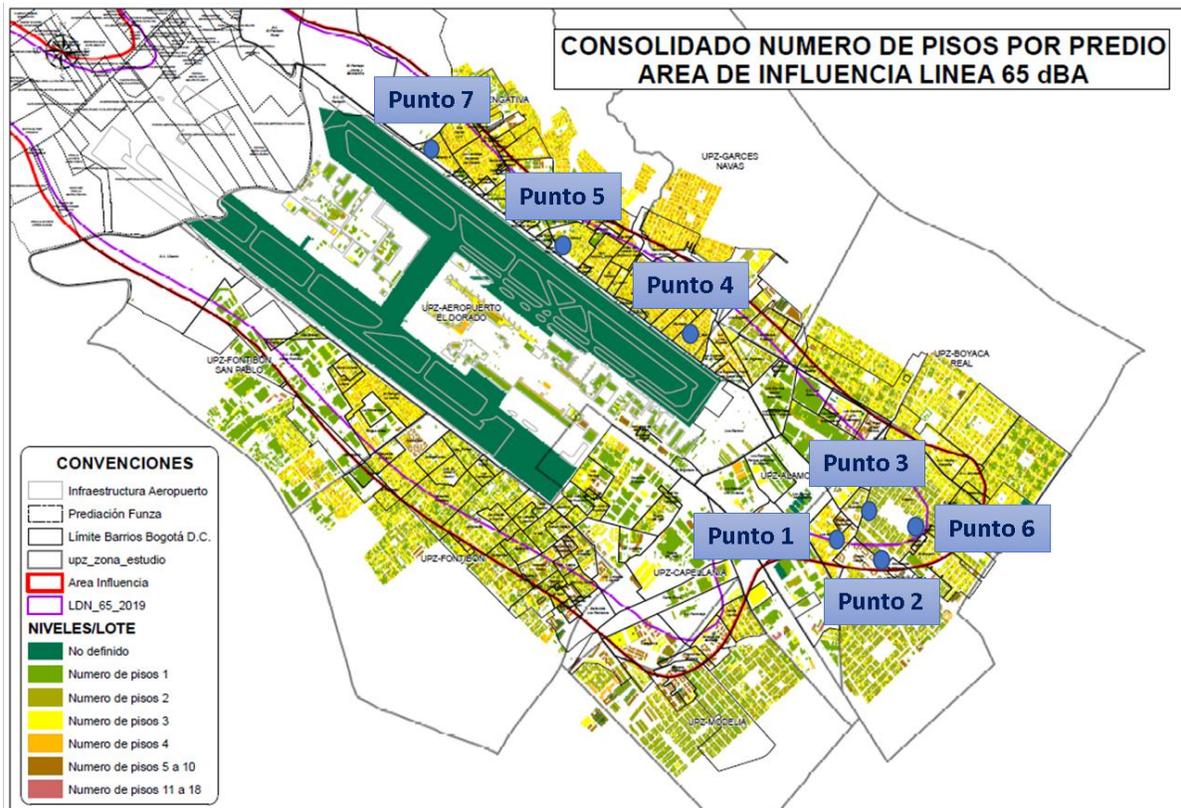


Ilustración 11. Consolidado número de pisos por predio, para el análisis del estudio de vibraciones.

Fuente: IDECA

Se puede inferir que, en la UPZ de Álamos perteneciente a la localidad de Engativá, se presenta el 85% de predios que tienen un número de pisos menor a 3 plantas, no obstante, cerca del 40% de tales edificaciones son únicamente de una planta. Por otro lado, en la UPZ de Engativá, incluida dentro de la misma localidad, se observa que cerca del 84% de los predios edificados tienen un número de pisos menor a 3 plantas por predio, esto se puede observar en la siguiente ilustración.

Estos análisis son de congruencia frente a la selección de puntos de monitoreo tanto por trayectoria, como por tipo de edificación y posibles impactos por eventos vibratorios y su transmisión.

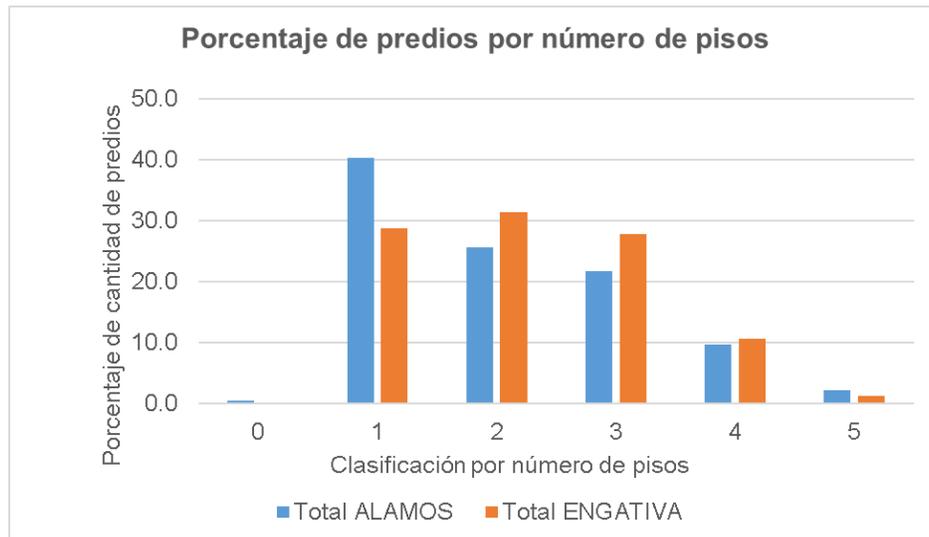


Ilustración 12. Porcentaje de predios por número de pisos.

Fuente: IDECA

En este contexto, cabe precisar que en el Artículo 7 del Decreto 765 de 1999, se establecen las alturas y otros elementos de volumetría en el cono de aproximación y el Área de Influencia Aeronáutica.

“Los reglamentos sobre altura para estas condiciones, son aplicables a los terrenos ubicados dentro del Área de Influencia Aeronáutica que trata dicho decreto. Por regla general, para la aprobación de alturas se debe contar con el concepto previo y favorable de la Aeronáutica Civil para las siguientes localizaciones:

- *Para construcciones localizadas en las franjas de terreno laterales ubicados entre los 250 metros hasta los 400 metros, medidos perpendicularmente desde el eje de las pistas, se autorizarán alturas máximas de diez (10) metros, en una distancia de 3.800 metros, correspondientes a la longitud de las pistas, y mil (1.000) metros más en sus proyecciones, medidos desde sus cabeceras respectivas.”*

En consecuencia, se puede inferir que la conservación de las áreas arquitectónicas cercanas al Aeropuerto Internacional El Dorado prohíben la construcción de edificaciones con más de 10 metros de alto en toda el área de estudio dispuesta para la detección de vibraciones producto de las operaciones aéreas.

Por tal motivo, proyecta que los puntos de observación sean ubicados en diferentes tipos de edificaciones: edificación (casa) de máximo 2 pisos, edificio entre 2 y 6 pisos, y edificio de más de 6 pisos. Lo anterior garantiza que las posibles vibraciones inducidas por la actividad aeronáutica interactúen con edificaciones de distintas frecuencias naturales a fin de evaluar posible resonancia estructural. Cabe mencionar que dentro las UPZ seleccionadas para la zona de observación representadas en la ilustración 10, la gran mayoría de sectores dentro de esta zonificación presentan edificaciones con 3 pisos o menos.

Sin embargo, se realizaron mediciones en edificaciones susceptibles a una mayor afectación por incidencia de vibraciones (tal es el caso de la medición en Los Monjes, cuya edificación presentaba daños en los elementos arquitectónicos del predio, principalmente en muros, fachadas y antepechos) las cuales permiten evidenciar que el paso de aeronaves no genera vibraciones estructurales considerables.

Por último, debido a que la caracterización de construcción e infraestructura de predios cercanos al aeródromo no existe por parte de los entes territoriales, se opta por caracterizar la zona de observación mediante las tipologías de uso del suelo y tipificación por el número de pisos de las construcciones, lo cual permitirá tomar una muestra representativa de las viviendas existentes en el área para determinar la vulnerabilidad estructural de cada tipo de estructura en relación con las posibles vibraciones producto de las operaciones aéreas.

3.2.2 Parámetros de medición

Para medición de vibración estructural se recomienda usar sensores de velocidad debido a su respuesta a bajas frecuencias. La unidad de medida preferiblemente es la velocidad r.m.s. en [mm/s] o [in/s], pero puede ser derivada para hallar la aceleración r.m.s.; es aconsejable usar un transductor apropiado para medir la cantidad requerida directamente, evitando el proceso de integración o diferenciación.

3.2.3 Rango de frecuencia

El rango de frecuencia a ser analizado depende del contenido espectral de la excitación y de la respuesta mecánica de la estructura, pero generalmente se enfatiza en el rango de 1 Hz – 500 Hz (según ISO 4866 y DIN 45669-2) para medición estableciendo la mínima tasa de muestreo requerida de 1000 muestras/segundo. Por otro lado, la evaluación de los efectos de vibraciones en estructuras se realiza en el rango de 1 Hz – 80 Hz (según ISO 2631 y DIN 4150-2) ya que las edificaciones son más sensibles a las bajas frecuencias. En términos generales, la tasa de muestreo debe equivaler a cinco (5) veces la frecuencia de interés (analizada).

3.2.4 Instrumentación

Las vibraciones son medidas con el fin de evaluar, diagnosticar y monitorear una estructura. El sistema de medición debe de incluir:

- Transductor
- Equipo de acondicionamiento de señal
- Sistema de captura de datos

Para monitoreo de campo, se puede utilizar instrumentación clase 2 (ISO 4866)

3.2.5 Relación Señal-Ruido (SNR)

El ruido de fondo es definido como la sumatoria de todas las señales que no hacen parte del fenómeno bajo investigación. Generalmente, la relación señal-ruido no debe ser inferior a 5 dB (~ 1.78 μ n/seg).

3.2.6 Posicionamiento, orientación y número de transductores

3.2.6.1 Generalidades

La elección del número de transductores y su posicionamiento deben considerar:

- Obligaciones regulatorias o contractuales
- Objeto de la medición
- Tipo de estructura monitoreada (estado, geometría, respuesta dinámica)
- Fundación o cimentación de la estructura
- Distancia entre la fuente y los puntos de medición
- Energía y tipo de vibración generada por la fuente

3.2.6.2 Puntos de medición y posición

El punto de medición se seleccionará de acuerdo con el propósito de medición y se puede seleccionar más de una posición para la apropiada caracterización de la vibración, dependiendo del tamaño y de la complejidad de la estructura. El punto de medición debe ser localizado en un punto de entrada (transmisión) de la vibración.

Se recomienda el posicionamiento de los transductores en los siguientes lugares según la necesidad:

- Para evaluar el efecto de las vibraciones en estructuras, los transductores para las tres direcciones ortogonales (x, y, z) de medición se colocarán juntos en la planta baja de la estructura a investigar, ya sea en la cimentación de la pared exterior, en la propia pared exterior o en un hueco de la pared, los componentes estructurales de los pisos y cualquier otro componente que pueda verse afectado por vibraciones (por ejemplo, suelos, paredes).
- Para evaluar el efecto de la vibración sobre los seres humanos en edificios, se deben posicionar en el suelo de varios pisos del edificio.
- Para evaluar el efecto potencial de las vibraciones sobre estructuras aún no construidas, en el subsuelo y, si es posible, en las cimentaciones de edificios vecinos.

Para estructuras más grandes, se deben realizar mediciones simultáneas en varios lugares cuando se vaya a medir el choque causado por voladuras.

3.2.6.3 Número de transductores

La posición preferida para monitorear la vibración impuesta es en la cimentación (fundación). Cuando las mediciones en la propia cimentación no son posibles, es normal hacer las mediciones en un punto bajo en la pared externa portante principal de la planta baja. En todo caso, el número de transductores depende de la dimensión de la estructura.

Las mediciones de la respuesta de vibración debida a las fuentes a grandes distancias (tráfico, conducción de pilas y voladuras) muestran que la vibración puede amplificarse dentro de la estructura proporcionalmente a su altura y profundidad. Por lo tanto, es necesario realizar mediciones simultáneas en varios puntos de la estructura.

Mediciones de vibraciones generadas por fuentes lejanas a distancias largas distancias muestran que el nivel de vibración puede ser amplificado internamente en la estructura en proporción a su altura y profundidad por lo que es necesario realizar mediciones simultáneas en diversos puntos dentro de la estructura. Para ello se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Para estructuras más altas de doce (12) metros, se deben establecer puntos adicionales de medición cada doce (12) metros o en el piso más alto de la estructura.
- Para estructuras de más de diez (10) metros de longitud, se deben establecer puntos intermedios adicionales en puntos críticos (al menos tres: dos en las extremidades y una en el centro).
- Las mediciones simultáneas sobre la cimentación y el terreno exterior permiten establecer una función de transferencia entre estos.
- Se requieren puntos de medición adicionales en los pisos para evaluar la respuesta humana.

3.2.6.4 Orientación de los transductores

Existen ciertas consideraciones importantes dependiendo de la vía de transmisión de las vibraciones:

- Para medición de vibración transmitida por tierra, es usual orientar los sensores horizontales a lo largo de la dirección definida como la línea que une la fuente y el sensor. Al estudiar la respuesta estructural a la vibración del suelo, es más realista orientar estos sensores horizontales a lo largo del eje mayor y menor de la estructura.
- Para la vibración inducida por el viento, los componentes de movimiento vertical a menudo son omitidos y los transductores de vibración deben ser orientados para registrar movimientos horizontales y rotatorios.

3.2.6.5 Direcciones de medición

Se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones al ubicar el transductor en la estructura a evaluar:

- Medir la vibración que experimenta la estructura con referencia a un sistema de coordenadas cartesianas que tenga un eje vertical “z” y dos ejes horizontales “x” e “y”, ortogonales entre sí.
- Los ejes horizontales deben ser paralelos al eje principal del edificio.
- El eje “x” debe apuntar en la dirección de la fuente de vibración.
- Una de las direcciones de medición debe ser paralela a una pared lateral del edificio.

3.2.7 Montaje y acoplamiento de transductores

3.2.7.1 Aspectos importantes en el acoplamiento de los transductores

El objetivo es reproducir fielmente el movimiento de la estructura sin introducir una respuesta adicional al sistema. Para realizar el montaje del captador tenga en cuenta las siguientes consideraciones:

- El sensor debe soportar (sin cambiar sus características) la vibración en todas las direcciones de la menos tres (3) veces su máxima vibración de entrada especificada.
- El montaje de los captadores y sus accesorios de instalación, dependen del tipo de superficie sobre el que se vayan a montar, las magnitudes de aceleración máxima que se esperan medir y el rango de frecuencias en el que la estructura experimente vibraciones.
- Siempre y cuando los valores máximos de aceleración no sean mayores a 3 m/s^2 en todas las direcciones de medición y el rango de frecuencias no se extienda más allá de los 100 Hz se puede realizar el montaje del captador de forma suelta y sin accesorios de fijación (realice mediciones previas).
- Se debe preferir el montaje en superficies duras que el montaje en superficies blandas o elásticas, ya que, en estas últimas, es difícil establecer si el captador ha sido fijado firmemente.
- El dispositivo de captación y de montaje deben estar firmemente sujetos a la estructura; esto impedirá generalmente cualquier resonancia de contacto dentro del rango de frecuencia de operación y, por lo tanto, cualquier movimiento no deseado del captador.
- Si la vibración es lo suficientemente estacionaria, las tres (3) direcciones ortogonales deben ser medidas en un solo canal.

3.2.7.2 Acoplamiento a elementos estructurales

El montaje del transductor a la estructura vibrante debe cumplir con los lineamientos de la norma ISO 5348. La masa del transductor (y de la unidad de monitoreo, si la hay) montada no debe representar más del 1% de la masa total de la estructura bajo análisis. Una adición de masa equivalente al 10% de la masa total de la estructura representa un cambio significativo de su comportamiento modal y, por ende, su respuesta en frecuencia varía (disminuye la frecuencia natural de la estructura y puede llegar a verse afectada en caso de coincidencia con la frecuencia de excitación).

La norma ISO 2954 recomienda utilizar un método para saber si la masa del sensor influye en una medición y consiste en doblar la masa del transductor y verificar si el nuevo resultado medido muestra una desviación superior al 12% para lo cual la masa del sensor representaría un factor sensible y la medición deberá ser descartada

En términos generales con respecto al montaje del transductor, se debe tener en cuenta:

- La masa del equipo de medida no debe ser superior al 1% de la masa total de la estructura

- El montaje del transductor puede fijarse al bastidor de la estructura mediante pernos de expansión. Las juntas cementadas son preferidas para realizar mediciones elementos de concreto liviano.
- Se deben evitar mediciones en pisos con revestimientos flexibles ya que tienden a dar resultados distorsionados.
- Cuando no sea posible reubicar los transductores, se deben realizar mediciones comparativas con diferentes condiciones de masa y acoplamiento para el bloque de montaje a fin de evaluar el efecto de los revestimientos flexibles o utilizar adaptadores especiales (según DIN 45669-2).
- Soportería debe ser evitada. Es preferible fijar tres (3) transductores uniaxiales a tres caras de un cubo de metal rígidamente montado por medio de los pernos prisioneros o de resina de ajuste rápido, de alto módulo. En circunstancias especiales, es aceptable pegar el transductor o acoplarlo usando atracción magnética (soporte imantado).
- Para las mediciones en superficies horizontales interiores, cinta adhesiva de doble cara puede ser utilizada en todas las superficies duras para aceleraciones que estén por debajo de 1 m/s^2 . Sin embargo, los acoplamientos mecánicos son preferibles.

Para mediciones en la cimentación de la edificación, se debe considerar:

- Colocar el transductor en la propia fundación (base) o en la mampostería estructural (e.g. el exterior de las ventanas del sótano o las escaleras de la cimentación).
- Evitar ubicar el sensor en componentes sueltos o huecos (e.g. escaleras sueltas o losas huecas).
- El transductor no debe ser ubicado a más de 0,5 m del suelo.
- Las mediciones deben realizarse en el exterior de la cimentación, cerca de la fuente de vibración.

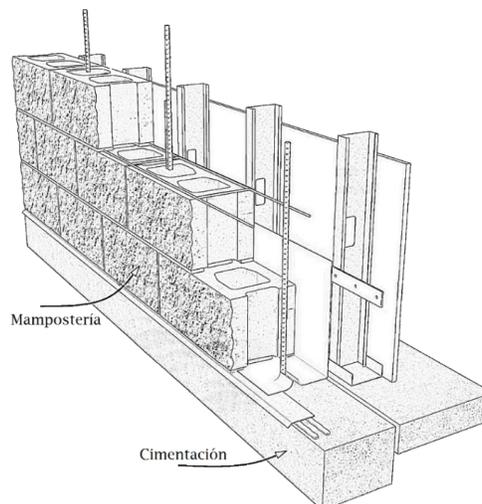


Figura 13. Corte estructural de una partición
Fuente: K2 Ingeniería S.A.S.

Para mediciones en pisos superiores de la edificación, se debe considerar:

- Al medir en elementos estructurales tales como paredes y pisos, se debe localizar el sensor en la posición donde se espera que la vibración sea más fuerte.
- Cuando se realice medición en el piso, se debe ubicar el transductor en el centro ya que es ahí donde ocurren las vibraciones verticales más fuertes (debido al primer modo de vibración teórico de una placa con todos sus bordes fijos).
- Cuando se realice medición en la pared, la vibración transversal horizontal más fuerte normalmente se produce en el punto muerto, es decir, donde las diagonales de las superficies de las paredes se cruzan (el centro de la pared).
- Cuando se realice medición de la vibración horizontal, los transductores deben ser ubicados en los pisos superiores cerca de las paredes estructurales, en las puertas, en los marcos de las ventanas o en las aperturas de las puertas.

Al momento de determinar el punto de medición en la estructura, se debe evaluar el método de montaje más apropiado para acoplar el transductor acorde al tipo de superficie.

Tabla 2. Métodos de montaje y acoplamiento de sensores a superficies horizontales en estructuras

| Tipo de superficie | Ejemplo | El captador es montado usando | Adecuado para frecuencias |
|--|--|--|-------------------------------------|
| Superficies duras Materiales resistentes | Mampostería, pisos descubiertos | Una placa delgada que tiene un orificio roscado y se fija con un adhesivo fuerte, cemento o tornillos. | - |
| | | Un dispositivo de montaje con patas redondeadas como en la ilustración 5 b). | Por debajo de 40 Hz únicamente |
| Materiales delicados | Baldosas, piso de madera, piso revestido | Cinta adhesiva de doble cara delgada, o dispositivo montado con patas redondeadas como en la ilustración 5 b). | Por debajo de 40 Hz únicamente |
| | | Cera adhesiva. | Por debajo de 80 Hz, generalmente |
| Superficies con cubierta elástica | | | |
| Cubiertas delgadas | Alfombra de felpa, PVC no plastificado | Un dispositivo de montaje con patas de acero en punta como en la ilustración 5 a). | } Por debajo de 40 Hz, generalmente |
| Cubiertas gruesas | Cubierta de terciopelo, con respaldo de PVC plastificado | Un dispositivo de montaje con patas de acero en punta como en la ilustración 5 a). | |

Fuente: K2 Ingeniería S.A.S.

- Superficies duras: siempre y cuando los valores máximos de aceleración no sean mayores a 3 m/s^2 en todas las direcciones de medición y el rango de frecuencias no se extienda más allá de los 100 Hz en la dirección vertical y de 40 Hz en la dirección horizontal, se puede realizar el montaje del captador de forma suelta y sin accesorios de fijación.
- Superficies blandas o elásticas: cuando se instalan captadores sobre superficies elásticas como alfombras o revestimientos del suelo, suele producirse una resonancia de contacto por debajo de 100 Hz y los resultados de las mediciones a frecuencias superiores a 20 Hz son a menudo inexactos. Por esta razón no se debe realizar el montaje del captador sin accesorios de fijación y no se debe dejar éste de forma suelta.

3.2.7.3 Acoplamiento a suelo

Cada vez que se deba montar el transductor en el suelo, éste debe ser enterrado a una profundidad mínima equivalente a tres (3) veces la dimensión principal del sensor (o sistema de montaje) a fin de minimizar la distorsión por acoplamiento. Alternativamente, pueden ser fijados a una placa rígida con una relación de masa inferior a dos (2):

$$\frac{m}{\rho r^3} < 2 \quad \text{Ec. 2}$$

donde,

m : masa del transductor y de la placa

r : radio equivalente de la placa

ρ : densidad de compresión [kg/m^3]

La mayoría de los suelos y rocas poseen una densidad de compresión ρ que varía entre 1500 kg/m^3 y 2600 kg/m^3 . Para valores de aceleración superiores a 2 m/s^2 y si las condiciones del suelo lo permiten, el transductor debe ser fijado a una vara rígida de acero de diámetro inferior a diez (10) mm a fin de asegurar que no se deslice el montaje. Este método no es confiable para mediciones horizontales (en paredes).

Al realizar el montaje del transductor en el suelo se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El montaje sobre terrenos en los que se desea medir la vibración del suelo se debe realizar con clavos. Éstos deben ser completamente introducidos en el suelo de modo que sólo queden descubiertos sus extremos superiores para el acople del sensor.
- Los clavos deben ser lo suficientemente rígidos para que no se doblen cuando se entierren.
- Los extremos expuestos, junto con el transductor y su dispositivo de montaje, no deben generar ninguna frecuencia natural en el rango de medida. Estos requisitos pueden ser cumplidos seleccionando clavos de longitud y sección transversal apropiadas, conduciéndolos cuidadosamente en el suelo.

- Clavos de 500 mm de longitud y con una sección transversal en forma de L (80 mm X 10 mm) o una sección transversal en forma de X (30 mm X 5 mm), ambas con los ángulos descritos en la norma alemana DIN 1028, han demostrado ser adecuadas. El extremo puntiagudo de los clavos será de unos 150 mm de largo y una placa de unos 60 mm X 60 mm (y 10 mm de espesor) situada en los extremos expuestos de estos.

Después de quitar la capa superficial del suelo que está suelta, los clavos deben ser martillados en éste para que queden cubiertos hasta la placa y el suelo que se soltó producto del martilleo debe quedar compacto.

3.2.7.4 Accesorios adicionales de acoplamiento

Al acoplar el transductor a una base de montaje, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Realizar la medición usando la base del captador otorga más precisión a la obtención de datos.
- La masa combinada del dispositivo de montaje y el captador debe ser de unos 2,5 kg.
- Según el tipo de superficie (dura o blanda), la base tendrá puntas redondeadas o puntiagudas respectivamente.



Figura 14. Base de montaje sola (izquierda) y con transductor acoplado (derecha)

Fuente: K2 Ingeniería S.A.S.

Las tolerancias generales de los accesorios de montaje deben ser tolerancias de clase “m” según la norma ISO 2768. Se deben verificar las tolerancias (clase m) según la longitud, ángulos, diámetros de la base, agujeros roscados y patas.

Tabla 3. Límites para medidas lineales

| Clase de Tolerancia | Desviaciones permitidas en mm para rangos de longitudes nominales | | | | | | | |
|---------------------|---|---------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | 0,5 a 3 | Por encima de 3 a 6 | Por encima de 6 a 30 | Por encima de 30 a 120 | Por encima de 120 a 400 | Por encima de 400 a 1000 | Por encima de 1000 a 2000 | Por encima de 2000 a 4000 |
| f (fine) | ±0,05 | ±0,05 | ±0,01 | ±0,15 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 | - |
| m (medium) | ±0,1 | ±0,1 | ±0,2 | ±0,3 | ±0,5 | ±0,8 | ±1,2 | ±2 |
| c (coarse) | ±0,15 | ±0,2 | ±0,5 | ±0,8 | ±1,2 | ±2 | ±3 | ±4 |
| v (very coarse) | - | ±0,5 | ±1 | ±1,5 | ±2,5 | ±4 | ±6 | ±8 |

Fuente: ISO 2768-1

Tabla 4. Medidas límite para el radio de curvatura y la altura del chaflán

| Clase de Tolerancia | Desviaciones permitidas en mm para rangos de longitudes nominales | | |
|---------------------|---|---------------------|-----------------|
| | 0,5 a 3 | Por encima de 3 a 6 | Por encima de 6 |
| f (fine) | ±0,2 | ±0,5 | ±1 |
| m (medium) | | | |
| c (coarse) | ±0,4 | ±1 | ±2 |
| v (very coarse) | | | |

Fuente: ISO 2768-1

Tabla 5. Límites para medidas angulares

| Clase de Tolerancia | Desviaciones permitidas en grados y minutos para rangos de longitudes nominales | | | | |
|---------------------|---|-----------------------|------------------------|-------------------------|-------------------|
| | Hasta 10 | Por encima de 10 a 50 | Por encima de 50 a 120 | Por encima de 120 a 400 | Por encima de 400 |
| f (fine) | ±1° | ±0°30' | ±0°20' | ±0°10' | ±0°5' |
| m (medium) | | | | | |
| c (coarse) | ±1°30' | ±1° | ±0°30' | ±0°15' | ±0°10' |
| v (very coarse) | ±3° | ±2° | ±1° | ±0°30' | ±0°20' |

Fuente: ISO 2768-1

Las siguientes medidas son las recomendadas por la norma alemana DIN 45669-2 para la base del sensor:

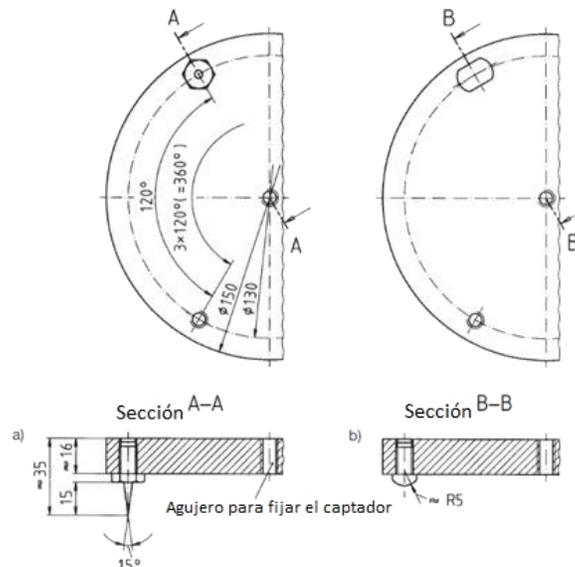


Figura 15. Tipos de patas para la base del sensor. Sección A-A para montaje en superficies blandas o elásticas (tres patas puntiagudas) y sección B-B para montaje en superficie dura (tres patas redondeadas)

Fuente: DIN 45669-2:1995

Debido a las condiciones recomendadas por la normativa internacional vigente se procede a realizar la descripción del equipo con el cual se emplearían las mediciones para la obtención de datos físicos en relación al fenómeno vibratorio generado por la operación

aérea del aeródromo en estudio. Las principales especificaciones del equipo Orion de 01 dB son:

- Estructura resistente a la intemperie.
- Todo en uno: Wi-Fi, módem 3G, GPS.
- Acelerómetro triaxial integrado.
- Segundo sensor IEPE externo adicional.
- Rango dinámico del sensor de aceleración interno de 0.5 mm/s² a 100 mm/s²
- Rango dinámico del sensor de velocidad interno de 0.02 mm/s a 140 mm/s.
- Control remoto por interfaz web.
- Aplicación móvil.
- Implementación de estándares y regulación en su configuración de medición.
- Disparadores personalizables que cumplen con los estándares y regulaciones
- Registro metrológico
- Hasta 30 horas de duración en la batería.
- Software de procesamiento dBTrait Expert

En la siguiente ilustración se podrán observar la imagen del equipo técnico de medición destinado para la detección de fenómenos vibratorios.



Ilustración 16. Acelerómetro triaxial Orion 01 dB
Fuente: Acoem Group

Cabe precisar que las normas internacionales de referencia para la construcción y uso del equipo Orion, responden a los estándares internacionales, tales como; DIN 45669-1 clase 1, DIN 4150, En cuanto a los sensores internos, estos presentan las siguientes especificaciones:

- Tipo: piezoeléctrico triaxial.
- Sensibilidad típica: 500 mv/g
- Sensibilidad transversal: <5%
- Respuesta de frecuencia: 0.4-1600 Hz \pm 10%
- Frecuencia de resonancia típica: 16 Kz

- Ruido residual: 35 μg RMS.
- Ruido espectral
 - 3 μg / Hz @ 10Hz
 - 0.1 μg / Hz @ 100Hz
 - 0.5 μg / Hz @ 1000Hz

Por otro lado, para la adquisición y post procesamiento de la información, el equipo Orión presenta las siguientes especificaciones.

- 7 canales de medida, 3 canales en ejes X, Y y Z para acelerómetro interno.
- Frecuencia de muestreo de 3200 Hz por canal.
- Filtro pasa altos tipo Butterworth de segundo orden a 1.2 Hz.
- Filtro pasa bajos tipo Butterworth octavo orden a 156.25 Hz
- Detección automática del tipo de señal usando el método de curtosis aplicado para determinar automáticamente las curvas de tolerancia, según circular francesa del 23 de julio de 1986, BS 5228-4 y BS 7385-2.
- Periodo de registro rápido de 1, 2 o 5 segundos.
- Calculo de frecuencia dominante mediante FFT en resolución de 0.2 o 0.4 Hz.

Cabe mencionar que cada equipo deberá contar con su respectivo certificado de calibración al momento de realizar las respectivas mediciones, estos certificados se encontraran en el Anexo Digital. Certificados de calibración ORION

3.2.8 Duración de la medición

La ISO 4866 *Mechanical vibration and shock – Vibration of fixed structures. Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effect on structures* establece que el tiempo de medición del fenómeno vibratorio depende de la categoría del evento de vibración y de los intervalos de tiempo de referencia, observación y medición. Estos intervalos son descritos en la siguiente tabla:

El tiempo de medición depende de la categoría del evento de vibración y de los intervalos de tiempo de referencia, observación y medición. El período de medición debe ser seleccionado de manera que los efectos de la vibración estén incluidos (identificando los resultados de mediciones que describan condiciones atípicas). La duración depende de la regularidad de ocurrencia temporal de las vibraciones y puede ser más corto que el período de observación.

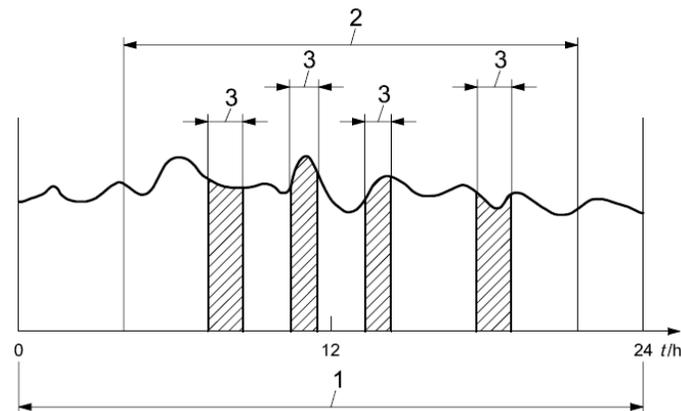


Figura 17. Intervalos de tiempo
Fuente: ISO 4866:2010

- t: tiempo
1: intervalo de referencia
2: intervalo de observación
3: intervalo de medición

Tabla 6. Intervalos de tiempo de observación y de medición

| Tipo de evento | Fuente de vibración | Categoría del evento | Intervalo de observación | Intervalo de medición | Ejemplos de fuentes |
|----------------|------------------------|---|--------------------------------|--|------------------------------------|
| Permanente | Conocida o desconocida | Estable | 1 hora | 30 segundos | Generador eléctrico |
| | | Cíclico | Tres ciclos | Tres ciclos no adyacentes | Martillo de forja |
| | | Otro | Un día seleccionado | Determinado por disparo dependiente de la amplitud | Tráfico pesado de automóviles |
| Intermitente | Única | Cíclico | Al menos tres ciclos completos | Un ciclo completo o la amplitud máxima por disparo | Pilote |
| | | Estable | De acuerdo al modo de trabajo | Un evento o 30 segundos | Grupo de refrigeración |
| | | Otro | De acuerdo al modo de trabajo | Determinado por disparo dependiente de la amplitud | Molino de trituración, Compactador |
| | Múltiple | Cada tipo de fuente se tratará de acuerdo con | Un día seleccionado | Duración del evento | Tráfico de trenes |



| | | | | | |
|-----------------|-------|---|-----------|-----------|-----------|
| | | los criterios definidos para una fuente única | | | |
| Aislado o único | Única | - | Un evento | Un evento | Voladuras |

Fuente: ISO 4866:2010

Por tal motivo, se toma como criterio ingenieril que el tiempo de observación se definirá por medio de una medición continua durante 24 horas, lo cual, de acuerdo con la norma ISO 4866, este tiempo es óptimo para tener un adecuado intervalo de referencia del cual se obtienen intervalos de observación donde se presentan posibles eventos con incidencia de operación aérea los cuales son registrados y su duración representa los intervalos de medición.

Por otro lado, la medición de vibraciones se realizará en lugares cercanos a estaciones de monitoreo de ruido. El periodo de referencia de 24 horas permite establecer una correlación de los datos de vibración medidos con los datos de ruido registrados por el SVCA en todo el día de operación, logrando identificar si la fuente de excitación es la misma y si su contenido espectral coincide para evaluar la incidencia de las operaciones aeronáuticas en el fenómeno vibratorio registrado. Adicionalmente, comparando el tiempo de medición de 24 horas con la anterior tabla, se evidencia que el registro concuerda con el tipo de evento (intermitente múltiple). Por todo lo anterior se puede concluir que este periodo de referencia es suficiente para describir el fenómeno vibratorio en cada punto.

3.2.9 Consideraciones adicionales

- El criterio de relación entre vibración y efectos en estructuras debe ser abordado en términos probabilísticos debido a la incertidumbre en el proceso de medición y modelación
- El riesgo mínimo de algún efecto (daño) equivale al 95% de la probabilidad de no haber efecto
- Se deben investigar los factores de fatiga debido a los esfuerzos cíclicos
- Se deben reportar los hallazgos de la inspección estructural en el formato.
- Llenar el formulario de encuesta de los ocupantes para saber su nivel de molestia.

3.3 EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE VIBRACIÓN MEDIDOS EN LAS ESTRUCTURAS

La evaluación de los niveles de vibración se realiza según dos (2) criterios: efectos en las edificaciones y efectos en los ocupantes de las edificaciones (seres humanos)

3.3.1 Evaluación de los efectos de las vibraciones en las edificaciones

Este criterio de evaluación está enfocado en los efectos que tiene la vibración a nivel estructural en las edificaciones. Existen diferentes normas y estándares internacionales que presentan valores máximos permisibles de vibración según el tipo de edificación.

En general, los criterios que definen los umbrales de vibración que puedan causar daño estructural dependen no sólo de la carga dinámica, sino que también están sujetos a la carga estructural, características de los materiales, características dinámicas, la amplitud de la excitación y la frecuencia. Se suelen trabajar los parámetros de aceleración y velocidad de partícula a la hora de evaluar daños en sistemas estructurales. Sin embargo, el concepto de daño es relativo dado que puede involucrar desde la generación de microfisuras (daño cosmético) hasta la aparición de grietas que puedan generar algún tipo de falla. A su vez, la aparición de grietas y fisuras está fuertemente relacionado con la calidad de los materiales y las técnicas constructivas.

En lo que a Colombia respecta, existe un código de construcción, pero es difícil estandarizar las características de los materiales y de los procesos constructivos (especialmente en viviendas de tipo informal). El estudio específico de daños por vibración en una edificación en particular requeriría de evaluaciones detalladas que van desde la caracterización del suelo y los materiales usados en la construcción, hasta la evaluación de las cargas dinámicas puntuales. No obstante, la normativa y los estándares internacionales han establecido valores indicativos límite de velocidad y aceleración de las partículas del suelo (asociadas con vibraciones) por encima de los cuales es probable que se generen daños visibles en los elementos de una estructura. También cabe aclarar que las condiciones socioeconómicas y las normativas de cada país están directamente asociadas con los límites de vibraciones establecidos (una vivienda en un país desarrollado por lo general tendrá un comportamiento mecánico diferente al de una vivienda construida en un país en vía de desarrollo).

En conclusión, a pesar de servir como ayuda para evaluar los daños en edificaciones por vibraciones, los estudios hechos en Colombia están basados en los valores guías de normativa internacional donde las características estructurales y los procesos constructivos son distintos. Esto puede hacer que la evaluación llegue a ser imprecisa o inexacta.

3.3.1.1 DIN 4150-3:1999 Efecto de las vibraciones en estructuras

Esta norma alemana de vibración estructural evalúa la serviciabilidad de las edificaciones debido a los efectos de vibración incidente. Los niveles máximos absolutos de velocidad de vibración guías (sin ponderación) dependen del tipo de duración de los eventos (de larga duración o de corta duración), del tipo de estructura (clasificación) y de la frecuencia (para eventos de corta duración).

Tabla 7. Valores guía de velocidad de vibración para eventos de corta duración

| Ítem | Tipo de estructura | Valores guías de velocidad [mm/s] | | | |
|------|---|---|---------------|----------------|---|
| | | Vibración en la fundación en el rango de frecuencia | | | Vibración en el plano horizontal del piso más alto, a todas las frecuencias |
| | | 1 Hz - 10 Hz | 10 Hz - 50 Hz | 50 Hz - 100 Hz | |
| 1 | Edificaciones utilizadas con fines comerciales, edificaciones industriales y de diseño similar | 20 | 20 a 40 | 40 a 50 | 40 |
| 2 | Viviendas y edificaciones de diseño y/o de ocupación similar | 5 | 5 a 15 | 15 a 20 | 15 |
| 3 | Estructuras que debido a su particular sensibilidad a la vibración, no pueden ser clasificadas en los ítems 1 o 2 y que son de gran valor intrínseco (preservación) | 3 | 3 a 8 | 8 a 10 | 8 |

Fuente: DIN 4150-3:1999

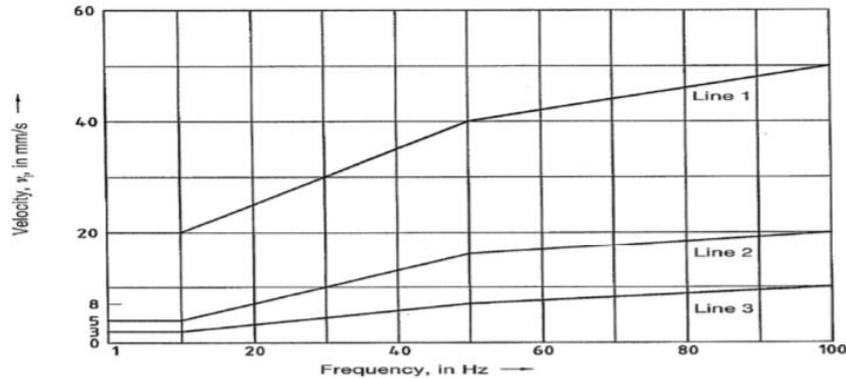


Figura 18. Curvas de valores guías de velocidad máxima de vibración en la cimentación para eventos de corta duración

Fuente: DIN 4150-3:1999

Tabla 8. Valores guía de velocidad máxima de vibración para eventos de larga duración

| Ítem | Tipo de estructura | Valores guía de velocidad [mm/s] para vibración horizontal en el piso más alto, a todas las frecuencias |
|------|---|---|
| 1 | Edificaciones utilizadas con fines comerciales, edificaciones industriales y de diseño similar | 10 |
| 2 | Viviendas y edificaciones de diseño y/o de ocupación similar | 5 |
| 3 | Estructuras que debido a su particular sensibilidad a la vibración, no pueden ser clasificadas en los ítems 1 o 2 y que son de gran valor intrínseco (preservación) | 2,5 |

Fuente: DIN 4150-3:1999

3.3.1.2 BS 7385-2:1993 Guía de niveles dañinos por vibración transmitida por suelo

Este estándar británico se enfoca en las vibraciones transmitidas por el suelo, evaluando su efecto en la estructura a fin de definir si podría ocurrir daño alguno (es decir, la posibilidad de daño producido por vibración). Los límites son presentados predominantemente para transientes de vibración que, al ser superados, podría resultar en daño cosmético. En caso de que se trate de un evento de larga duración y esté en el rango espectral de resonancia estructural (especialmente a bajas frecuencias), los valores guía presentados por el este estándar deben ser reducidos en un 50% mínimo.

Tabla 9. Valores guía de transientes de vibración (PPV) para daño cosmético

| Ítem | Tipo de construcción | Velocidad pico de partícula (PPV) en el rango de frecuencia del pulso predominante | |
|------|---|--|---------|
| | | 4 Hz - 15 Hz | > 15 Hz |
| 1 | Estructuras reforzadas o enmarcadas, edificaciones industriales y grandes edificaciones comerciales | 50 mm/s a 4 Hz y por arriba | |

| | | | |
|---|--|---|--|
| 2 | Estructuras sin refuerzo o livianas, residencias, edificaciones comerciales livianas | 15 mm/s a 4 Hz, incrementando hasta 20 mm/s a 15 Hz | 20 mm/s a 15 Hz incrementando hasta 50 mm/s a 40 Hz o por arriba |
|---|--|---|--|

Fuente: BS 7358-2:1993

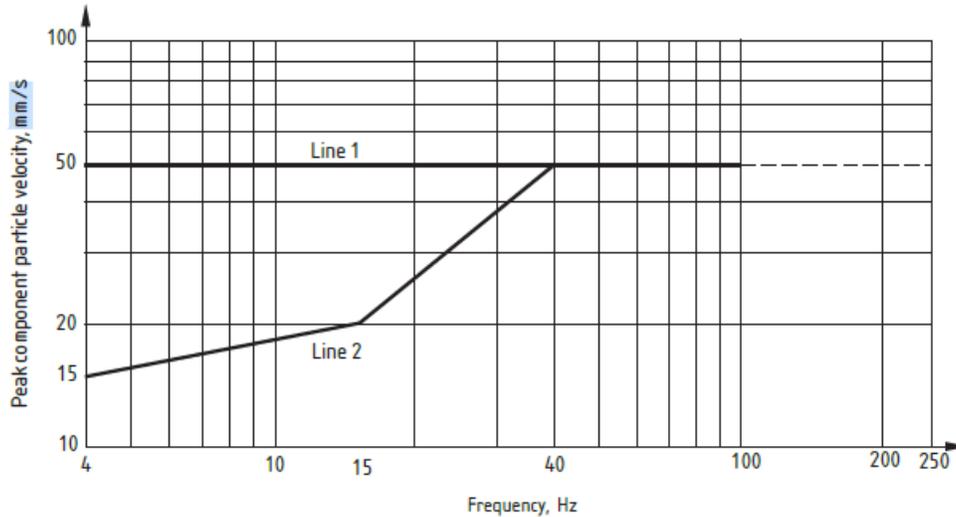


Figura 19. Curvas de valores guía de PPV para daño cosmético
Fuente: BS 7358-2:1993

3.3.1.3 Otros estándares internacionales

- AS 2187.2 (Estándar australiano)

Tabla 10. Valores guía de velocidad pico de partícula según el estándar AS 2187.2

| Tipo de edificación | PPV [mm/s] |
|---|------------|
| Hospitales, presas y edificios históricos | 5 |
| Edificios residenciales | 10 |
| Edificios comerciales e industriales de concreto reforzado o en acero | 25 |

Fuente: AS 2187.2:2006

- SN 640 (Normativa suiza)

Tabla 11. Valores guía de velocidad pico de partícula según la norma SN 640 312

| Tipo de edificación | PPV [mm/s] |
|---|------------|
| Edificios de interés arquitectónico o sensibles | 3 |
| Edificios en mampostería | 5 |
| Edificios en acero o en concreto reforzado | 12 |

Fuente: SN 640 312:1992

- PAN50 (Normativa escocesa)

Tabla 12. Valores umbrales para generar distintos tipos de daño según la norma PAN50

| Tipo de daño | Características | VPP [mm/s] | | |
|---------------------|--|------------|--------------|---------|
| | | < 4 Hz | 4 Hz - 15 Hz | > 15 Hz |
| Cosmético | Formación de grietas finas, crecimiento de grietas existentes en yeso | 15 | 20 | 50 |
| Menor | Formación de grietas largas, aflojamiento o caída de superficies en yeso | 30 | 40 | 100 |
| Mayor (estructural) | Daño en elementos estructurales | 60 | 80 | 200 |

Fuente: PAN50:2000

- UNE 22-381-93 (Normativa española)

Tabla 13. Valores máximos de vibración para la prevención de daños según norma UNE 22-381-93

| Tipo de estructura | Frecuencia principal [Hz] | | |
|--|---------------------------|---------------------|------------|
| | 2 Hz - 15 Hz | 15 Hz - 75 Hz | > 75 Hz |
| | PPV [mm/s] | Desplazamiento [mm] | PPV [mm/s] |
| I. Edificios y naves industriales ligeras con estructuras de hormigón armado o metálicas | 20 | 0,212 | 100 |
| II. Edificios de viviendas, oficinas, centros comerciales y de recreo, cumpliendo la normativa española. Edificios y estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que por su fortaleza no presenten especial sensibilidad a las vibraciones | 9 | 0,095 | 45 |
| III. Estructuras de valor arqueológico, arquitectónico o histórico que presenten una especial sensibilidad a las vibraciones por ellas mismas o por elementos que pudieran contener | 4 | 0,042 | 20 |

Fuente: UNE 22-381-93:1993

3.3.2 Evaluación de los efectos de las vibraciones en ocupantes de las edificaciones

La vibración estructural puede ser detectada por los ocupantes de las edificaciones llegando a afectar su confort y calidad de vida. Para evaluar los efectos de las vibraciones en los ocupantes de las edificaciones, se prefiere utilizar el valor total ponderado de la vibración. La experiencia en muchos países ha demostrado que la probabilidad de quejas por parte de ocupantes en edificios puede generarse tan sólo con magnitudes de vibración por encima del umbral de percepción cuyo valor ha sido generalizado como $0,015\text{m/s}^2$, pero realmente depende de la frecuencia y de la sensibilidad de la persona. También es probable que las magnitudes satisfactorias estén relacionadas con expectativas generales y con factores socioeconómicos. Las magnitudes aceptables de vibración no son determinados por factores como la salud a corto plazo o la eficiencia en el trabajo. La exposición a vibraciones inducidas por un período prolongado puede incluso producir familiarización en las personas haciendo que la adopten en su entorno e influyendo en los umbrales de comentarios adversos.

3.3.2.1 NTC 5436-2:2006 Evaluación de la exposición de los seres humanos a vibración en todo el cuerpo. Vibración en edificaciones (1 Hz - 80 Hz)

Esta norma técnica colombiana es una adopción idéntica (IDT) de la ISO 2631-2. No indica las magnitudes aceptables de vibración ni propone umbrales para la prevención de efectos adversos. Tampoco es aplicable a la evaluación de los efectos en la salud y seguridad de las personas. Provee una guía general de la exposición del ser humano a vibración de cuerpo completo y su objetivo principal es definir métodos para cuantificar vibración de

cuerpo completo en relación con la salud humana y el confort, la probabilidad de percepción y la incidencia de mareo. Esta norma utiliza la aceleración r.m.s. con frecuencia ponderada en bandas de 1/3 de octava como parámetro para expresar la magnitud de la vibración.

Se definen tres descriptores de exposición a vibraciones, todos calculados a partir del historial en tiempo de la aceleración ponderada de frecuencia. Esta norma propone diferentes ponderaciones de frecuencia que dependen del propósito de la evaluación y de la posición del ser humano. La ponderación W_k debe ser usada para vibraciones en la dirección de apoyo vertical (eje “z”) y la ponderación W_d para vibraciones en la dirección de apoyo horizontal (eje “x” y eje “y”)

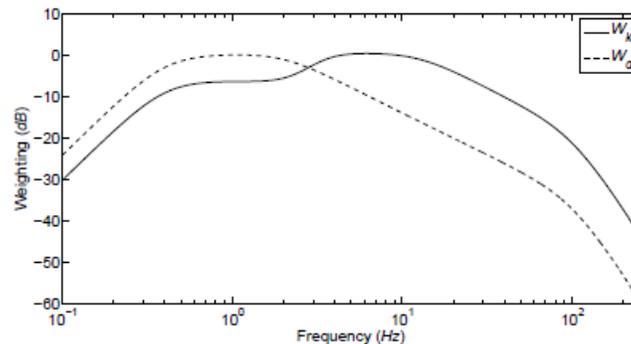


Figura 20. Curvas de la ponderación de frecuencia W_k y W_d

Fuente: NTC 5436-2:2006

Por otro lado, se define la ponderación de frecuencia (W_m) la cual es aplicable en el rango de frecuencia de 1Hz a 80 Hz y que permite caracterizar el lugar o sitio dentro de la edificación donde puede haber ocupación de personas, mediante el suministro de una indicación de conveniencia de ese lugar. Las ponderaciones de frecuencia presentadas en la ISO 2631-1 pueden ser usadas si se define la postura del ocupante (ver ISO 2631-1). El valor de la aceleración r.m.s. es comparado con los valores guía a fin de evaluar la molestia que pudiese causar en el ser humano (confort).

Tabla 14. Valores guía de aceleración r.m.s. para confort

| | |
|--|------------------------|
| $< 0,315 \text{ m/s}^2$ | Sin molestia |
| $0,315 \text{ m/s}^2 - 0,63 \text{ m/s}^2$ | Levemente molesto |
| $0,5 \text{ m/s}^2 - 1 \text{ m/s}^2$ | Moderadamente molesto |
| $0,8 \text{ m/s}^2 - 1,6 \text{ m/s}^2$ | Molesto |
| $1,25 \text{ m/s}^2 - 2,5 \text{ m/s}^2$ | Muy molesto |
| $> 2 \text{ m/s}^2$ | Extremadamente molesto |

Fuente: NTC 5436-1:2006

Tabla 15. Valores de la ponderación de frecuencia W_m para aceleración r.m.s. como entrada

| x | Frecuencia, Hz | | W_m Factor | W_m dB |
|----|----------------|---------|-----------------|-------------|
| | Nominal | Real | | |
| -7 | 0,2 | 0,199 5 | 0,0629 | -24,02 |
| -6 | 0,25 | 0,251 2 | 0,0994 | -20,05 |
| -5 | 0,314 5 | 0,316 2 | 0,156 | -16,12 |
| -4 | 0,4 | 0,398 1 | 0,243 | -12,29 |
| -3 | 0,5 | 0,501 2 | 0,368 | -8,67 |
| -2 | 0,63 | 0,631 0 | 0,530 | -5,51 |
| -1 | 0,8 | 0,794 3 | 0,700 | -3,09 |
| 0 | 1 | 1,000 | 0,833 | -1,59 |
| 1 | 1,25 | 1,259 | 0,907 | -0,85 |
| 2 | 1,6 | 1,585 | 0,934 | -0,59 |
| 3 | 2 | 1,995 | 0,932 | -0,61 |
| 4 | 2,5 | 2,512 | 0,910 | -0,82 |
| 5 | 3,15 | 3,162 | 0,872 | -1,19 |
| 6 | 4 | 3,981 | 0,818 | -1,74 |
| 7 | 5 | 5,012 | 0,750 | -2,50 |
| 8 | 6,3 | 6,310 | 0,669 | -3,49 |
| 9 | 8 | 7,943 | 0,582 | -4,70 |
| 10 | 10 | 10,00 | 0,494 | -6,12 |
| 11 | 12,5 | 12,59 | 0,411 | -7,71 |
| 12 | 16 | 15,85 | 0,337 | -9,44 |
| 13 | 20 | 19,95 | 0,274 | -11,25 |
| 14 | 25 | 25,12 | 0,220 | -13,14 |
| 15 | 31,5 | 31,62 | 0,176 | -15,09 |
| 16 | 40 | 39,81 | 0,140 | -17,10 |
| 17 | 50 | 50,12 | 0,109 | -19,23 |
| 18 | 63 | 63,10 | 0,0834 | -21,58 |
| 19 | 80 | 79,43 | 0,0604 | -24,38 |
| 20 | 100 | 100,0 | 0,0401 | -27,93 |
| 21 | 125 | 125,9 | 0,0241 | -32,37 |
| 22 | 160 | 158,5 | 0,0133 | -37,55 |
| 23 | 200 | 199,5 | 0,006 94 | -43,18 |
| 24 | 250 | 251,2 | 0,003 54 | -49,02 |
| 25 | 315 | 316,2 | 0,001 79 | -54,95 |
| 26 | 400 | 398,1 | 0,0008 99 | -60,92 |

NOTA x es el número de banda de frecuencia de acuerdo con la IEC 61260:1995.

Fuente: NTC 5436-2:2006

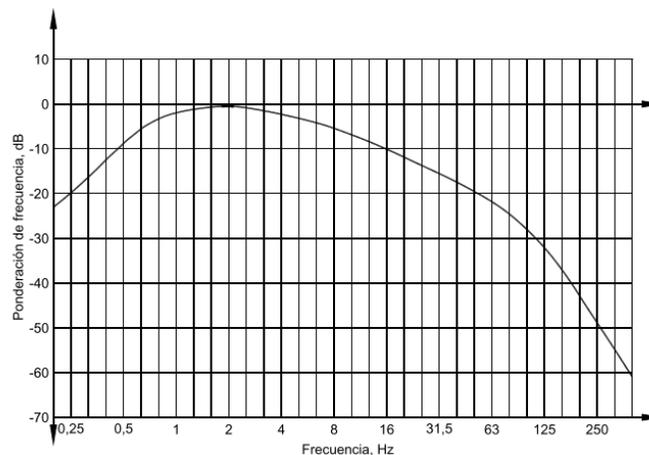


Figura 21. Curva de la ponderación de frecuencia W_m
Fuente: NTC 5436-2:2006

Existen varios métodos de evaluación:

a) Básico

El método de evaluación básico sugerido por esta norma es la raíz cuadrática media (r.m.s.) equivalente de energía, cuyo valor es calculado de la siguiente manera:

$$a_w = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt} \quad \text{Ec. 3}$$

donde,

$a_w(t)$: histórico de la aceleración ponderada

T : duración de $a_w(t)$ en segundos

La norma establece que los valores ponderados r.m.s. en cada dirección deben ser reportados por separado junto con un valor combinado obtenido por medio de la sumatoria de la raíz cuadrática de los valores ponderados en las tres direcciones, así:

$$a_v = \sqrt{a_{wx}^2 + a_{wy}^2 + a_{wz}^2} \quad \text{Ec. 4}$$

donde los términos a_{wx}^2 , a_{wy}^2 y a_{wz}^2 corresponden a la aceleración r.m.s. ponderada en los ejes ortogonales (x, y, z) respectivamente.

El factor de cresta es definido como la relación del valor pico instantáneo máximo de $a_w(t)$ y su valor r.m.s.; esta norma determina que este método de evaluación es suficiente cuando el factor de cresta de $a_w(t)$ es menor a nueve (9), de lo contrario sugiere dos descriptores alternativos de exposición a vibración diseñados para tener en cuenta los transientes y choques ocasionales.

b) Valor máximo de transiente de vibración (MTVV)

Este método alternativo es definido como el valor máximo de la evaluación r.m.s. en tiempo real de $a_w(t)$, calculado:

$$a_w(t_0) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0-T}^{t_0} a_w^2(t) dt} \quad \text{Ec. 5}$$

donde T es el tiempo de integración

El parámetro $a_w(t_0)$ es también definido como una integración exponencial, así:

$$a_w(t_0) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{-\infty}^{t_0} e^{\frac{t_0-T}{T}} a_w^2(t) dt} \quad \text{Ec. 6}$$

Se recomienda usar un valor de tiempo de integración de un segundo ($T = 1$) correspondiente a un tiempo de integración constante “slow” o lento.

El MTVV es definido como el valor máximo de $a_w(t_0)$ sobre un período de evaluación:

$$MTVV = \max [a_w(t_0)] \quad \text{Ec. 7}$$

El valor de este descriptor debe ser reportado junto con la aceleración r.m.s.

c) Valor de dosis de vibración (VDV)

Este método utiliza una integración de cuarta potencia del histórico de la aceleración, haciendo este descriptor más sensible a picos en la señal comparado con el promedio r.m.s. Debido a la integración de la cuarta potencia de la aceleración, su unidad es poco convencional [$\text{m/s}^{1.75}$] y es calculado de la siguiente manera:

$$VDV = \sqrt[4]{\int_0^T a_w^4(t) dt} \quad \text{Ec. 8}$$

El VDV también puede ser estimado de la siguiente manera:

$$eVDV = 1,4(a_w T^{0,25}) \quad \text{Ec. 9}$$

3.3.2.2 BS 6472:1992 Guía para evaluar la exposición del ser humano a vibración en edificaciones (1 Hz – 80 Hz)

Este estándar británico complementa la ISO 2631-2 por prescindir de suficiente información que permita realizar una apropiada evaluación de la respuesta humana a las vibraciones en edificaciones, proporcionando curvas de molestia como guía adicional. Las características principales de este estándar son:

- Especifica la aceleración r.m.s. como parámetro de medición y evaluación para eventos de larga duración y la velocidad de partícula (PPV) para eventos de corta duración (principalmente impulsivos) para mejor identificación de picos.
- Recomendamos registrar el histórico en tiempo de las vibraciones sin ponderación.
- Las funciones de ponderación de la ISO 2631-1 deben ser usadas siempre y cuando la orientación de los ocupantes en la edificación con respecto al entorno vibratorio sea constante y conocida.
- Presenta factores de multiplicación a ser usados con las curvas base a fin de especificar magnitudes satisfactorias de vibración estructural para que la respuesta humana (en términos de molestia) esté en niveles aceptables y se mitiguen las quejas por interferir con sus actividades.
- Proporciona curvas base de aceleración r.m.s. y velocidad pico de partícula (PPV) para vibración lateral (ejes “x” y “y”) y horizontal (eje “z”).

- Provee valores guía de aceleración r.m.s. ponderada correspondientes a baja probabilidad de comentarios adversos o quejas.
- Establece valores de dosis de vibración (VDV) guía (en $m/s^{1,75}$) por encima de los cuales se espera que se generen comentarios adversos en viviendas.
- Relaciona la ecuación para estimar la VDV a partir del valor de aceleración r.m.s.

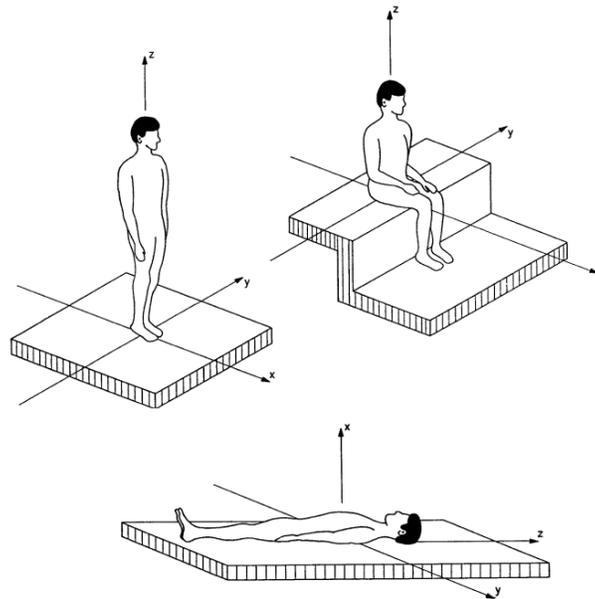


Figura 22. Direcciones del sistema de coordenadas basicéntrico para humanos bajo vibración

Fuente: BS 6472:1992



Tabla 16. Valores de aceleración de la curva base horizontal (izquierda) y lateral (derecha)

| Frequency | Acceleration (r.m.s.) | Frequency | Acceleration (r.m.s.) |
|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|
| Hz | m/s ² | Hz | m/s ² |
| 1 | 1.00×10^{-2} | 1 | 3.57×10^{-3} |
| 1.25 | 8.94×10^{-3} | 1.25 | 3.57×10^{-3} |
| 1.60 | 7.91×10^{-3} | 1.60 | 3.57×10^{-3} |
| 2.00 | 7.07×10^{-3} | 2.00 | 3.57×10^{-3} |
| 2.50 | 6.32×10^{-3} | 2.50 | 4.46×10^{-3} |
| 3.15 | 5.63×10^{-3} | 3.15 | 5.63×10^{-3} |
| 4.00 | 5.00×10^{-3} | 4.00 | 7.14×10^{-3} |
| 5.00 | 5.00×10^{-3} | 5.00 | 8.93×10^{-3} |
| 6.30 | 5.00×10^{-3} | 6.30 | 1.13×10^{-2} |
| 8.00 | 5.00×10^{-3} | 8.00 | 1.43×10^{-2} |
| 10.00 | 6.25×10^{-3} | 10.00 | 1.79×10^{-2} |
| 12.50 | 7.81×10^{-3} | 12.50 | 2.23×10^{-2} |
| 16.00 | 1.00×10^{-2} | 16.00 | 2.86×10^{-2} |
| 20.00 | 1.25×10^{-2} | 20.00 | 3.57×10^{-2} |
| 25.00 | 1.56×10^{-2} | 25.00 | 4.46×10^{-2} |
| 31.50 | 1.97×10^{-2} | 31.50 | 5.63×10^{-2} |
| 40.00 | 2.50×10^{-2} | 40.00 | 7.14×10^{-2} |
| 50.00 | 3.13×10^{-2} | 50.00 | 8.93×10^{-2} |
| 63.00 | 3.94×10^{-2} | 63.00 | 1.13×10^{-1} |
| 80.00 | 5.00×10^{-2} | 80.00 | 1.43×10^{-1} |

Fuente: BS 6472:1992

Tabla 17. Valores de velocidad de la curva base horizontal (izquierda) y lateral (derecha)

| Frequency | Velocity (peak) | Frequency | Velocity (peak) |
|-----------|-------------------------|-----------|-------------------------|
| Hz | m/s | Hz | m/s |
| 1 | 2.25×10^{-3} | 1 | 8.04×10^{-4} |
| 1.25 | 1.61×10^{-3} | 1.25 | 6.43×10^{-4} |
| 1.60 | 1.11×10^{-3} | 1.60 | 5.02×10^{-4} |
| 2.00 | 7.96×10^{-4} | 2.00 | } 4.02×10^{-4} |
| 2.50 | 5.69×10^{-4} | 2.50 | |
| 3.15 | 4.02×10^{-4} | 3.15 | |
| 4.00 | 2.81×10^{-4} | 4.00 | |
| 5.00 | 2.25×10^{-4} | 5.00 | |
| 6.30 | 1.79×10^{-4} | 6.30 | |
| 8.00 | } 1.41×10^{-4} | 8.00 | |
| 10.00 | | 10.00 | |
| 12.50 | | 12.50 | |
| 16.00 | | 16.00 | |
| 20.00 | | 20.00 | |
| 25.00 | | 25.00 | |
| 31.50 | | 31.50 | |
| 40.00 | | 40.00 | |
| 50.00 | | 50.00 | |
| 63.00 | | 63.00 | |
| 80.00 | 80.00 | | |

Fuente: BS 6472:1992

Tabla 18. Factores multiplicadores para especificación de nivel de vibración estructural en humanos

| Lugar | Horario | Factores multiplicadores | |
|---|----------|---|--|
| | | Exposición a vibración continua (16h día, 8h noche) | Vibración impulsiva (con más de 3 ocurrencias) |
| Áreas de trabajo crítico (hospitales, teatros, laboratorios de precisión) | Diurno | 1 | 1 |
| | Nocturno | 1 | 1 |
| Residencial | Diurno | 2 - 4 | 60 - 90 |
| | Nocturno | 1,4 | 20 |
| Oficinas | Diurno | 4 | 128 |
| | Nocturno | 4 | 128 |
| Talleres | Diurno | 8 | 128 |
| | Nocturno | 8 | 128 |

Fuente: BS 6472:1992

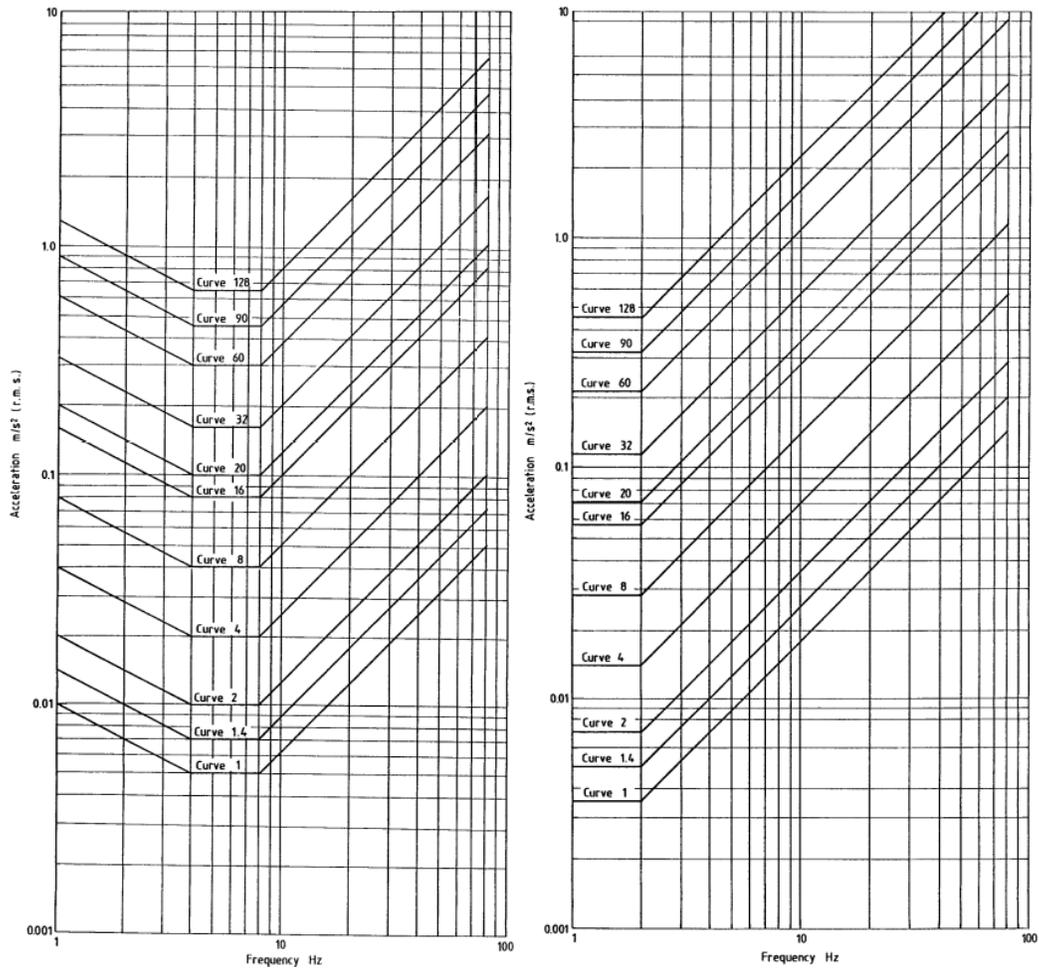


Figura 23. Curvas de aceleración para vibración estructural horizontal (izquierda) y lateral (derecha)

Fuente: BS 6472:1992

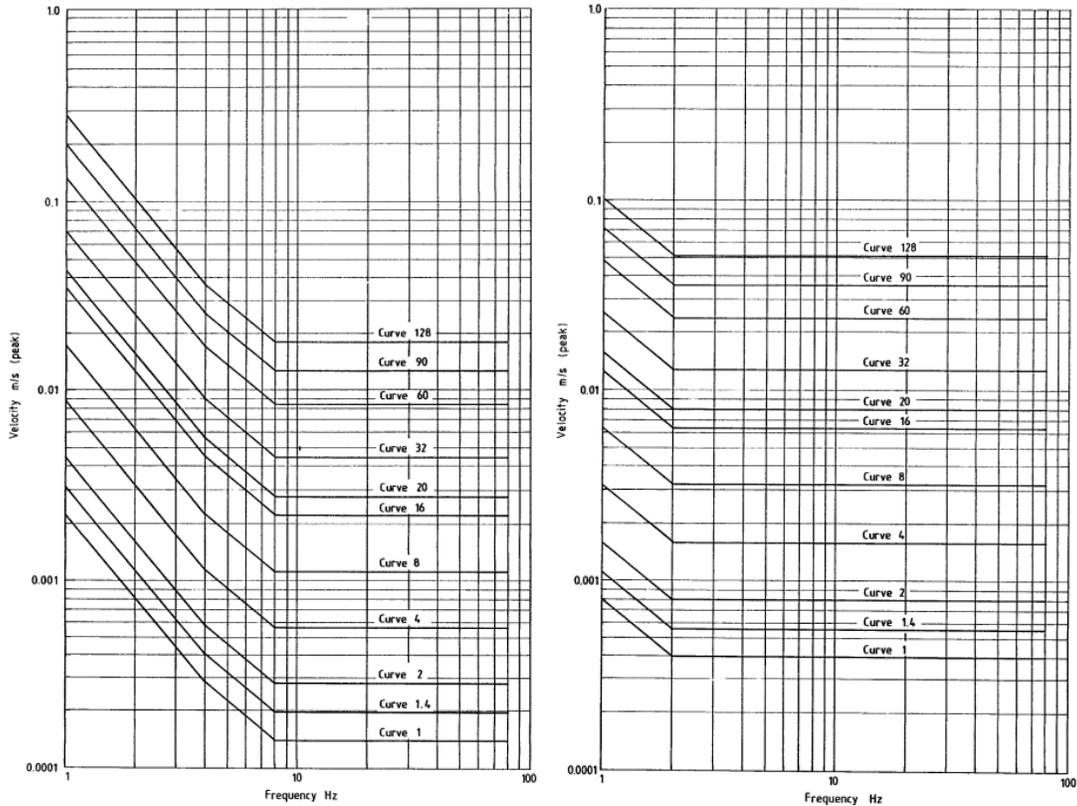


Figura 24. Curvas de PPV para vibración estructural horizontal (izquierda) y lateral (derecha)

Fuente: BS 6472:1992

Tabla 19. Aceleración r.m.s. ponderada correspondiente a baja probabilidad de quejas en viviendas

| Lugar | Períodos de exposición | | | | |
|-----------------------------|------------------------|-------------|--------------|-------------|--------------|
| | 16 horas | 1 hora | 225 segundos | 14 segundos | 0,9 segundos |
| Viviendas en horario diurno | 0,01 - 0,02 | 0,02 - 0,04 | 0,04 - 0,08 | 0,08 - 0,16 | 0,16 - 0,32 |

Fuente: BS 6472:1992

Tabla 20. VDV a partir de los cuales se esperarían quejas en viviendas

| Lugar | Generación de comentarios adversos o quejas | | |
|---------------------------|---|-----------|-----------|
| | Improbable | Posible | Probable |
| Viviendas (16 horas día) | 0,2 - 0,4 | 0,4 - 0,8 | 0,8 - 1,6 |
| Viviendas (8 horas noche) | 0,13 | 0,26 | 0,51 |

Fuente: BS 6472:1992

3.3.2.3 DIN 4150-2:1999 Exposición humana a la vibración en edificaciones

Esta normativa alemana determina el proceso para evaluar el efecto de vibraciones en humanos y cuyo cumplimiento evita cualquier tipo de molestia en viviendas o edificaciones similares. A partir de la velocidad medida, se obtiene un histórico ponderado $KB(t)$ aplicando la función de ponderación KB descrita como:

$$|H_{KB}(f)| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2}} \quad \text{Ec. 10}$$

donde,

f_0 : frecuencia de corte del filtro pasa alto (5,6 Hz)

f : frecuencia de excitación [Hz]

Esta función de ponderación es para una postura no especificada combinando elementos de la sensibilidad humana a la vibración en posición sentado y de pie. Si la función de ponderación fuese expresada en términos de aceleración, sería similar a la función de ponderación W_m definida en la ISO 2631-2. El valor r.m.s. de $KB(t)$ en tiempo real es determinado de la siguiente manera:

$$KB_T(t) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{\xi=0}^t e^{-\frac{t-\xi}{T}} KB^2(\xi) d\xi} \quad \text{Ec. 11}$$

Donde el tiempo de integración $T = 0,125$ segundos, correspondiente a un tiempo de integración constante "fast" o rápido.

A partir de este descriptor, varios parámetros son derivados tales como:

- KB_{Fmax} que corresponde al valor máximo de $KB_T(t)$ sobre todo el periodo de evaluación.
- KB_{FTi} que corresponde al valor máximo de $KB_T(t)$ obtenido por cada ciclo de 30 segundos (ventana).
- KB_{FTm} corresponde al valor r.m.s. de KB_{FTi} y es descrito como:

$$KB_{FTm} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N KB_{FTi}^2} \quad \text{Ec. 12}$$

donde, N es el número de ciclos (ventana de 30 segundos) en todo el período de evaluación.

- KB_{FTr} corresponde a la severidad de la vibración y es evaluado incluyendo o excluyendo períodos de descanso.

- La evaluación excluyendo períodos de descanso es descrita como:

$$KB_{FTTr} = KB_{FTm} \sqrt{\frac{T_e}{T_r}} \quad \text{Ec. 13}$$

donde,

T_e : período de evaluación (período diurno corresponde a 16 horas y nocturno a 8 horas, ver 4.1.1.2)

T_c : período de exposición por fuera de los períodos de descanso (ver 4.1.1.2)

O en caso de que el período de exposición total comprenda varios períodos parciales de exposición:

$$KB_{FTTr} = \sqrt{\frac{T_e}{T_r} \sum_j T_{e,j} KB_{FTm,j}^2} \quad \text{Ec. 14}$$

- La evaluación incluyendo períodos de descanso (ver 4.1.1.2) es descrita como:

$$KB_{FTTr} = \sqrt{\frac{T_e}{T_r} \sum_j T_{e1} KB_{FTm1}^2 + 2T_{e2} KB_{FTm2}^2} \quad \text{Ec. 15}$$

donde,

T_{e1} : tiempo de exposición por fuera de períodos de descanso

T_{e2} : tiempo de exposición en período de descanso

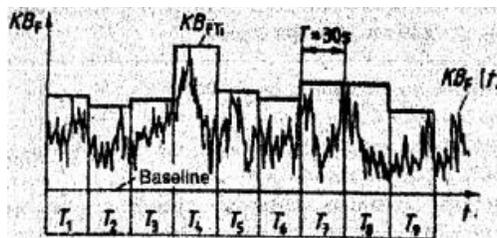


Figura 25. Parámetros en una señal registrada en un período de 4,5 minutos (9 ciclos)
Fuente: DIN 4150-2:1999

Los parámetros de KB_{Fmax} y KB_{FTTr} son comparados con los criterios de la Tabla 22 para determinar si los requerimientos de la norma son cumplidos o no.

Tabla 21. VDV a partir de los cuales se esperarían quejas en viviendas

| Ítem | Ubicación de la edificación | Día | | | Noche | | |
|------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | A_u | A_o | A_r | A_u | A_o | A_r |
| 1 | Completamente industrial | 0,4 | 6 | 0,2 | 0,3 | 0,6 | 0,16 |
| 2 | Predominantemente comercial | 0,3 | 6 | 0,15 | 0,2 | 0,4 | 0,1 |
| 3 | Comercial y residencial mezclado | 0,2 | 5 | 0,1 | 0,15 | 0,3 | 0,07 |

| | | | | | | | |
|---|--|------|---|------|-----|------|------|
| 4 | Predominantemente residencial | 0,15 | 3 | 0,07 | 0,1 | 0,2 | 0,05 |
| 5 | Áreas especialmente protegidas (como hospitales) | 0,1 | 3 | 0,05 | 0,1 | 0,15 | 0,05 |

Fuente: DIN 4150-2:1999

Los valores guía A_u y A_o son comparados con el parámetro KB_{Fmax} , mientras que los valores guía A_r son comparados con el parámetro KB_{FTT}

- Si $KB_{Fmax} \leq A_u$, los requerimientos de esta norma son cumplidos y no se espera molestia
- Si $KB_{Fmax} \geq A_o$, los requerimientos no son cumplidos y se esperaría molestia
- Para vibración de larga duración, si $A_u < KB_{Fmax} < A_o$, un parámetro adicional KB_{FTT} es comparado con A_r
- Si $KB_{FTT} < A_r$, los requerimientos son cumplidos
- Para vibración de corta duración, los requerimientos son cumplidos si $KB_{Fmax} \leq A_o$

3.4 INFORMACIÓN A REPORTAR EN LAS MEDICIONES

El reporte de medición debe incluir al menos la información que se lista a continuación.

d) Información general:

- Descripción de la fuente
- Tipo y condición de la estructura
- Motivo de la medición
- Referencia al estándar usado y tipo de investigación
- Condiciones del suelo
- Bosquejo del terreno o estructura a medir

e) Mediciones:

- Posición del transductor y tipo de acople
- Magnitud y duración de la medición
- Ajustes del equipo
- Tipo y marca del transductor, acondicionador de señal y equipo de registro
- Método, certificado y fecha de calibración de la instrumentación
- Rango de frecuencias y linealidad
- Evaluación del error de la fuente
- Puntos de medición, posicionamiento y localización del receptor
- Para fines de monitoreo, es suficiente registrar continuamente los valores de velocidad pico de partícula (PPV)
- Para investigación posterior, se debe disponer de registros históricos

f) Inspección de la estructura:

- Inspección de la estructura antes de la exposición con registro fotográfico de grietas y otros daños
- Inspección de la misma estructura después de la exposición a vibración

- Evaluación del daño observado
- g) Referencia a otros estándares internacionales relevantes

3.5 CONFIGURACIÓN DEL EQUIPO

En este capítulo se presentan las principales características del sistema, sus especificaciones técnicas de medición, las configuraciones y prerequisites para los casos de uso, entre otros. Para mayor información, remitirse al manual del equipo ORION 01dB.

3.5.1 Instalación y características del sistema ORION 01dB

El equipo ORION 01dB integra los instrumentos requeridos para conformar un sistema de medición completo compuesto por un (1) acelerómetro triaxial, sistema de registro de datos y sistema de visualización remota. El equipo cuenta con tres (3) canales internos de vibración, tres (3) canales externos de vibración y un (1) canal de micrófono de presión. La Tabla 24 presenta las principales especificaciones de medición del equipo.

Tabla 22. Especificaciones técnicas de medición

| | |
|----------------------|---|
| Tipo de transductor | Acelerómetro piezoeléctrico triaxial |
| Sensibilidad típica | 500 mV/g |
| Rango de frecuencia | 0,4 Hz – 1600 Hz \pm 10% (incertidumbre) |
| Rango de velocidad | 0,1 mm/s – 100 mm/s |
| Rango de aceleración | 2 mm/s ² – 100 mm/s ² |

Fuente: K2 Ingeniería S.A.S.

Este equipo se puede implementar en diferentes configuraciones, pero no todas son permitidas (dependen del entorno y el criterio a evaluar). Es esencial observar las normas de despliegue y seguridad que se aplican a cada caso de uso.

3.5.2 Configuraciones de medición

El sistema provee diferentes tipos de configuración inteligentes junto con umbrales de alarma acordes a estándares internacionales aplicables, según el criterio a evaluar de vibraciones en edificaciones.

- a) Configuración de protección en edificaciones:
 - DIN 4150-3
 - BS7358-2
 - BS5228-2
 - BS5228-4
 - CIR 23/07/1986
 - AM 22/09/1994
- b) Configuración de protección a ocupantes de las edificaciones:
 - DIN 4150-3

- ISO 2631-2:1989
- BS 6472-1:1992

3.5.3 Prerrequisitos para los casos de uso

Los casos de uso son descritos detalladamente y por ello el instrumento nunca debe estar con un caso de uso que no esté descrito ni permitido en el manual de usuario del equipo.

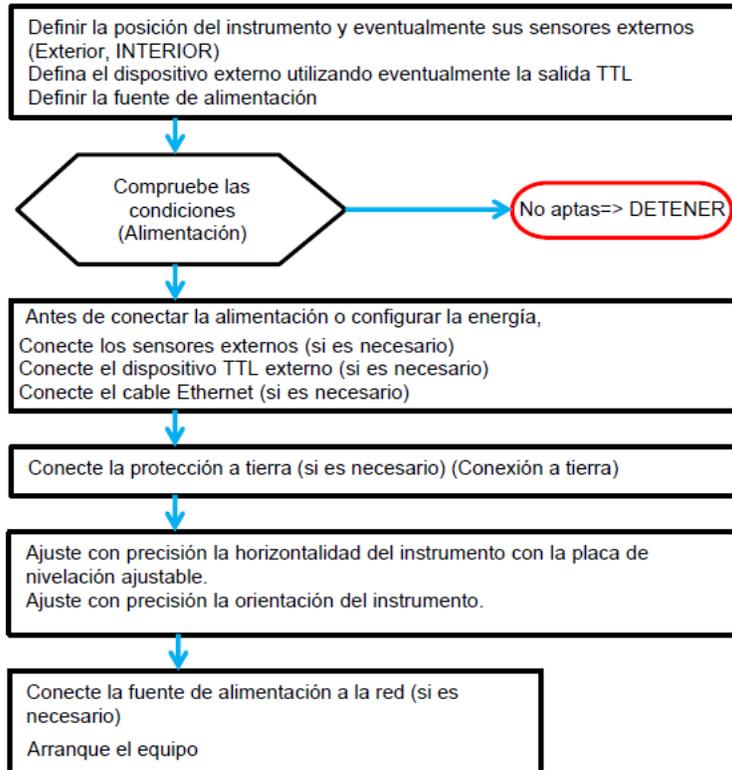


Figura 26. Diagrama de flujo para la instalación
Fuente: K2 Ingeniería S.A.S.

Tabla 23. Fuente de alimentación

| | Posición de la fuente de alimentación | Posición del equipo | Protección a tierra |
|--|---------------------------------------|---------------------|-------------------------|
| Batería Interna | Adentro o afuera | Adentro: permitida | Recomendada |
| | | Afuera: permitida | Estrictamente necesaria |
| Fuente alimentación estándar | Adentro solamente | Adentro: permitida | Recomendada |
| | | Afuera: permitida | Estrictamente necesaria |
| Fuente alimentación impermeable* | Adentro o afuera | Adentro: permitida | Recomendada |
| | | Afuera: permitida | Estrictamente necesaria |
| PoE de una fuente de alimentación PoE | Adentro solamente | Adentro: permitida | Recomendada |



| | | | |
|--|-------------------|----------------------|-------------|
| PoE sobre una red PoE existente | | Afuera: No permitida | - |
| | Adentro solamente | Adentro: permitida | Recomendada |
| | | Afuera: No permitida | - |

*Sólo se puede conectar la fuente de alimentación impermeable desde el exterior PoE (Alimentación a través de Ethernet)

Fuente: K2 Ingeniería S.A.S.

3.5.4 Consideraciones del sistema

Todos los circuitos externos conectados al ORION deben ser de tensión no peligrosa y las fuentes de energía deben ser limitadas según lo provisto por en la norma IEC61010-1. La protección a tierra es estrictamente necesaria para cada caso que se indica a continuación:

- El equipo ORION está fuera de un edificio.
- Uno o más sensores de ORION están fuera de un edificio.
- Uno o más cables están fuera de un edificio.
- Uno o más cables utilizan rutas donde hay otros cables.
- La salida TTL está conectada a un dispositivo alimentado por la red.

Sin embargo, para los otros casos, la protección a tierra se recomienda para una mejor seguridad. Si el equipo ORION está conectado a una red PoE existente, este PoE debe ser de un voltaje no peligroso y la fuente de energía debe ser limitada según lo provisto por la norma IEC61010-1. Si la salida TTL del instrumento ORION está conectada a un dispositivo, este dispositivo debe ser de tensión no peligrosa y la fuente de energía debe ser limitada en el sentido de la norma IEC61010-1. El dispositivo de alcance (WIFI, GSM-3G, GPS) se puede utilizar en cualquier lugar (respetando las regulaciones nacionales, RED, FCC, IC).

3.5.5 Conexión a tierra

La conexión a tierra de protección es posible en el terminal del tornillo usando el cable. El par (torque) recomendado es de 3 N-m. El otro lado del cable de tierra debe estar conectado a una tierra protectora de buena calidad. La integridad de la unión protectora debe corresponder a la norma IEC61010-1 (véase 6.5.2 Protección adhesiva). Para la situación exterior, la tierra de protección puede utilizar una barra de tierra sólida de acero galvanizado. La varilla debe ser enterrada por lo menos 60 cm. El suelo debe estar mojado permanentemente. Si es necesario, rocíe agua en el tiempo para mantener la humedad.



Figura 27. Sistema de conexión a tierra
Fuente: K2 Ingeniería S.A.S.

3.5.1 Software de procesamiento

El software para procesamiento digital de datos es el dBTrait el cual permite presentar un histórico de mediciones, el histórico de una banda de frecuencia espectral asociado a cálculos estadísticos, análisis de frecuencia, comparación de umbrales normativos con curvas límite e informes de medición, entre otras funcionalidades. Adicionalmente, el dBTrait incorpora normativa de legislación internacional (incluyendo la francesa) a fin de comparar el resultado de las mediciones con los umbrales de nivel de vibración a fin de facilitar la interpretación de los datos, identificar los niveles excedidos y buscar alternativas de prevención según el criterio a evaluar.

3.6 RESUMEN

3.6.1 Diagrama de flujo



3.6.2 Proceso de medición

- Revisar la condición física del sensor.
- Garantizar que la señal de interés no tenga afectación o interferencia de fuentes adicionales.
- Determinar el número de transductores y su posicionamiento.
- Para edificaciones más altas que 12 m, se deben determinar puntos adicionales cada 12 m o en el piso más alto de la estructura. Para edificaciones de más de 10 m de longitud, se deben determinar puntos intermedios de posición (deben ser al menos tres: dos en las extremidades y una en el centro).
- Identificar la fuente de vibración con respecto a la edificación a medir.
- Orientar el transductor en la dirección de excitación y posicionarlo en el punto en el que se espera la mayor vibración (punto central)
- Garantizar una relación señal-ruido de 5 dB

- h) Elegir el método de montaje apropiado (acoplado el sensor a superficies duras y estables, preferiblemente en la cimentación, base o centro de la pared de mampostería)
- i) Realizar la medición a menos de 0,5 m del suelo cuando no sea posible realizarla en terreno
- j) Para medir vibración del suelo, utilizar clavos los cuales deben estar enterrados para garantizar rigidez
- k) Llevar a cabo mediciones en los tres (3) ejes ortogonales (x, y, z) para cada punto de medición
- l) Se debe procurar realizar el montaje con una base a fin de garantizar la firmeza y mejor acople
- m) Garantizar que el sistema de medición (sensor + accesorios de montaje) no representen más del 1% de la masa total de la estructura a la cual se esté acoplado para medir.
- n) Evitar mediciones en pisos con revestimientos flexibles
- o) Determinar períodos de medición satisfactorios que representen el fenómeno vibratorio (es preferible que la duración de la medición sea múltiplo de 30 por la ventana de ciclos para evaluación). Se puede guiar de los tiempos establecidos en la Tabla 7.
- p) Inspeccionar visualmente la condición de la estructura y reportarla.

4. DOCUMENTOS RELACIONADOS

| NORMA / CÓDIGO DOCUMENTO | DESCRIPCIÓN |
|--------------------------|--|
| BS 6472 | Evaluation of human exposure to vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz) |
| BS 7385-1 (ISO 4866) | Evaluation and measurement for vibration in buildings - Pt.1: Guide for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings |
| BS 7385-2 | Evaluation and measurement for vibration in buildings - Pt.2: Guide to damage levels from ground-borne vibration |
| DIN 4150-2 | Structural vibration. Pt.2: Human exposure to vibration in buildings |
| DIN 4150-3 | Structural vibration. Pt.3: Effects of vibration on structures |
| DIN 45669-1 | Measurement of vibration immission - Part 1: Vibration meters - Requirements and tests |
| DIN 45669-2 | Measurement of vibration immission - Part 2: Measuring method |
| ISO 2631-1 y NTC 5436-1 | Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole body vibration. Pt.1: General Requirements |
| ISO 2631-2 y NTC 5436-2 | Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole body vibration. Pt.2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz) |



AERONÁUTICA CIVIL
UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL

TÉRMINOS DE REFERENCIA EN ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PARA EL
AEROPUERTO INTERNACIONAL EL DORADO

Metodología Vibraciones



AERONÁUTICA CIVIL
UNIDAD ADMINISTRATIVA ESPECIAL

| | |
|------------|---|
| ISO 4866 | Mechanical vibration and shock - Vibration of fixed structures. Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effect on structures |
| BS 5228-2 | Code of practice for noise and vibration control on construction and open sites. Pt.2: Vibration |
| ISO 5348 | Mechanical vibration and shock - Mechanical mounting of accelerometers |
| ISO 8041-1 | Human response to vibration - Measuring instrumentation. Pt.1: General purpose vibration meters |
| ISO 2954 | Requirements for instruments for measuring vibration severity |