



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Evaluación de la exposición humana a la vibración

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A N

Brenda Berenice Lázaro Bosques

Mauro Miguel de Jesús García Enríquez

DIRECTOR DE TESIS

M.C. Miguel Rodríguez González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Dedicatoria ...
धन्यवाद

मेरे लिए

A todos aquellos que nos han impulsado

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro sincero agradecimiento al Maestro Miguel Rodríguez por ser una guía invaluable durante nuestra estancia en el Instituto.

Asimismo, agradecemos al Instituto de Ingeniería por proporcionarnos el apoyo necesario, así como las herramientas, equipos y conocimientos indispensables para la realización de este trabajo. Nuestro reconocimiento también se extiende a nuestros amigos, colegas y superiores, cuya colaboración y apoyo fueron fundamentales para hacer posible este proyecto. Además, deseamos agradecer a nuestras familias por su constante apoyo, comprensión y ánimo durante todo este proceso. Su respaldo incondicional ha sido una fuente de inspiración y motivación para nosotros.

Índice general

Agradecimientos	II
1 Introducción	1
2 Justificación	4
3 Marco Teórico	6
§3.1 Vibración que produce pérdida de confort	8
§3.2 Fuentes emisoras de vibración: magnitud y exposición	11
§3.3 Exposición a la vibración	14
§3.3.1 Atenuación de la vibración al propagarse en el suelo	14
§3.3.2 Vibración en edificios	15
§3.4 Respuesta humana a la vibración	16
§3.5 Determinación de los límites de percepción.	22
§3.6 Normatividad internacional	28
§3.6.1 ISO 2631-1 y 2631-2	29
§3.6.2 BS 6472	29
§3.6.3 BS 6841	30
§3.6.4 DIN 4150	30
§3.7 Curvas base de aceleración	33
§3.8 Curvas de ponderación	36
4 Metodología	41
§4.1 Evaluación de la vibración mediante el software EViiCON	41
§4.2 CASO 1: Planificación del proyecto- CCUT	44

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	IV
§4.2.1 Condiciones geológicas:	44
§4.2.2 Equipo utilizado y mediciones	45
§4.3 CASO 2: Sistema de Transporte Público CDMX	50
§4.3.1 Objetivos	50
§4.3.2 Selección de equipos	51
§4.3.3 Mediciones y ubicación de los celulares	51
§4.4 Procesamiento	53
§4.4.1 CASO 1: Centro cultural universitario Tlatelolco	53
§4.4.2 Transporte público	70
5 Resultados	73
§5.1 Centro Cultural Universitario Tlatelolco	73
§5.1.1 Evaluación de los registros de aceleración	74
§5.1.2 Evaluación de los registros de velocidad	80
§5.2 Sistema de transporte colectivo de la Ciudad de México	88
6 Conclusiones	90
§6.1 Conclusiones y trabajo a futuro	90
§6.1.1 Limitaciones del estudio y consideraciones ambientales y externas del CCUT	91
§6.1.2 STC	92
§6.1.3 Conclusiones finales	92
Anexos	103
Apéndices	114
§A Vibración de cuerpo entero	114
§A.1 Respuesta humana a la vibración.	114
§A.2 Mareo	116
§B Ejes de medición	118
§C Ponderaciones	120
§C.1 Resumen de filtro RC	120

§C.2	Ponderación W_b	123
§C.3	Ponderación W_c	124
§C.4	Ponderación W_d	125
§C.5	Ponderación W_e	126
§C.6	Ponderación W_f	127
§C.7	Ponderación W_g	128
§C.8	Ponderación W_h	129
§C.9	Ponderación W_j	130
§C.10	Ponderación W_k	131
§C.11	Ponderación W_m	132
§C.12	Función de transferencia $H_{Bnom}(f)$ para registros de velocidad . . .	133
§D	Filtros	134
§E	Descriptores	138
§E.1	Factor de Cresta (FC)	138
§E.2	Aceleración r.m.s. (a_w)	138
§E.3	Aceleración operante lenta ($A_w(t_0)$)	139
§E.4	MTVV	140
§E.5	EMA- Evaluating Moving Average	140
§E.6	Nivel de Aceleración (L_w)	141
§E.7	Valor de Dosis de Vibración (VDV)	141
§E.8	Severidad de vibración KB_F y evaluación de la severidad de vibra- ción KB_{FTR}	143
§F	Filtro de Tercio de Octava	144
§G	Corrección instrumental	145
§G.1	Corrección instrumental en el dominio del tiempo	146
§G.2	Factor de corrección	147

Índice de figuras

3.1 Rangos de I_{MM} , aceleración y velocidad máxima establecidos para movimientos fuertes, confort, nivel de percepción y la sensibilidad instrumental.	8
3.2 Categorización de los tipos de movimiento oscilatorio.	12
3.3 Ejemplos de formas de onda para diferentes tipos de movimiento oscilatorio (Modificado de Griffin, 1990).b) Fragmento del movimiento oscilatorio dentro del autobús bi-articulado del Metrobús en un trayecto de lo largo de la línea 1 .c)Fragmento del movimiento oscilatorio en el comboy del Metro medido a lo largo de un trayecto en la línea 3. d)Movimiento oscilatorio en las cimentaciones por maquinaria.(Tomada de la DIN 4150-3)	13
3.4 Ilustración de los efectos de la frecuencia y magnitud de vibración en la escritura.	17
3.5 Modelo mecánico del cuerpo humano	22
3.6 Contornos de confort.	25
3.7 Escala de la perceptibilidad de vibración sinusoidal de baja magnitud definida en la norma BS 6841	26
3.8 Representación simple de los efectos de la frecuencia de vibración: (a) Cambio en la aceleración asociado con sobreaceleración constante, aceleración, velocidad y desplazamiento; (b) Formación de un contorno mostrando las magnitudes de vibración en diferentes frecuencias que causan efectos similares.	28
3.9 Diagrama de flujo de la norma din 4150-2 para la evaluación de la severidad de vibración.	32
3.10 Límites reducidos para el confort para vibración traslacional definido en la norma internacional ISO 2631.	35

3.11 Límites reducidos para el confort para vibración traslacional definido en la norma internacional ISO 2631.	37
3.12 Reacciones subjetivas a diversas frecuencias y magnitudes de vibración sinusoidal de todo el cuerpo.	38
3.13 Curva de ponderación W_d	39
4.1 Diagrama de flujo del sistema EViiCON	43
4.2 Mapa de iso-periodo actualizado para la ciudad de México. Valores en segundos.)	45
4.3 Ubicación de los sismómetros (triángulos negros).	47
4.4 Ubicación de los sistemas de transporte donde se realizaron mediciones de aceleración.	50
4.5 Diagrama de un vagón del metro.	52
4.6 Diagrama del autobús biarticulado del Metrobús.	52
4.7 Diagrama del tren ligero.	53
4.8 Diagrama del una combi.	53
4.9 Cálculo del factor de corrección	56
4.10 Comparación entre correcciones instrumentales.	57
4.11 Ejemplo de conversión de registro de velocidad a aceleración y sus espectros de amplitud.	58
4.12 Registro de tambor del 18 de mayo de 2024.	59
4.13 Registro de aceleración domingo 19 de mayo 3 am (UTC), componente E.	60
4.14 Espectrograma del registro de aceleración Domingo a las 3 a.m. UTC	61
4.15 KBF por ventanas	61
4.16 Acelerograma, a r.m.s. y MTVV del registro del día 19 de mayo.	62
4.17 Espectros calculados de un registro de aceleración en tercios de octava.	63
4.18 Espectros calculados de un registro de velocidad en tercios de octava.	63
4.19 Espectro del registro del domingo 19 de mayo- Componente N.	64
4.20 Espectro del registro del domingo 19 de mayo- Componente E.	64
4.21 Acercamiento a la envolvente de Hilbert.	65

4.22	Envolvente de Hilbert.	66
4.23	Histograma a r.m.s.	67
4.24	Histograma de MTVV.	67
4.25	Histograma de VDV.	68
4.26	Histograma de KBFmax.	69
4.27	Histograma de KBFtr.	69
4.28	Componente N de los registros obtenidos para los diferentes medios de transporte.	70
4.29	Acercamiento a r.m.s operante para el Metro componente N	71
4.30	Acercamiento a r.m.s operante para el Metrobus componente N	72
5.1	Valor de Dosis de Vibración para la evaluación total.	75
5.2	Aceleración r.m.s. ponderada para la evaluación total.	76
5.3	VDV para el sensor T6N62 ubicado en la cocina del rector en el piso 20.	77
5.4	VDV para el sensor T6N62 ubicado en la cocina del rector en el piso 20.	77
5.5	VDV para el sensor T6N65 ubicado en el sótano.	78
5.6	VDV para el sensor T6N67 ubicado en la explanada.	79
5.7	VDV para el sensor T6N82 ubicado en las escaleras SW en el piso 10.	80
5.8	Severidad de vibración KBF por hora para el sótano.	81
5.9	Severidad de vibración KBftr por hora para el sótano.	81
5.10	Severidad de vibración KBF por hora para el campo libre.	82
5.11	Severidad de vibración KBftr por hora para el campo libre.	83
5.12	Severidad de vibración KBF por hora para el piso 10.	84
5.13	Severidad de vibración KBftr por hora para el piso 10.	84
5.14	Severidad de vibración KBF por hora para el piso 20.	85
5.15	Severidad de vibración KBftr por hora para el piso 20.	85
5.16	Representación bidimensional de la distribución de los valores de VDV (a, b y c) y de KBFmax (d, e y f).	87
5.17	Valor de Dosis de Vibración para los sistemas de transporte público.	89
1	VDV para el sensor T6N50 ubicado en las oficinas en el piso 10	103

2	VDV para el sensor T6N52 ubicado en el sótano	104
3	VDV para el sensor T6N57 ubicado en la oficina del rector en el piso 20 . .	104
4	VDV para el sensor T6N61 ubicado en la oficina del sótano	105
5	KBFmax para el sensor T6N50 ubicado en las oficinas en el piso 10	105
6	KBFtr para el sensor T6N50 ubicado en las oficinas en el piso 10	106
7	KBFmax para el sensor T6N52 ubicado en el sótano	106
8	KBFtr para el sensor T6N52 ubicado en el sótano	107
9	KBFmax para el sensor T6N57 ubicado en la oficina del rector en el piso 20	107
10	KBFtr para el sensor T6N57 ubicado en la oficina del rector en el piso 20 .	108
11	KBFmax para el sensor T6N61 ubicado en la oficina del sótano	108
12	KBFtr para el sensor T6N61 ubicado en la oficina del sótano	109
13	KBFmax para el sensor T6N62 ubicado en la cocina de la oficina en el piso 20	109
14	KBFtr para el sensor T6N62 ubicado en la cocina de la oficina en el piso 20	110
15	KBFmax para el sensor T6N65 ubicado en el sótano	110
16	KBFtr para el sensor T6N65 ubicado en el sótano	111
17	KBFmax para el sensor T6N67 ubicado como campo libre	111
18	KBFtr para el sensor T6N67 ubicado como campo libre	112
19	KBFmax para el sensor T6N82 ubicado las escaleras del piso 10	112
20	KBFtr para el sensor T6N82 ubicado las escaleras del piso 10	113
21	Factores que afectan la aceptabilidad de la vibración en edificios.	115
22	Modelo conceptual de los factores involucrados en causar mareo.	117
23	Sistema vestibular.	118
24	Sistema basicéntrico de 12 ejes.	119
25	Diagrama de un circuito RC.	121
26	Función de transferencia de un filtro RC.	121
27	Curva de ponderación Wb.	123
28	Curva de ponderación Wc.	124
29	Curva de ponderación Wd.	125
30	Curva de ponderación We.	126

31	Curva de ponderación W_f .	128
32	Curva de ponderación W_g .	129
33	Curva de ponderación W_h .	130
34	Curva de ponderación W_j .	131
35	Curva de ponderación W_k .	132
36	Curva de ponderación W_m .	133
37	Amplitud nominal para el filtro HBnom.	134

Índice de tablas

3.1	Elementos de vibración indirecta con los que interactúan los humanos . . .	14
3.2	Conversión entre desplazamiento, velocidad y sobreaceleración para aceleración en términos de frecuencia para movimientos sinusoidales. Tomado de Griffin,1990	26
3.3	Valores guía para la evaluación de la vibración establecidos en la norma din 4150-2 (1999) durante el día. Modificado de DIN 4150-2 (1999)	32
3.4	Intensidad aproximada de la percepción y niveles de incomodidad de varias magnitudes de vibraciones ponderada.	36
3.5	Coefficientes de la ponderación Wd definidos en la ISO 2631	38
3.6	Coefficientes de la ponderación Wd definidos en la BS 6841	38
3.7	Ponderaciones de aceleración y velocidad en función de los rangos de frecuencia.	40
3.8	Filtros para cada ponderación.	40
4.1	Descriptores de vibración definidos en la norma ISO 2631-1, BS 6841 y DIN 4150.	42
4.2	Descripción de la ubicación de los sensores.	48
5.1	Evaluación total componente N.	74
5.2	Evaluación total componente E.	75
5.3	Evaluación total componente V (Z).	75
5.4	Análisis total de los registros de velocidad por sensor y componente	86
5.5	Evaluación por hora para la componente N en los sistemas de transporte. .	88
5.6	Evaluación por hora para la componente E en los sistemas de transporte .	88

5.7	Evaluación por hora para la componente Z en los sistemas de transporte	89
1	Notación usado para referirse a los ejes de vibración con respecto al cuerpo.	120
2	Coeficientes de la ponderación Wb definidos en la BS 6841	123
3	Coeficientes de la ponderación Wc definidos en la ISO 2631	124
4	Coeficientes de la ponderación Wc definidos en la BS 6841	125
5	Coeficientes de la ponderación Wd definidos en la ISO 2631	126
6	Coeficientes de la ponderación Wd definidos en la BS 6841	126
7	Coeficientes de la ponderación We definidos en la ISO 2631	127
8	Coeficientes de la ponderación We definidos en la BS 6841	127
9	Coeficientes de la ponderación Wf definidos en la ISO 2631	128
10	Coeficientes de la ponderación Wf definidos en la BS 6841	128
11	Coeficientes de la ponderación Wg definidos en la BS 6841	129
12	Coeficientes de la ponderación Wh definidos en la BS 6841	130
13	Coeficientes de la ponderación Wj definidos en la ISO 2631	131
14	Coeficientes de la ponderación Wk definidos en la ISO 2631	132
15	Coeficientes de la ponderación Wm definidos en la ISO 2631	133
16	Combinación de filtros de la norma británica BS 6841 y la norma interna- cional ISO 2631 para las ponderaciones.	137
17	Valores de Valor de Dosis de Vibración(VDV).	142

Capítulo 1

Introducción

¿Cuál es el impacto de residir en una ciudad tan activa en la salud corporal? ¿Existe una correlación entre la vida urbana agitada y el aumento del riesgo de enfermedades o malestares físicos? En el trasfondo de nuestras vidas urbanas, las vibraciones que se filtran desde el bullicio de la ciudad hacia nuestros hogares y lugares de trabajo son un fenómeno constante, aunque a menudo pasado por alto. Estas vibraciones, originadas en el tráfico vehicular, la actividad de construcción y el uso de herramientas mecánicas, pueden tener un impacto notable en nuestro bienestar y en la comodidad de nuestra vida diaria.

Partiendo de esta problemática, surge la necesidad de comprender cómo estas vibraciones impactan en el cuerpo humano y qué medidas podemos tomar para mitigar sus efectos. El tema central de este estudio es la evaluación de las vibraciones en edificaciones y su influencia en la salud y el bienestar de las personas y el objetivo principal es desarrollar herramientas computacionales con las cuales poder evaluar los niveles de vibración en diferentes contextos partiendo del análisis de descriptores del movimiento del terreno definidos en las normas ISO 2631, BS 6841 y DIN 4150, las cuales se abordan en profundidad en . Para respaldar esta afirmación, se consideran tres puntos clave: la importancia de establecer niveles máximos permisibles de vibración, el desarrollo del programa **EViiCON** mediante el uso de Python para evaluar registros de aceleración y velocidad, y la aplicación práctica de estas herramientas en diversos escenarios urbanos, como el sistema de transporte colectivo de la Ciudad de México en edificaciones con uso de oficinas y zonas residenciales.

La necesidad de establecer niveles máximos permisibles de vibración se justifica con base a la preservación de la salud pública y la calidad de vida de los habitantes urbanos. La exposición prolongada a niveles excesivos de vibración puede provocar una serie de efectos adversos para la salud, que van desde trastornos musculoesqueléticos hasta trastornos del sueño y estrés crónico. Por lo que establecer límites adecuados es fundamental para prevenir riesgos para la salud.

El desarrollo del programa **EViiCON** en Python representa un avance significativo en la evaluación de vibraciones en edificaciones. Esta herramienta proporciona una forma eficiente y precisa de analizar registros de aceleración y velocidad, lo que permite identificar patrones de vibración y evaluar su impacto en la salud humana. Además, al ser una herramienta computacional, facilita la aplicación práctica de medidas correctivas y como apoyo en el diseño de soluciones ingenieriles para reducir la transmisión de vibraciones.

La aplicación práctica de estas herramientas en la Ciudad de México demuestra la relevancia y utilidad de este enfoque. Al evaluar y limitar los niveles de vibración en entornos urbanos reales, podemos mejorar la calidad de vida de los residentes y mitigar los riesgos asociados con la vida urbana agitada.

En síntesis, la evaluación y control de las vibraciones en edificaciones es crucial para garantizar la salud y el confort de las personas que habitan en entornos urbanos, y el desarrollo de herramientas computacionales como **EViiCON** representa un paso significativo en esta dirección. Es fundamental seguir investigando y desarrollando soluciones innovadoras para abordar este desafío creciente y mejorar la salud y el bienestar en las ciudades del futuro.

Objetivos

- Evaluar el impacto de las vibraciones en las personas dentro de edificaciones y durante actividades rutinarias.
- Calcular los descriptores de las vibraciones débiles mediante la definición de parámetros específicos incluidos en la normativa internacional vigente.
- Desarrollar un sistema integral de evaluación de vibraciones en donde se realice el procesamiento de datos y la comparación con la normatividad nacional e internacional.

Capítulo 2

Justificación

La evaluación de la vibración en México aún no está regulada de manera adecuada, pues aunque se menciona en las Normas Técnicas Complementarias de Construcción de la Ciudad de México, 2023 que no deben excederse ciertos límites de vibración, los criterios ahí expuestos están basados en la normatividad internacional, sin que exista un precedente sobre cómo realizar e interpretar este tipo de estudios en una ciudad con las características específicas de la CDMX. Por esto, es importante desarrollar e implementar una Norma Mexicana de Vibración, cuya necesidad se menciona especialmente en los cursos de sismología aplicada a la ingeniería civil. Cuando se habla de vibración, se suele valorar su potencial de causar daños estructurales, menospreciando las consecuencias que a largo plazo pudieran acarrear los movimientos débiles en las edificaciones (daño por fatiga) y menos aún se presta atención a su efecto en las personas que harán uso de esas estructuras y para quienes fueron diseñadas. Se ha demostrado que la vibración puede impactar de manera negativa a las personas, generando desde molestias leves como mareos o dolores de cabeza, hasta consecuencias más graves como trastornos musculoesqueléticos, perdiendo sensibilidad movimiento. Son muchos los estudios realizados con el propósito de identificar y prevenir estos daños en personas que manejan equipo mecánico, pero sólo hasta recientemente se ha comenzado a estudiar los efectos de vibraciones débiles causados principalmente por tránsito de vehículos, que si bien todo dependerá de la intensidad y duración de la exposición a la vibración, es necesario evaluar el nivel de esta para poder garantizar la salud y bienestar de las personas expuestas a la vibración.

Las vibraciones de baja magnitud dentro de edificaciones están categorizadas según su intensidad y su duración, pudiendo ser constante, transitoria o repentina, asociada al flujo vehicular o de transporte público, o a actividades relacionadas con la construcción o detonaciones. El método propuesto en esta tesis sirve para tener una referencia detallada de los niveles de vibración y poder tomar decisiones ingenieriles considerando las normas internacionales. Este procedimiento que proponemos y el programa EViiCON que creamos pueden ser adaptados fácilmente una vez que se cuente con una norma de la CDMX acorde a sus características.

Capítulo 3

Marco Teórico

El rango de vibraciones que afecta una sociedad industrial es amplio. Las vibraciones comunes con movimientos fuertes, a los que estamos expuestos en nuestro país, son los sismos. Para clasificar el nivel de vibración a la que se está expuesto a una separación dada del hipocentro y en un entorno geológico particular se utiliza la escala de intensidades Mercalli Modificada (I_{MM}) que es una forma de valorar cualitativamente la exposición a la vibración mecánica generada por sismos en un lugar determinado. La escala establece doce grados de intensidad que cubren un rango amplio de efectos generados por el movimiento (Wood y Neumann, 1931).

Diversos esfuerzos se han hecho para tratar de relacionar los grados de intensidad en la escala de Mercalli Modificada con la velocidad y la aceleración de la vibración. La relación propuesta para California cubre el rango de intensidades V<IMM<VI, es $IMM=3.66 \text{Log}(PGA)-1.66$ y $I_{MM} = 3.47\text{Log}(PGV) + 2.35$, donde PGA es la aceleración pico en $[\frac{cm}{s^2}]$ y PGV es la velocidad pico en cm/s Wald et al., 1999. Una propuesta adicional que aparece comúnmente en los informes sobre sismos importantes de USGS Worden et al., 2012 es la que se consigna en la Figura 3.1. En términos de aceleración va desde valores menores a $0.005 [\frac{m}{s^2}]$ (medio gal) para $IMM= I$, hasta aceleraciones de 1400 gales y mayores, para $IMM = XII$.

Ahora bien, el rango de interés de las aceleraciones relacionadas a la exposición de las personas a la vibración depende, según se evalúe salud confort o percepción. En este trabajo el interés principal está centrado en los niveles relacionados a la percepción y confort,

así queda restringida la exposición de las personas e inmuebles a aceleraciones máximas entre aproximadamente los 0.01 y $2 \left[\frac{m}{s^2}\right]$ que corresponden a I<IMM>VI, ver Fig.3.1. Debe reconocerse que no sólo el valor de la aceleración máxima es importante cuando se valora la percepción de riesgo y el confort, un parámetro más que debe considerarse es, desde luego, el tiempo de exposición. Hay otros parámetros que son secundarios, pero no menos importantes, como son el carácter de la vibración, esto es, vibraciones que son continuas o intermitentes, súbitas e inesperadas; así como consideraciones sobre la persona que está expuesta, como son su edad, la posición respecto a la dirección en que llega el movimiento, la experiencia que tiene de la vibración y otras que deben tomarse en cuenta y que hacen del proceso de evaluación de confort uno elaborado y complejo Griffin et al., 1979.

El nivel de percepción es, aproximadamente, entre 1.5 y 2.5 gales, lo que corresponde con el grado II de IMM y desde ese valor de aceleración hacia adelante sino la molestia, la inconformidad aumenta pues no es común (normal) que, en los lugares de trabajo, o residencia, haya vibraciones de los elementos y materiales que nos sustentan, a menos que se trate de un sitio planificado para tareas que produzcan vibraciones como pueden ser los talleres o los espacios de producción. Por otro lado, el tiempo de exposición y el ancho de banda en frecuencia en que se da la vibración condicionan las aceleraciones aceptables. Por ejemplo, para una exposición prolongada de 24 horas y en el ancho de banda de cuatro a ocho Hz el valor límite es de 4 gales, que aumenta a 100 gales para vibraciones que duran un minuto en el mismo ancho de banda Organización Internacional de Normalización, 1985a.

Hay vibraciones con amplitudes menores y mucho menores al nivel de percepción y en anchos de banda diferentes. Estas son de interés particular en el análisis de equipamiento y procesos industriales sensibles a la vibración, una muestra de esto se incluye en la Fig.3.1 en la que se consignan valores límite, en este caso de la velocidad de la vibración, aceptable para instalaciones de laboratorios genéricos (12 micras por segundo), sensibles y ultrasensibles (6 micras por segundo para frecuencias menores de 5Hz y de 0.75 micras por segundo entre $5 < f < 100$, (FTA, 2018). Casi siempre el fabricante de equipo sensible a la vibración indica el valor límite de aceleración o velocidad máxima aceptable para una operación adecuada del equipo en cuestión. El tema es extenso y de interés pero queda fuera del alcance del presente estudio.

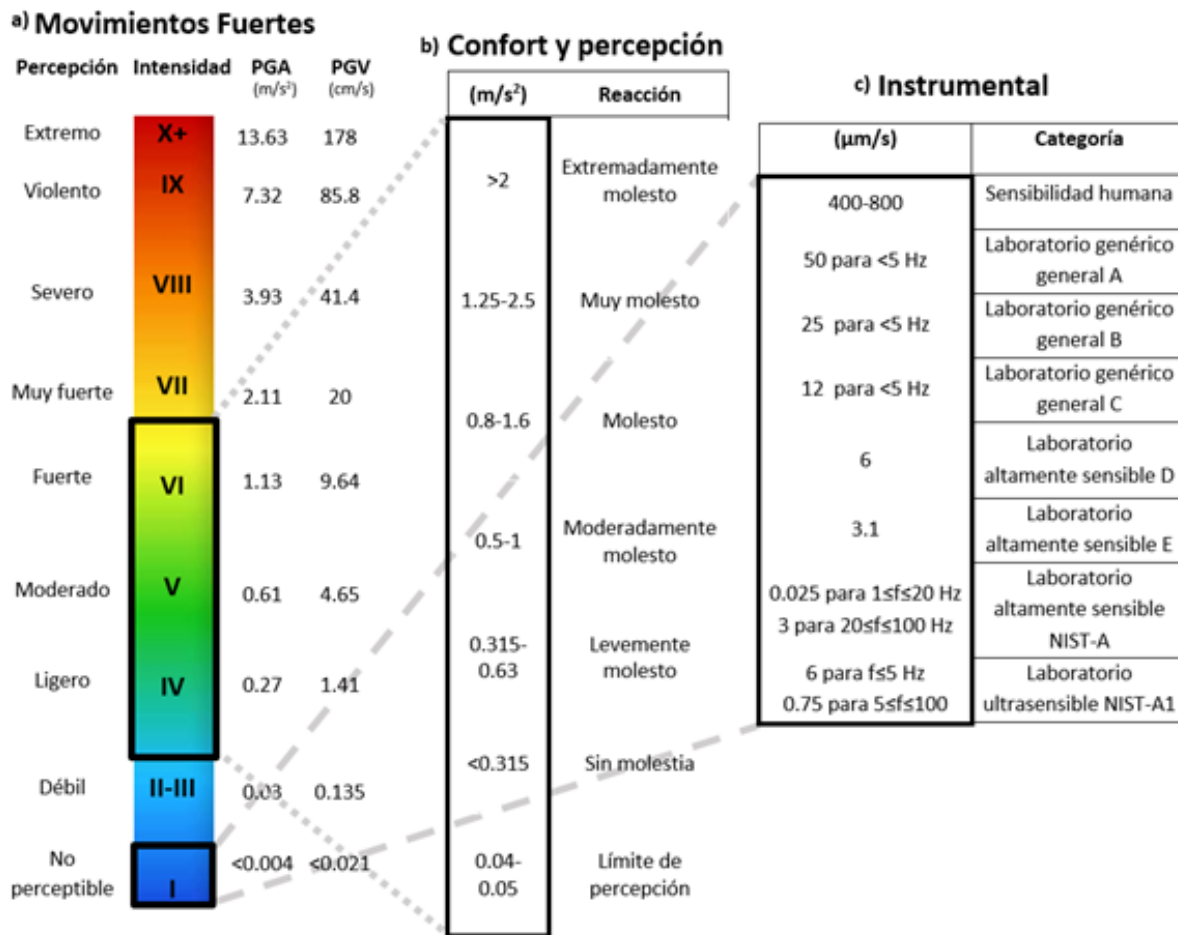


Figura 3.1: Rangos de I_{MM} , aceleración y velocidad máxima establecidos para movimientos fuertes, confort, nivel de percepción y la sensibilidad instrumental. Modificado de Worden (2012)

3.1. Vibración que produce pérdida de confort

Algunos movimientos tienen el poder de proporcionar satisfacción y placer, generando así una sensación de comodidad y bienestar. Por ejemplo, el movimiento rítmico de un balanceo suave en una hamaca, el movimiento fluido y armonioso de bailar al ritmo de la música; estos movimientos, al activar ciertas áreas del cerebro relacionadas con el placer y la relajación, pueden contribuir significativamente al bienestar general de una persona. Esta vibración se evalúa en diversas normas internacionales como la ISO 2631-1 Organización Internacional de Normalización, 1985a, la británica BS 6841Institution, 1987 y la

DIN 4150 Deutsches Institut für Normung e.V., 1999a. No existe un único método para evaluar la pérdida de confort por vibración de cuerpo entero, por lo que se emplean diversas ponderaciones específicas para diferentes actividades y partes del cuerpo. Esta diversidad de enfoques permite abordar la problemática con mayor precisión y detalle, teniendo en cuenta las variaciones en la sensibilidad y las respuestas fisiológicas de las personas en distintas situaciones y contextos.

El estudio de la relación entre vibración y confort se ha extendido hacia las vibraciones responsables de causar malestar o incomodidad que se relacionan con actividades y situaciones cotidianas, por ejemplo:

Transporte público o privado Los viajes en automóvil, autobús, tren, barco o avión pueden exponer a las personas a vibraciones generadas por el movimiento del vehículo sobre la carretera, las pistas o el aire, el oleaje. Estas vibraciones pueden variar en intensidad y frecuencia según el tipo de vehículo y las condiciones del camino, del vuelo, o meteorológicas.

Entorno laboral y doméstico ...

Herramientas y maquinaria El uso de herramientas eléctricas, equipos industriales o maquinaria pesada puede generar vibraciones dañinas para las personas que se transmiten a las manos y al cuerpo, especialmente en períodos prolongados de uso.

Actividades recreativas Algunas actividades recreativas, como montar en bicicleta, montar a caballo o participar en deportes de motor, pueden implicar vibraciones que se perciban como molestas o incómodas.

Entorno laboral En entornos laborales como la construcción, la minería o la agricultura, los trabajadores pueden verse expuestos a vibraciones generadas por equipos o herramientas utilizadas en sus tareas diarias.

Mobiliario y equipamiento doméstico Algunos muebles, electrodomésticos o equipos domésticos pueden generar vibraciones durante su funcionamiento como los extractores, ventilaciones, sistemas de refrigeración o aire acondicionado, especialmente si están mal instalados o en mal estado.

La vibración que, aunque a menudo pasa desapercibida, puede ser sutil pero perturbadora de nuestro entorno. Cuando se trata de la pérdida de confort, la vibración provoca interrupción o malestar en la realización de diferentes actividades. Este fenómeno puede provenir de diversas fuentes, desde maquinaria industrial hasta el tráfico vehicular o incluso la infraestructura urbana, dependiendo del lugar, sea residencial o de trabajo.

La vibración continua puede generar sensación de incomodidad y malestar que afecta nuestro bienestar físico y mental. A nivel físico, puede provocar fatiga, dolores musculares e incluso afectar la calidad del sueño. En un nivel más sutil, puede interferir con nuestra capacidad para relajarnos o concentrarnos.

Además del impacto físico y emocional, la vibración también puede tener consecuencias prácticas. En entornos de trabajo, la vibración puede interferir con la productividad y la seguridad de los empleados, afectando negativamente la eficiencia y aumentando el riesgo de accidentes.

Los primeros estudios se enfocaron en los efectos causados por la vibración en las personas asociados a la variación de la frecuencia de la vibración Griffin, 1990. Estudios recientes han investigado más acerca de condiciones más complejas, incluida la vibración multifrecuencia, en varios ejes y tipo sacudida Griffin, 1990. En los últimos años, también se estudia la respuesta a la vibración en ambientes reales, así como la respuesta en laboratorios de simulaciones realistas de vibración.

Dos factores adicionales básicos en la percepción de incomodidad es la postura corporal y la combinación vibración-ruido. Esta percepción está influenciada por las variaciones biodinámicas y las respuestas fisiológicas individuales, así como por la sensibilidad única de cada persona. Es importante considerar estos aspectos al diseñar sistemas de amortiguamiento y al abordar el confort en entornos de transporte y en otros ámbitos de la vida cotidiana como el uso de herramientas o electrodomésticos.

3.2. Fuentes emisoras de vibración: magnitud y exposición

Es fundamental evaluar las posibles afectaciones a las personas a causa de la vibración, lo que implica comprender la fuente emisora de las vibraciones, incluyendo su variación, amplitud, duración, frecuencia de ocurrencia y contenido espectral, así como el nivel de exposición de las personas y su respuesta ante una vibración particular.

La fuente emisora de vibraciones. Las características principales de los emisores de vibración mecánica son: la forma (carácter) de la vibración, el tamaño o magnitud, el ancho de banda en frecuencia y la duración de la emisión, las que definen, en el entorno de la fuente, el impacto potencial que tiene un evento. En zonas urbanas las fuentes principales de vibración son el tráfico vehicular, la maquinaria industrial, equipos de construcción en operación, música, paso de trenes y aviones, sistemas de ventilación, explosiones, minería, uso de maquinarias pesadas o sismos locales.

Una clasificación posible de las vibraciones es considerando su carácter, esto es la forma de la vibración según el tiempo ya que pueden durar 1 segundo o ser intermitentes, continuas o transitorias durante las 24 horas del día extendiéndose a periodos prolongados de tiempo, esto repercute en la respuesta a ese estímulo ya que podría ser desde imperceptible hasta afectar actividades cotidianas; y por su naturaleza, determinista si se puede predecir por oscilaciones previas, o estocástica cuando solo se pueden indicar sus propiedades estadísticas, ver Figs. 3.2 y 3.3 Griffin, 1990.

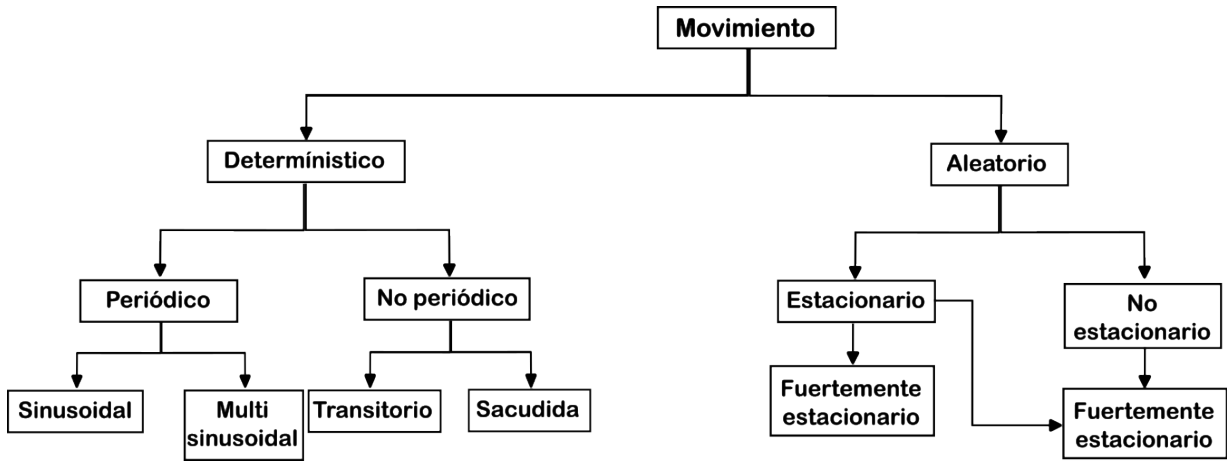


Figura 3.2: Categorización de los tipos de movimiento oscilatorio.
Tomado de Griffin,1990

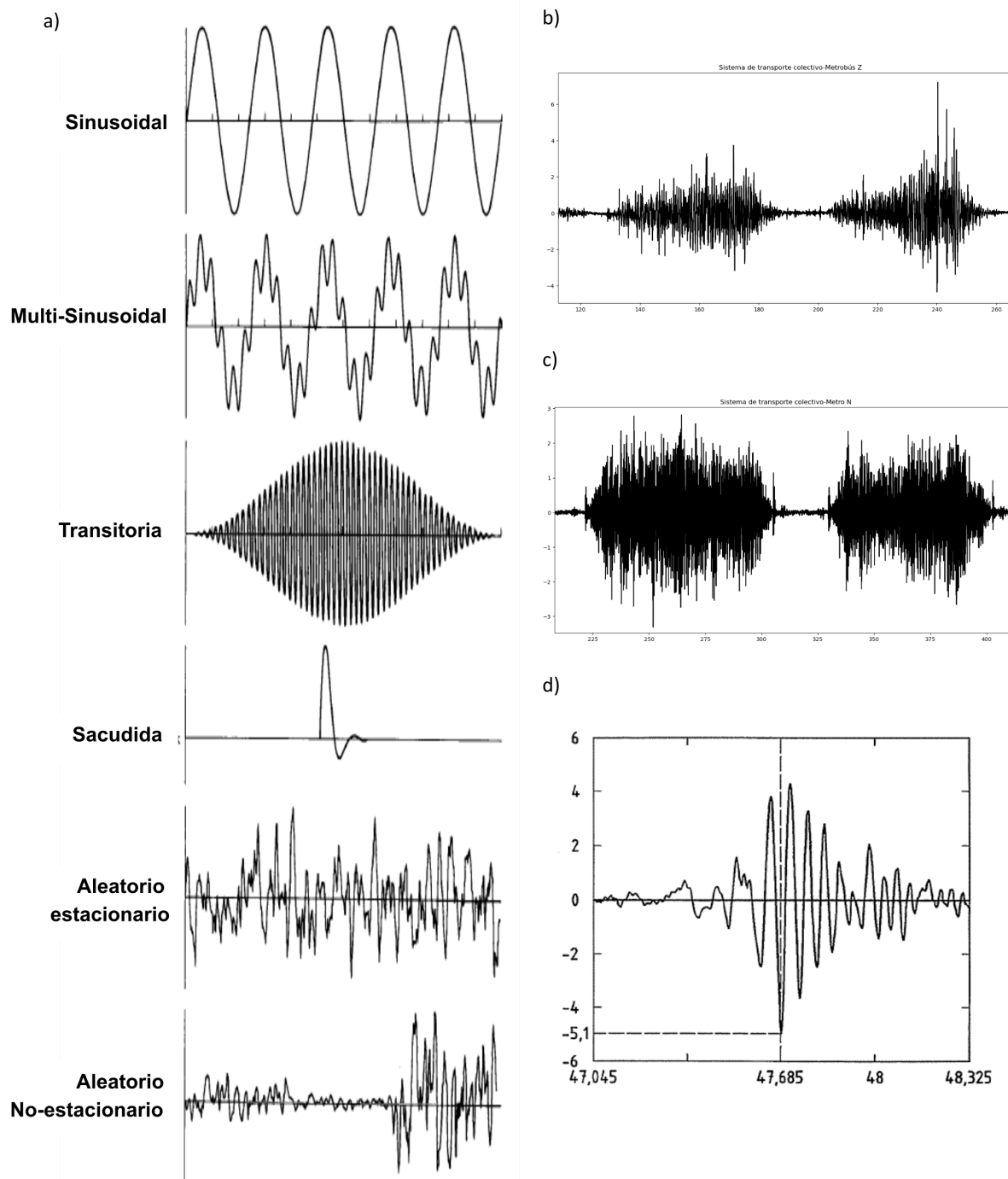


Figura 3.3: Ejemplos de formas de onda para diferentes tipos de movimiento oscilatorio (Modificado de Griffin, 1990). b) Fragmento del movimiento oscilatorio dentro del autobús bi-articulado del Metrobús en un trayecto de lo largo de la línea 1 .c) Fragmento del movimiento oscilatorio en el comboy del Metro medido a lo largo de un trayecto en la línea 3. d) Movimiento oscilatorio en las cimentaciones por maquinaria.(Tomada de la DIN 4150-3)

Los métodos propuestos para evaluar la exposición de las personas a la vibración asu-

men comúnmente que el movimiento es tal que la media y la varianza no cambian con el tiempo y así se considera en este trabajo a menos que se diga lo contrario.

3.3. Exposición a la vibración

La exposición corporal a la vibración se define como la interacción indirecta de las personas con movimientos que se propagan a través del suelo, medios de transporte, herramientas o edificaciones. Algunas fuentes generadoras de vibración se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Elementos de vibración indirecta con los que interactúan los humanos

Transporte	Trenes
Carros	Trenes
Camionetas	Teleféricos
Camiones	Monorrieles
Autobuses	
Carruajes	
Motocicletas	
Vehículos todo terreno	Construcciones
Tractores	Casas
Maquinaria forestal	Edificios
Tanques	Oficinas
Montura de animales	Elevadores y escaleras
Sistemas marinos	Equipamiento industrial
Barcos	Grúas
Botes	Montacargas
Aerodeslizador	Estaciones de sistemas de control
Embarcaciones deportivas	
Nadadores y buceadores	
Submarinos	

3.3.1. Atenuación de la vibración al propagarse en el suelo

La atenuación de la vibración relacionada a la separación entre la fuente de vibración y el sitio de exposición puede expresarse según la función siguiente.

$$A = kx^\beta \quad (3.1)$$

Donde A es la amplitud del movimiento, x es la separación, β indica la tasa de decaimiento de la amplitud de la vibración y k depende del sistema de unidades. En el caso en que la vibración consista principalmente de ondas superficiales la tasa de decaimiento es $\frac{1}{2}$, y es mayor (-1) cuando el contenido de la vibración son ondas de cuerpo. Con estimaciones específicas para cada formación de suelo de la tasa de atenuación pueden predecirse las amplitudes a diferentes separaciones. Así, es claro, que entre mayor sea la separación entre fuente y receptor se espera que la amplitud de la vibración sea menor.

3.3.2. Vibración en edificios

La estructura de un edificio puede afectar la vibración producida por aire y por tierra, amplificando o mitigando la propagación de la vibración. La respuesta dinámica estructural de los edificios es compleja y no es posible predecir con precisión la vibración en viviendas domésticas causada por la vibración del suelo. La respuesta del suelo es crucial para construir edificios cerca de fuentes de vibración como fábricas, vías de tren o carreteras. Se considera apropiado aplicar frecuencias ponderadas a la vibración en el suelo, que atenúan mejor en altas frecuencias. Además, los edificios pueden amplificar el movimiento debido a su comportamiento similar al de un péndulo, ya que tienen una frecuencia natural de oscilación. Cuando la frecuencia de la vibración del suelo coincide con esta frecuencia natural, puede ocurrir una resonancia, amplificando significativamente el movimiento. Ahora bien, las vibraciones que se transmiten a los edificios pueden generar ruido, movimiento, producir vibraciones secundarias y, eventualmente, afectar su funcionamiento o generar daño estructural.

La magnitud de estas vibraciones es influenciada por las características del suelo, generando la amplificación del movimiento y en algunos casos, la resonancia del suelo y la edificación. en algunos casos. En estudios realizados en la ciudad de Bogotá (Sarria, 2006), se encontró que las estructuras sobre suelos blandos pueden sufrir daños por vibraciones de tráfico pesado a distancias cortas. Si el impacto ocurre en pavimento sobre un suelo blan-

do, hay tendencia a la presencia de ondas de Rayleigh de relativamente baja frecuencia, mientras que, en suelos firmes, la dominancia podría corresponder a ondas con frecuencias altas. En el primer caso, la penetración es más profunda, lo cual incide en las potenciales medidas para la reducción de los movimientos que el tránsito de vehículos produce sobre las edificaciones cercanas. El tránsito vehicular produce ondas superficiales que afectan las construcciones cercanas, con la frecuencia dependiendo del tipo de suelo y pavimento. La respuesta estructural de los edificios varía según el suelo: en suelos blandos, se observa una cinemática de cuerpo rígido, mientras que, en suelos firmes, las paredes pueden deformarse. Otro estudio en EE. UU. Realizado por Haoa en 2001, resalta la importancia de investigar las vibraciones del tráfico, identificando preocupaciones como daños estructurales, malestar para los habitantes y afectaciones a equipos sensibles.

3.4. Respuesta humana a la vibración

Este apartado se enfoca en comprender cómo los humanos responden a las vibraciones reconociendo que la exposición, esta ya sea en campo libre o en una edificación, provoca una respuesta particular en las personas. Para evaluar esta respuesta, es necesario entender que las vibraciones varían en ancho de banda de frecuencia, presentan magnitudes en un amplio rango y que las personas están expuestas a ellas durante lapsos diferentes. Adicionalmente, se deben considerar factores como la fatiga, el malestar, el riesgo de lesiones musculoesqueléticas y la calidad del trabajo de cada individuo.

El tema de la respuesta es extenso por lo que se incluye el apéndice A que consigna los resultados recientes sobre las consecuencias fisiológicas, biodinámicas y psicológicas del cuerpo humano al exponerse a la vibración. Así, en la exposición siguiente se expone la forma en que se manifiesta la respuesta humana a la vibración.

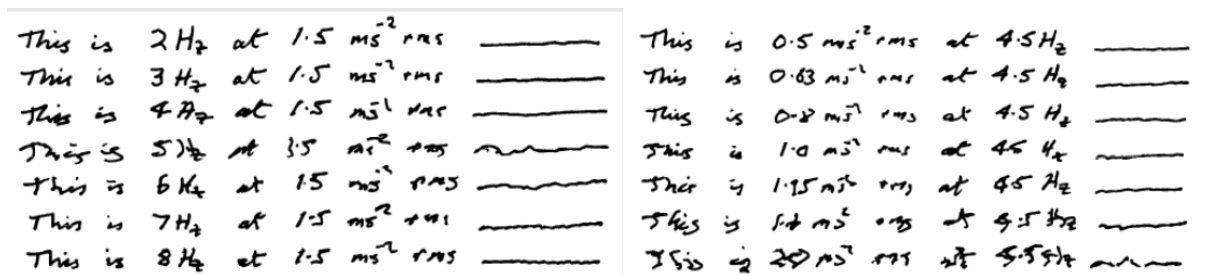


Figura 3.4: Ilustración de los efectos de la frecuencia y magnitud de vibración en la escritura.

Tomado de Griffin, 1990

Interferencia en actividades Las actividades humanas involucran un amplio rango de procesos complejos con una variedad de condiciones posibles. La magnitud y duración de la exposición a la vibración pueden influir significativamente en diversas funciones sensoriales y motoras. Por otro lado, durante actividades de control que implican el movimiento de extremidades, como escribir 3.4 o beber, la estabilidad y precisión de los movimientos pueden ser afectadas por la vibración. La coordinación precisa de aquellas tareas depende de cómo la vibración influye en la estabilidad y la capacidad de amortiguación de los dispositivos o entornos involucrados, lo que determina el éxito o fracaso en éstas.

Percepción en edificios El confort o la ‘consciencia del bienestar’ dentro de una edificación requiere que la vibración presente sea imperceptible la mayoría del tiempo. Los límites para la percepción de la vibración entonces proveen el límite inferior para la vibración inaceptable en la mayoría de las edificaciones.

La perturbación por vibración en un edificio puede ser debido a la transmisión de la vibración de fuentes externas (maquinaria industrial o tránsito) a través del suelo o aire, del inmueble y de los muebles hacia el cuerpo. En algunos casos la fuente de la vibración se encuentra dentro del edificio, por ejemplo: equipamiento doméstico, sistemas de ventilación, pisadas, etc.

La respuesta humana a la vibración de cuerpo entero es compleja La respuesta depende de las características físicas de la vibración, esto es de la magnitud, frecuencia, dirección y duración de la vibración, así como de la parte del cuerpo en

contacto con la superficie vibrante y, de la edad, sexo, historia clínica y costumbres del individuo también de la postura, fuerza, movimientos repetitivos y del ambiente físico entre otros.

Frecuencias fundamentales del cuerpo humano Desde el siglo pasado se estudian las frecuencias de vibración que afectan diferentes partes del cuerpo, los resultados indica que, para la cabeza, el ancho de banda de 20-30 Hz es predominante, para el pecho de 50-100 Hz, para el abdomen entre 4 y 8 Hz, la mano de 30-50 Hz, el brazo entre 5-10 Hz, la pierna de 2-20 Hz, y la espalda de 10-12 Hz,(Fig.3.5). Resultando en un rango integro de respuesta entre 0.5 a 100 Hz. Coermann, 1962)3.5.

La mayor sensibilidad, capacidad para detectar o percibir estímulos, se da entre 4 y 8 Hz, ya que la vibración interfiere con las funciones de algunos órganos como el corazón, estómago, hígado y riñones.Griffin, 1990.

Respuesta a la vibración vertical El resultado de la experimentación indica que durante el movimiento oscilatorio vertical el cuerpo responde de manera diferente a los diferentes rangos de frecuencias Griffin, 1990:

- Por debajo de 2 Hz la mayoría del cuerpo se mueve en conjunto, en fase, hacia arriba o hacia abajo.
- En frecuencias menores a 0.5 Hz el movimiento, eventualmente, causará síntomas de mareo: sudor, nausea o vómito; causando gran inconformidad.
- La resonancia predominante ocurre a 5 Hz aproximadamente, que incluye como se ha indicado, la transmisibilidad vertical de la vibración hacia la cabeza.
- La visión puede ser afectada en cualquier frecuencia, haciéndose borrosa en el rango de 15 a 60 Hz asociado con las frecuencias de resonancia del ojo dentro de la cabeza.
- • Para una persona sentada, la fuerza necesaria para inducir una aceleración vertical disminuye de manera rápida posterior a 5 Hz, la vibración e incomodidad transmitida a la cabeza disminuyen de manera gradual

Respuesta a la vibración horizontal La vibración horizontal causa un amplio rango de sensaciones y de manera similar tiene variaciones con relación al ancho de banda de frecuencias a las que está expuesto. Griffin, 1990.

- Para personas paradas la frecuencia alrededor de 3 Hz puede ser reducida al hincarse. Para la vibración horizontal por debajo de 2 Hz tiende a causar inestabilidad, esta puede reducirse sujetándose de agarraderas o abriendo las piernas a la altura de los hombros para recuperar el equilibrio.
- En frecuencias por debajo de 1 Hz, la oscilación tiende a causar que el cuerpo se mueva en fase. En el caso de estar sentado, la acción muscular o el soporte del asiento, pueden mitigar la sensación, manteniendo la parte superior del cuerpo estable.
- En frecuencias de 1 a 3 Hz es difícil mantener estable la parte superior del cuerpo y la incomodidad causada por la vibración tiende a incrementar.

En bajas frecuencias (menores a 10 Hz), un respaldo puede ayudar a estabilizar la parte superior del cuerpo y mitigar los efectos de la vibración. En altas frecuencias (mayores a 30 Hz) el respaldo es la primera causa de que la vibración sea transmitida a la parte superior del cuerpo, sobre todo en movimientos de adelante hacia atrás. La mitigación de la respuesta incluye cambios en la posición o aumento en la tensión muscular pues pueden reducir la vibración. La necesidad de hacer cambios en la postura incrementa con la frecuencia; variaciones menores de la postura, entre la espalda baja y el ángulo de la cabeza, puede causar cambios sustanciales en la vibración transmitida hacia la columna y la cabeza.

Mareo El transporte de personas a través de medios terrestres, aéreos y marítimos ha suscitado un fenómeno recurrente: el mareo. Este trastorno se caracteriza por una secuencia de síntomas que van desde la palidez y la sudoración inicial hasta las náuseas y los vómitos posteriores. La sensación de desequilibrio y malestar puede ser desencadenada por diversos factores, como los movimientos bruscos, la falta de ventilación adecuada o la exposición a condiciones climáticas adversas. Esta reacción

fisiológica, aunque incómoda, es una respuesta natural del organismo ante la percepción de un conflicto sensorial entre los diferentes sistemas de equilibrio y orientación. Los diversos factores que pueden influir en el desarrollo del mareo por movimiento se clasifican en tres categorías principales: entorno, individuo y factores específicos Griffin, 1990. El entorno se refiere al tipo de movimiento presente, ya sea lineal, rotacional o vibratorio, o la ausencia de movimiento. El individuo se caracteriza por su receptividad al mareo por movimiento, su capacidad para adaptarse a diferentes entornos y su tendencia a retener los efectos del movimiento después de que este ha cesado.

Los factores específicos que pueden contribuir al mareo por movimiento incluyen:

Conflicto entre la información visual y vestibular Cuando la información visual no coincide con las señales del sistema vestibular, como en un vehículo en movimiento, puede producirse mareo por movimiento.

Percepción y señales táctiles del cuerpo La información sensorial del cuerpo, como la posición y el movimiento de las extremidades, también puede contribuir al mareo por movimiento.

Señales de los canales semicirculares y otolitos del oído interno Estos órganos son responsables del equilibrio y la detección del movimiento, y sus señales pueden verse afectadas por diferentes tipos de movimiento.

Expectativas, emociones y memoria de experiencias previas con el movimiento

Los factores cognitivos y la memoria pueden influir en la susceptibilidad al mareo por movimiento.

Medicamentos Algunos medicamentos pueden afectar el equilibrio o la percepción sensorial, aumentando el riesgo de mareo por movimiento.

Alcohol El alcohol puede aumentar la sensibilidad al movimiento y empeorar los síntomas del mareo por movimiento.

Exposición previa al movimiento La experiencia previa con diferentes tipos de movimiento puede influir en la capacidad de adaptación del individuo y reducir la probabilidad de mareo por movimiento.

Realizar tareas que requieren concentración visual Leer, escribir o realizar tareas que requieren concentración visual puede aumentar la susceptibilidad al mareo por movimiento.

Algunos ejemplos de ambientes, actividades o dispositivos que pueden causar mareo son: botes, barcos, submarinos, nadar, montura de animales, simuladores, helicópteros, aviones, carros, autobuses, trenes, tanques, rotaciones sobre el eje vertical, estimulación Coriolis, oscilación traslacional de baja frecuencia.

La prevención de riesgos de vibración puede abordarse de varias formas:

Eliminación o reducción de la causa Abordar directamente las fuentes de vibración, como tráfico vehicular o maquinaria pesada, mediante barreras de sonido o modificación de rutas.

Aislamiento del cuerpo humano Proteger a los ocupantes con medidas de aislamiento estructural, como materiales que absorban vibraciones o sistemas de amortiguación.

Minimizar los efectos Mitigar los impactos negativos mediante políticas que limiten la exposición y proporcionen información adecuada, y capacitación sobre los riesgos asociados con la vibración en edificios.

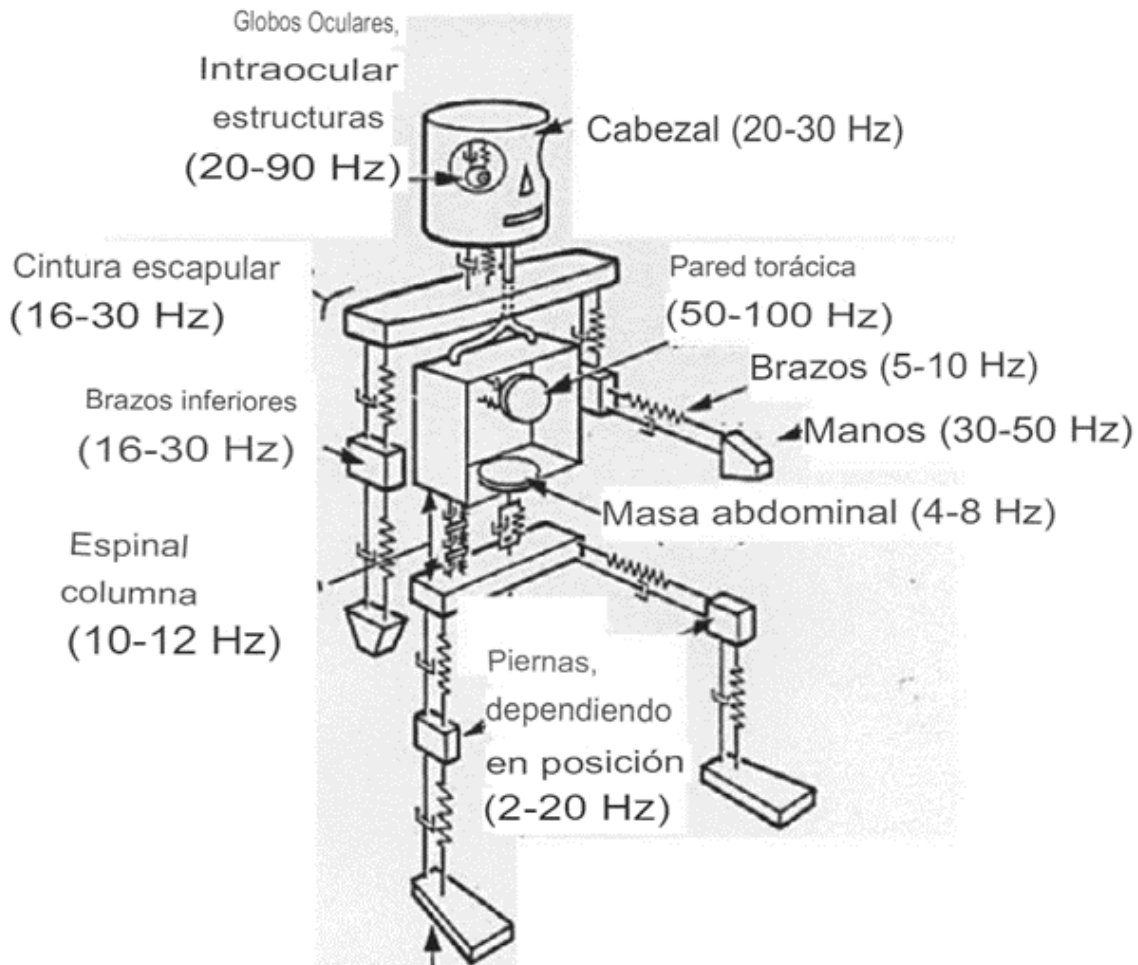


Figura 3.5: Modelo mecánico del cuerpo humano
Modificado de Kowalska-Koczwara et al., 2021

3.5. Determinación de los límites de percepción.

En los seres humanos el movimiento, la vibración, puede percibirse mediante diferentes sistemas sensoriales como son el visual, vestibular, auditivo y el somático (que es la combinación del sistema sensorial cutáneo, kinestésico y visceral). Se ha demostrado que la percepción del movimiento depende de la frecuencia de la vibración, el área de contacto entre el cuerpo y la vibración así como de la presión de contacto, entorno de contacto, estimulación primaria de vibración, temperatura de la piel, edad y condición de salud de

la parte del cuerpo expuesta.

Existen diversos métodos estadísticos y procedimientos psicofísicos para determinar los umbrales de percepción. La teoría de la detección de señales ofrece un enfoque fundamental para el sonido, utilizando procedimientos extensos que analizan las vibraciones de cuerpo entero en edificios para establecer estos límites.

A continuación se presentan algunos métodos:

- Método de ajuste: consiste en que el sujeto de prueba incremente o reduzca la magnitud del estímulo hasta que sea percibido, o tolerado.
- Método de límites: en este método el experimentador es el que aumenta o reduce el estímulo de acuerdo con lo que el sujeto de prueba sienta y exprese, hasta que se encuentre cercano a un valor límite promedio preconcebido.
- Método de escala de rangos: en este método los sujetos sometidos a prueba identifican los estímulos como ‘apenas perceptible’, ‘perceptible’, ‘fácilmente perceptible’, etc. En todos los métodos los resultados están influidos por las características particulares de los sujetos de prueba.

Siguiendo estos métodos y considerando las múltiples variables que influyen en la percepción de las vibraciones, se han desarrollado contornos de confort que se refieren a los rangos donde las condiciones ambientales de temperatura, ruido, vibración e iluminación son agradables o aceptables para la mayoría de las personas. En el caso de los contornos de confort para las vibraciones, establecen límites aceptables para la exposición humana a la vibración. Estos contornos de confort (fig. 3.6) se definieron a través de experimentaciones y análisis estadísticos detallados. Un recuento de las referencias básicas se enlista a continuación.

El estudio de Goldman de 1948 (curvas 1, 2 y 3, fig. 3.6) investigó los umbrales de percepción de vibraciones en diferentes partes del cuerpo, encontrando que la sensibilidad varía con la frecuencia y el área de contacto. Sus hallazgos establecieron bases para la

ergonomía y normativas de seguridad, proporcionando una comprensión fundamental de cómo los humanos perciben y responden a las vibraciones.

El estudio de Volkov de 1958 (curva 4 de la fig. 3.6) analizó la percepción humana de vibraciones entre 1 y 100 Hz y su impacto en el confort y rendimiento. Descubrió que la exposición prolongada a vibraciones puede afectar negativamente la salud y eficiencia laboral, sentando las bases para regulaciones en ambientes industriales y de transporte. El estudio de Janeway de 1948 (curva 5 de la fig. 3.6) examinó la percepción y tolerancia humana a vibraciones mecánicas, identificando los umbrales de confort y discomfort. Sus hallazgos destacaron la importancia de la frecuencia y amplitud en la percepción de vibraciones, contribuyendo a la formulación de estándares para la exposición segura en diversos entornos.

El estudio de Getline de 1955 (curva 7 de la fig. 3.6) investigó los efectos de las vibraciones en la comodidad y la salud humana, particularmente en el contexto industrial. Determinó que la frecuencia y la duración de la exposición son cruciales para la percepción del confort, proporcionando datos esenciales para el desarrollo de normas de seguridad laboral.

El estudio de Magid de 1960 (curvas 8 y 9 de la fig. 3.6) se centró en la respuesta fisiológica y psicológica a las vibraciones de cuerpo entero. Descubrió que las vibraciones pueden afectar el equilibrio y la coordinación, y estableció umbrales críticos de exposición para prevenir efectos adversos ya que Diferentes frecuencias e intensidades de vibración tienen distintos efectos sobre el cuerpo. Por ejemplo, las bajas frecuencias (1-20 Hz) son más propensas a afectar la columna vertebral, mientras que las frecuencias más altas (más de 50 Hz) pueden causar daño a los tejidos más superficiales, influyendo en la creación de estándares de seguridad en el transporte y la industria.

El trabajo de David Mandel (curva 10 de la fig. 3.6) se enfoca en investigar los efectos de las vibraciones en la salud y el confort humano, especialmente en entornos laborales y de transporte. Sus estudios han identificado umbrales menores a 10 Hz de vibración seguros

y cómodos, influenciando normativas para mejorar la seguridad ergonómica y reducir los impactos negativos de las vibraciones en el rendimiento y bienestar de los trabajadores y usuarios.

Estos contornos de confort han sido fundamentales en la creación de las curvas base de aceleración y velocidad, y las curvas de ponderación, descritas por las normas internacionales para regular la exposición humana a vibraciones, garantizando así la seguridad y el bienestar en diferentes ambientes laborales e industriales.

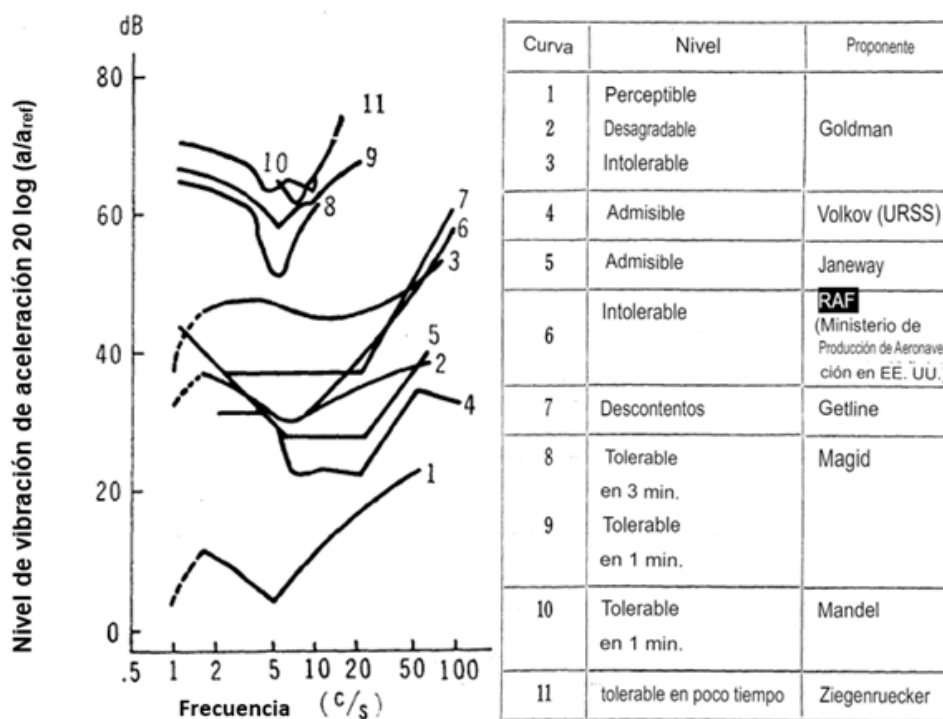


Figura 3.6: Contornos de confort.
Tomado de Miwa,1967.

Los estudios anteriores y los contornos de confort consignados en la figura anterior son el origen de una de las curvas típicas de percepción. (ver Fig. 3.7)Note que la forma de la curva es un contorno de las respuestas obtenidas en la experimentación. Debe notarse en la figura que la curva de percepción es la respuesta a la aceleración en función de la frecuencia.

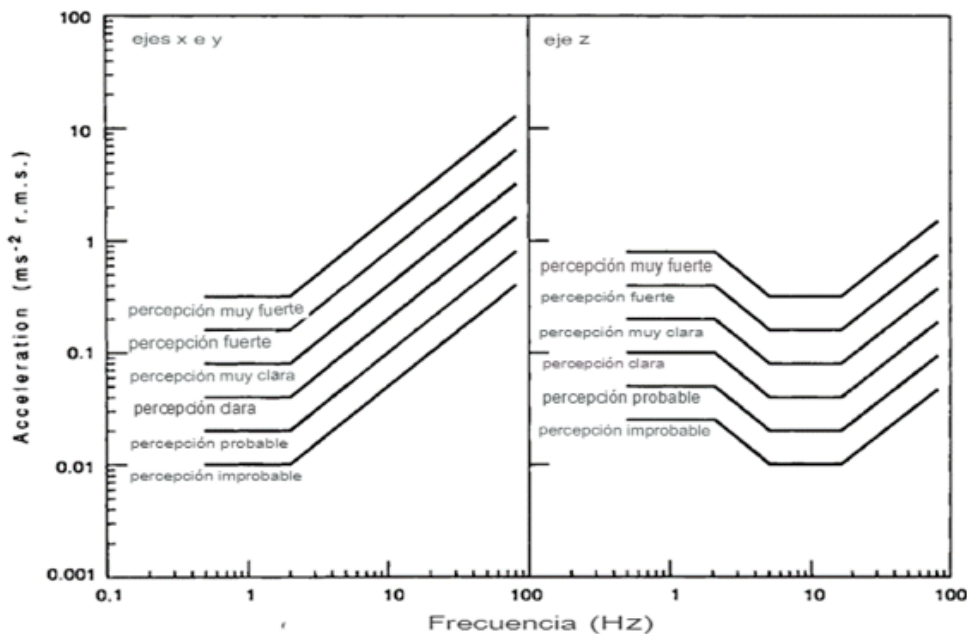


Figura 3.7: Escala de la perceptibilidad de vibración sinusoidal de baja magnitud definida en la norma BS 6841

Tomado de la norma BS 6841.

Ahora bien, la siguiente pregunta obligada es ¿qué indican estos cambios -pendientes- en las curvas que están en función de la frecuencia? ¿qué representan las pendientes en función de la frecuencia de las que consta la curva? Una respuesta simple viene dada por el siguiente modelo que no es mas que la relación entre desplazamiento, velocidad y la sobre-aceleración (J) que viene dada por un factor de $2\pi f$.

Tabla 3.2: Conversión entre desplazamiento, velocidad y sobreaceleración para aceleración en términos de frecuencia para movimientos sinusoidales.

Tomado de Griffin,1990

Movimiento sinusoidal	Conversión
Desplazamiento D	$A = (2\pi f)^2 X$
Velocidad V	$A = 2\pi f X$
Sobreaceleración J	$A = \frac{J}{2\pi f}$

La curva de los contornos de confort que representa la respuesta de las personas a la vibración indica que, para frecuencias menores a 1 Hz, la aceleración es constante hasta los 0.7-0.8 Hz así para frecuencias bajas la percepción parece estar relacionada a la aceleración. Entre 1 y 4 Hz la aceleración decrece desde aproximadamente $0.3 \left[\frac{m}{s^2}\right]$ hasta

$0.05 \left[\frac{m}{s^2}\right]$, con pendiente -1 en un gráfico Log-Log, lo que es manifestación de que en este ancho de banda la percepción se relaciona a la sobreaceleración. Enseguida entre 4 y 8 Hz la aceleración es nuevamente constante y para frecuencias mayores a 8Hz, la respuesta queda representada por una pendiente positiva (+1) que sugiere que la percepción está relacionada a la velocidad de la vibración.

El hecho de que la percepción entre 8 y 80 Hz quede asociada a la velocidad de la vibración sea acaso indicio de que, de manera natural, percibimos o reconocemos con más claridad variaciones de la velocidad que aquellas de la aceleración o la sobreaceleración. Debemos recordar que el cuerpo humano es por mucho más complejo que un modelo matemático, que si bien es de suma utilidad para tratar de analizar este fenómeno, no alcanza a capturar toda la complejidad de un sistema que ha ido evolucionando por tanto tiempo como lo es el ser humano. Todas las partes que dan pie a la respuesta ante la vibración (mecanorreceptores, cerebro, sistema vestibular tendones, etc.) en el cuerpo humano puede que se hayan adaptado no solo a un rango de frecuencias en específico, sino también a una forma de percibir la vibración, siendo esta la velocidad.

Así, la dependencia en frecuencia de la respuesta humana puede quedar expresada mediante líneas rectas como las que consignó Griffin, 1990 en su figura 3.8, y que se reproduce a continuación.

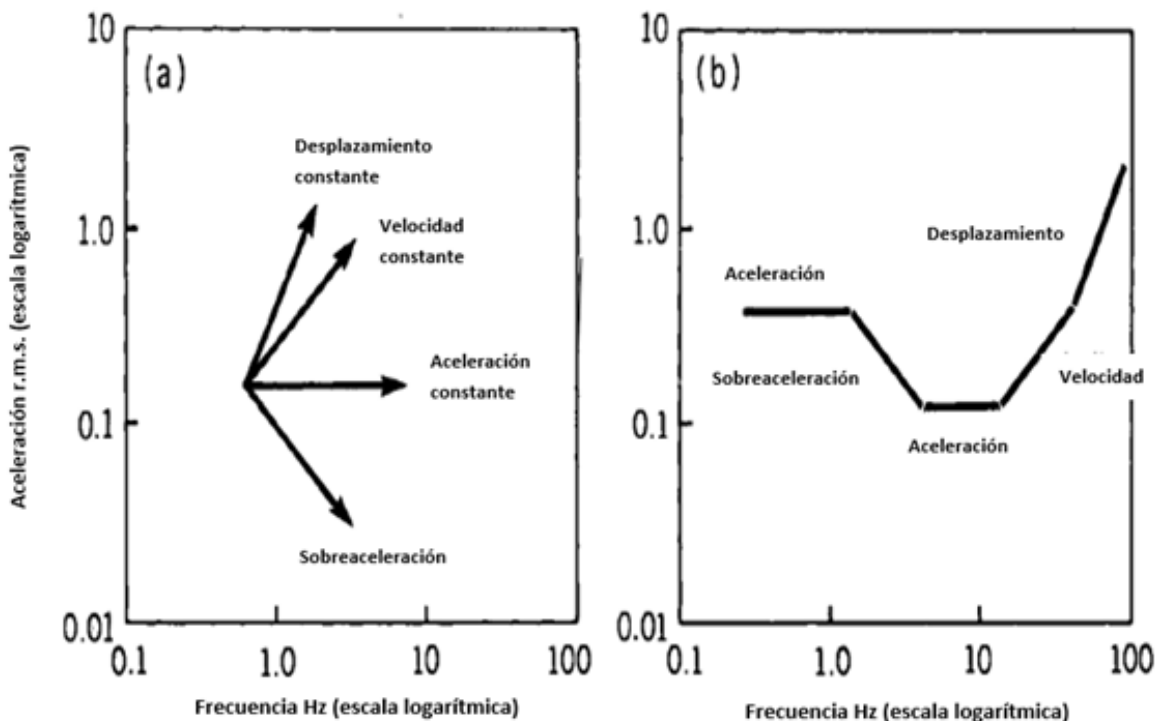


Figura 3.8: Representación simple de los efectos de la frecuencia de vibración: (a) Cambio en la aceleración asociado con sobreaceleración constante, aceleración, velocidad y desplazamiento; (b) Formación de un contorno mostrando las magnitudes de vibración en diferentes frecuencias que causan efectos similares.

Modificado de Griffin, 1990.

3.6. Normatividad internacional

Los estándares de confort relacionados con las vibraciones se centran en minimizar los efectos adversos de las vibraciones en el bienestar y el rendimiento humano. Muchas guías y normas ofrecen un método de evaluación de la vibración de cuerpo entero. En algunos casos el interés se centra solamente en la vibración del edificio mientras que otros se preocupan por la evaluación a la respuesta humana a la vibración dentro de los edificios. Existen varios estándares que proveen estos procedimientos y ejes de medición (para más detalle ver apéndice B) para registros de velocidad como la norma alemana DIN 4150 y VDI 2057; y de aceleración como las normas británicas BS 6472, BS 6841 Institution, 1987 o internacionales ISO 2631-1 Organización Internacional de Normalización, 1985a y -2Organización Internacional de Normalización, 1985b. Siendo las normas DIN 4150 Deutsches Institut für

Normung e.V., 1999a, BS 6841 Institution, 1987 e ISO 2631-1 Organización Internacional de Normalización, 1985a y -2 Organización Internacional de Normalización, 1985b las que se utilizan para hacer la evaluación de la vibración a través de Descriptores de la Vibración como el la Severidad de vibración (KBF), Evaluación de la severidad de vibración, Valor de Dosis de Vibración (VDV) , aceleración r.m.s., el valor máximo de vibración transitoria (MTVV), factor de cresta (F_c).

3.6.1. ISO 2631-1 y 2631-2

La norma internacional ISO 2631, publicada en 1974, ofrece una guía sobre la evaluación la falta de confort producida por vibración de cuerpo entero. En ella se define el límite de reducción en el confort entre 1-80 Hz para una duración de entre 1 minuto a 24 horas en los ejes x, y y z para personas paradas, sentadas y posiciones recumbentes. La norma dicta que “la reducción en el valor de los límites de confort está relacionada a presentar dificultades en la realización de actividades como comer, leer y escribir” . Esta norma usa frecuencias ponderadas para los ejes x, y, z. La ponderación combinada se recomienda cuando la orientación de los residentes es variable o desconocida dentro del inmueble. Estas versiones de la norma usan las “curvas base”. Para el eje x y, la magnitud base es $3.6E-3 \left[\frac{m}{s^2}\right]$ r.m.s. en 1-2 Hz; para el eje z la magnitud base es $5E-3 \left[\frac{m}{s^2}\right]$ r.m.s. de 4-8 Hz.

3.6.2. BS 6472

BS 6472 es una norma británica que proporciona orientación para evaluar los posibles riesgos de la vibración y el ruido transmitidos por el suelo a las estructuras. Se centra en los efectos que las actividades de construcción y transporte generan en los edificios y estructuras cercanas. Se basa en las normas BS 6841 y la ISO Organización Internacional de Normalización, 1985a y -2 Organización Internacional de Normalización, 1985b. Proporciona pautas para evaluar los efectos de la vibración y el ruido transmitidos por el suelo a edificios y estructuras. Es aplicable a diversas actividades que generan vibración y ruido transmitidos por el suelo, como lo son la construcción, demolición, transporte y operaciones industriales. La norma puede usarse como una guía para evaluar los posibles riesgos para

las estructuras en función de varios parámetros, que incluyen la velocidad de vibración, la frecuencia de vibración, los niveles de ruido y las características de la respuesta de los edificios. Considera la sensibilidad a las vibraciones de diferentes tipos de estructuras y proporciona criterios para evaluar su impacto potencial. La BS 6472 describe métodos para medir la vibración y el ruido transmitidos por el suelo, que incluyen el uso de sensores y equipos de monitoreo. Proporciona orientación sobre cómo interpretar y evaluar los datos medidos para conocer los posibles riesgos para las estructuras.

3.6.3. BS 6841

La norma británica proporciona métodos para cuantificar las vibraciones y los golpes repetidos en relación con la salud humana, la interferencia con las actividades, la incomodidad, la probabilidad de percepción de vibraciones y la incidencia de mareos por movimiento en un rango de 1-80 Hz. La guía es aplicable a los movimientos transmitidos al cuerpo en su conjunto a través de las superficies de apoyo: los pies de una persona de pie, las nalgas, la espalda y los pies de una persona sentada o la zona de apoyo de una persona recostada. La vibración es a menudo compleja, contiene muchas frecuencias, ocurre en varias direcciones y cambia con el tiempo. No se presentan límites de vibración. Sin embargo, los métodos se han dado para que puedan usarse como base de los límites que pueden analizarse por separado. Varios apéndices proporcionan información actual sobre los posibles efectos de la vibración. La guía pretende ser un compromiso justo basado en los datos disponibles y debe satisfacer la necesidad de recomendaciones que sean simples y adecuadas para aplicaciones generales. La guía se presenta en términos numéricos para evitar ambigüedades y fomentar mediciones precisas. Al utilizar las recomendaciones se deben tener en cuenta las restricciones impuestas a su aplicación.

3.6.4. DIN 4150

La norma alemana DIN 4150 Deutsches Institut für Normung e.V., 1999a trata el tema de vibración estructural, y en su segundo apartado, el tema en específico de la exposición humana a la vibración en edificaciones. Es mediante el procedimiento descrito en esta di-

rectriz, se pretende evaluar la vibración a la que una persona puede estar expuesta en una edificación. Lo anterior debe realizarse con un registro de velocidad en tres componentes ortogonales (dos horizontales y una vertical), durante un periodo que, aunque no está estipulado, debe representar la actividad en el sitio de interés. Además, el requerimiento mínimo para el equipo de medición es que este pueda registrar en un ancho de banda de 4 a 80 [Hz]. Los registros de velocidad obtenidos para cada componente deben corregirse para quitar el efecto del sensor. Las unidades de los registros deben ser [mm/s]. La norma clasifica cinco zonas, cada una con sus respectivos límites A_u (límite inferior), A_o (límite superior) y de ser necesario A_r . El evaluador deberá consignar a que tipo de zona corresponde su sitio de estudio y comparar los valores que obtenga con los límites señalados en la norma (ver tabla 3.3). La evaluación comienza mediante una ponderación en el dominio de la frecuencia. Esta función se caracteriza por ser una combinación de un filtro de 2 polos de pasa altas y bajas con características Butterworth, con frecuencias de corte de 0.8 Hz (-3 dB) (pasa altas) y 100 Hz (-3 dB) (pasa bajas solo para frecuencia de hasta 80 Hz). Realizada esta ponderación, se obtiene la severidad de vibración pesada rápida KBF. Se procede enseguida a evaluar los máximos de la severidad de vibración en ventanas de 30 segundos, y a obtener el máximo de estos: KBF_{max} . Su valor debe estar en el rango de los valores límite: A_u (límite inferior) y A_o (límite superior). Una vez confirmado que KBF_{max} se encuentra dentro del rango de evaluación, debe ponderarse por el tiempo de medición y obtener así la severidad de vibración KBF_{Tr} , y compararla con el valor guía A_r , definiendo así si se excede o no la norma, es decir si KBF_{Tr} excede A_r se está excediendo la vibración permisible que una persona debería experimentar. De no ser el caso, es decir si KBF_{Tr} no excede, A_r no se excede la vibración permisible. La secuencia anterior se encuentre en la figura 3.9.

Tabla 3.3: Valores guía para la evaluación de la vibración establecidos en la norma din 4150-2 (1999) durante el día.

Modificado de DIN 4150-2 (1999)

Zona	A_u	A_0	A_r
Industrial	0.4	6	0.2
Comercial	0.3	6	0.15
Mixta	0.2	5	0.1
Residencial	0.15	3	0.07
Especial	0.1	3	0.05

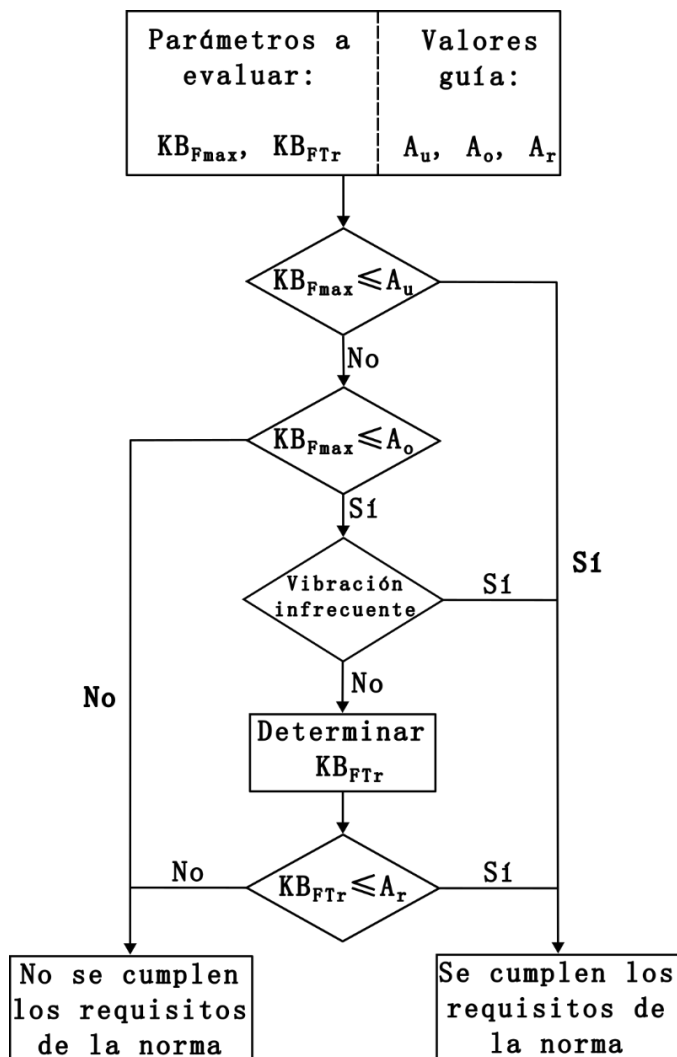


Figura 3.9: Diagrama de flujo de la norma din 4150-2 para la evaluación de la severidad de vibración.

Modificado de DIN 4150-2 Deutsches Institut für Normung e.V., 1999a

3.7. Curvas base de aceleración

Las curvas base de aceleración, son un conjunto de líneas de referencia que representan la respuesta humana a la vibración en diferentes frecuencias. Se utilizan para evaluar la severidad de la vibración. Los valores de las curvas de respuesta, a cada frecuencia, representan molestias o interferencias similares que la mayoría de las personas expresaría en el caso de estar expuesto a esas vibraciones. Los distintos tipos de *curvas base* evalúan:

- La vibración total del cuerpo: Se utiliza para estimar la vibración transmitida al cuerpo humano a través del asiento, suelo o plataforma.
- La vibración en manos y brazos: Se utiliza para estimar la vibración transmitida a las manos y brazos a través de herramientas o maquinaria.
- La vibración en el asiento: Se utiliza para estimar la vibración transmitida al cuerpo humano a través del asiento.

Las curvas base se grafican en escala logarítmica tanto para la frecuencia (eje X) como para la aceleración (eje Y). La aceleración se expresa en metros por segundo cuadrado [$\frac{m}{s^2}$].

Las curvas base se dividen en tres zonas en términos de la magnitud de la vibración:

Zona de confort La vibración por debajo de la curva base que se considera aceptable y no causa molestias significativas.

Zona de molestia La vibración en esta zona puede causar molestias y afectar la capacidad de concentración y la productividad.

Zona de riesgo de daño La vibración por encima de la curva base en esta zona puede causar daños a la salud, como dolor de espalda, problemas circulatorios y fatiga.

Las curvas base se utilizan para: a) comparar la severidad de la vibración con diferentes niveles de referencia. b) determinar si la vibración es aceptable o no para una actividad específica y c) evaluar la necesidad de medidas de control para reducir la vibración. Es

importante tener en cuenta que las curvas base son solo una herramienta de evaluación.

Las curvas base de aceleración se crearon a partir de una extensa investigación sobre la respuesta humana a la vibración como en Clarke de 1967, Coermann de 1940, Griffin en los 70's así como Miwa, Seidel en los 80's, entre otros. Esta investigación ha incluido estudios sobre:

- Los efectos de la vibración en la percepción humana, como la molestia, la fatiga y la capacidad de concentración.
- Los efectos de la vibración en la salud, como el dolor de espalda, los problemas circulatorios y el daño a los nervios.
- La influencia de la frecuencia, la magnitud y la duración de la exposición a la vibración en la respuesta humana.

Los valores específicos de estas curvas se basan en una serie de factores, que incluyen:

La frecuencia de la vibración La sensibilidad humana a la vibración varía con la frecuencia. Las vibraciones de alta frecuencia son más molestas y dañinas que las de baja frecuencia que tienen la misma magnitud.

La magnitud de la vibración La severidad de la vibración aumenta con la magnitud de la aceleración.

La duración de la exposición a la vibración El riesgo de molestias y daños a la salud aumenta con la duración de la exposición a la vibración.

En la norma ISO 2631 Organización Internacional de Normalización, 1985a Organización Internacional de Normalización, 1985b las curvas se dividen por tiempo de exposición (fig. 3.10) y el rango de exposición va de 1 minuto a 24 horas. Para la exposición de 1 minuto en los ejes horizontales la aceleración se mantiene constante en $0.6 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ hasta los 2 Hz y para el eje vertical la aceleración se mantiene constante en $0.9 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ entre los 4 y los 8 Hz. En comparación, para la exposición de 24 horas en los ejes horizontales la aceleración se

mantiene en $0.2 \left[\frac{m}{s^2}\right]$ hasta los 2 Hz mientras que en el vertical se mantiene constante en $0.3 \left[\frac{m}{s^2}\right]$ entre los 4 y los 8 Hz.

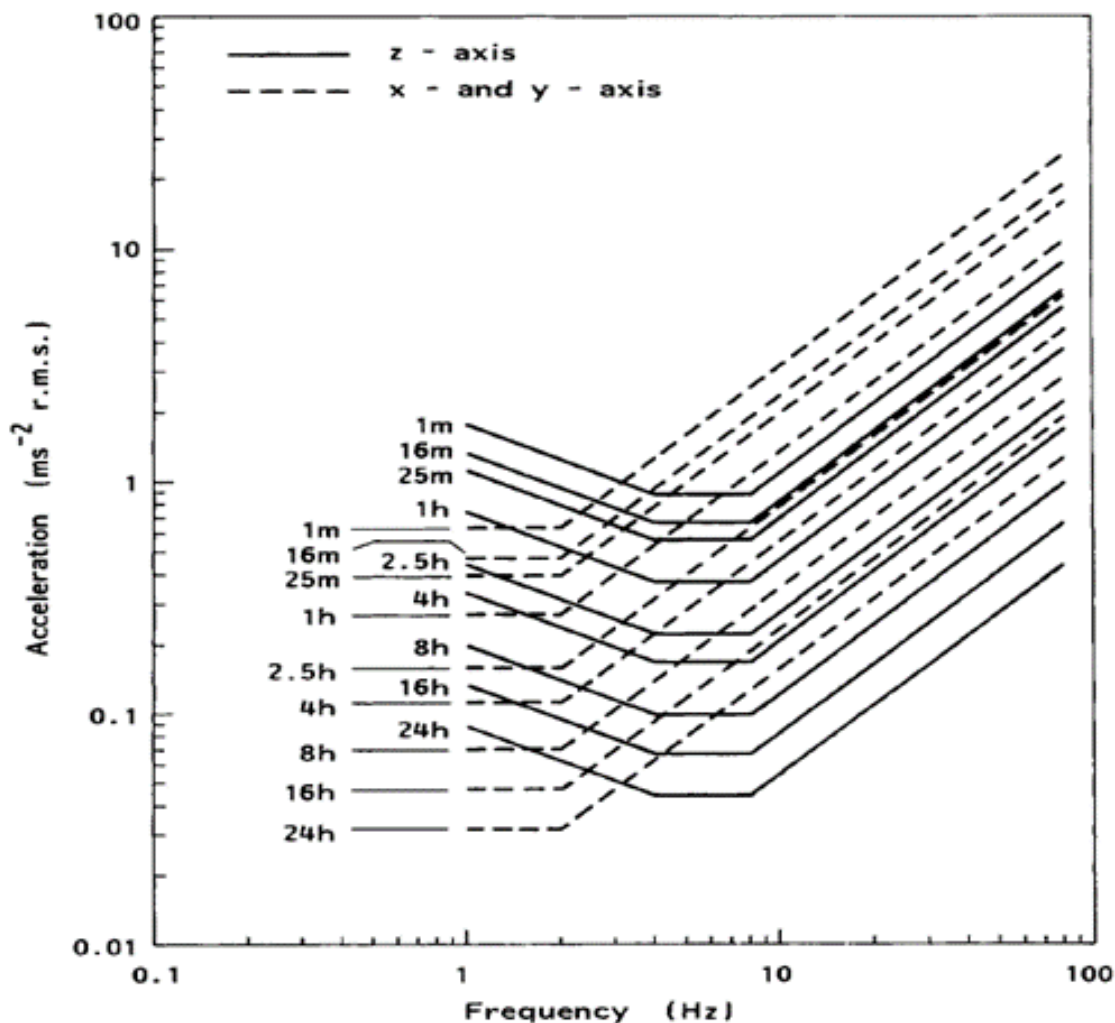


Figura 3.10: Límites reducidos para el confort para vibración traslacional definido en la norma internacional ISO 2631.

La norma británica BS 6841 Institution, 1987 divide la respuesta en seis categorías de acuerdo con la magnitud de la aceleración r.m.s. ponderada, asignando una categoría de percepción a cada zona. Las categorías van desde la percepción «no incómodo» hasta la «extremadamente incómodo». Ver tabla 3.4 y la figura 3.11 y 3.12.

Tabla 3.4: Intensidad aproximada de la percepción y niveles de incomodidad de varias magnitudes de vibraciones ponderada.

Categoría	Aceleración r.m.s ponderada	Categoría	Categoría	Aceleración r.m.s ponderada	Categoría
Percepción fuerte	0.315		Extremadamente incómoda	3.15	Muy incómoda
	0.25			2.5	
	0.2			2	
	0.16	Percepción fuerte	Incómoda	1.6	Apenas incómoda
	0.125			1.25	
	0.1			1	
Percepción muy ligera	.08	Percepción ligera	Un poco incómoda	0.8	No incómoda
	0.063			0.63	
	0.05			.5	
Percepción probable	0.04	Percepción improbable		.4	
	0.0315			.315	
	0.025			.25	
	0.02				
	0.016				
	0.0125				
	0.01				
	0.008				
	0.0063				
	0.005				

3.8. Curvas de ponderación

Son filtros analógicos y digitales obtenidos desde la experimentación de cuerpos humanos expuestos a vibración, hay curvas de ponderación propias a cada postura o relacionadas a la fuente de vibración y superficie de apoyo. Las ponderaciones ajustan las mediciones de vibración para reflejar mejor cómo diferentes frecuencias afectan al cuerpo humano en diferentes actividades y posturas. Este ajuste es crucial porque la sensibilidad del cuerpo humano a las vibraciones varía significativamente según la frecuencia de la vibración y la parte del cuerpo que está siendo expuesta.

La ponderación W_d es una curva de ponderación de frecuencia utilizada en la norma

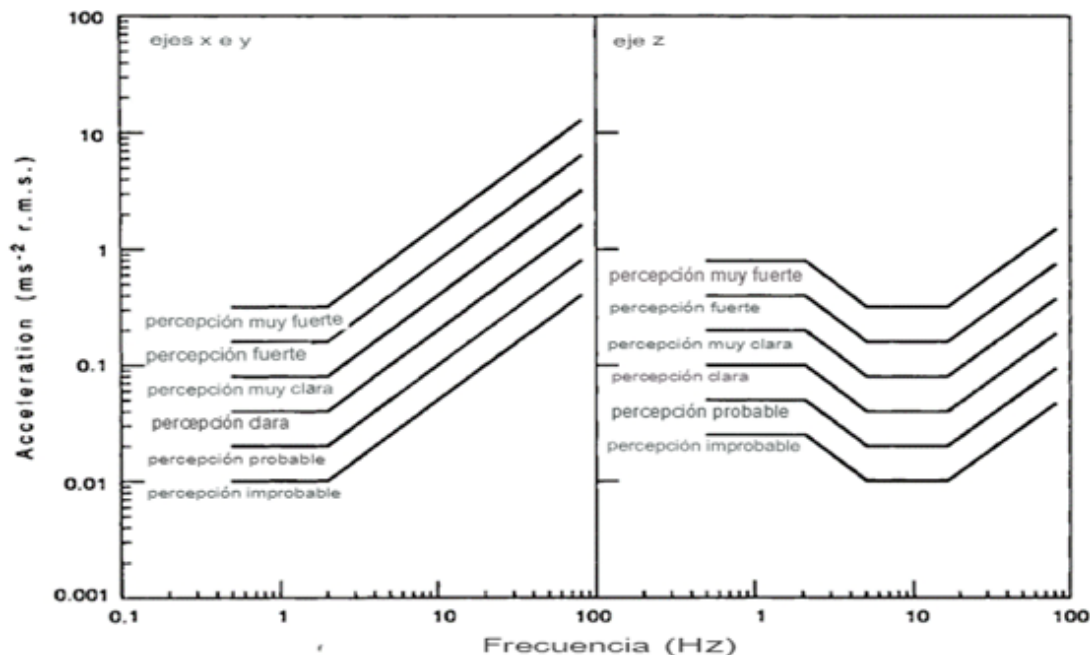


Figura 3.11: Límites reducidos para el confort para vibración traslacional definido en la norma internacional ISO 2631.

británica BS 6841 Institution, 1987 y la ISO 2631-1 Organización Internacional de Normalización, 1985a Organización Internacional de Normalización, 1985b para evaluar la exposición humana a la vibración en edificios. Su uso es adecuado para la superficie de asientos en dirección XY (fig. 82, apéndice A) y apropiado en la evaluación del malestar general producido por la vibración. La curva tiene un máximo a la frecuencia cercana a 1 Hz. La curva Wd atenúa las señales de baja frecuencia por debajo y arriba de 1 Hz y, de forma más significativa, aquellas señales de alta frecuencia (por encima de 80 Hz). Hay en la literatura al menos dos formas de lograr un filtro con estas características, el de la ISO 2631-1 Organización Internacional de Normalización, 1985a y en la BS 6841 Institution, 1987. Enseguida se describen los principales componentes del filtro relacionado a la curva Wd (fig.3.13).

La función total de transferencia $H_T(s)$ del filtro asociado a la curva Wd está conformada por filtros de delimitación de ancho de banda, de peso $H_{w1}(s)$, el filtro Butterworth pasa altas $H_h(s)$, el pasa bajas $H_l(s)$ y el filtro de transición aceleración-velocidad $H_t(s)$:

$$H_T = H_b(s)H_{w1}(s)H_h(s)H_l(s)H_t(s) \quad (3.2)$$

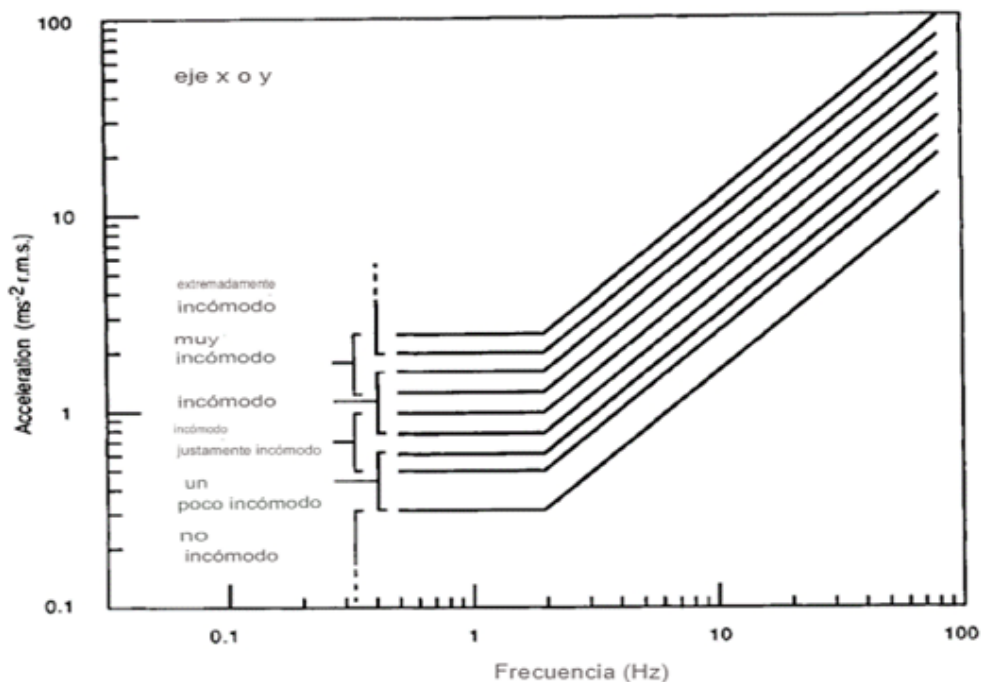


Figura 3.12: Reacciones subjetivas a diversas frecuencias y magnitudes de vibración sinusoidal de todo el cuerpo.

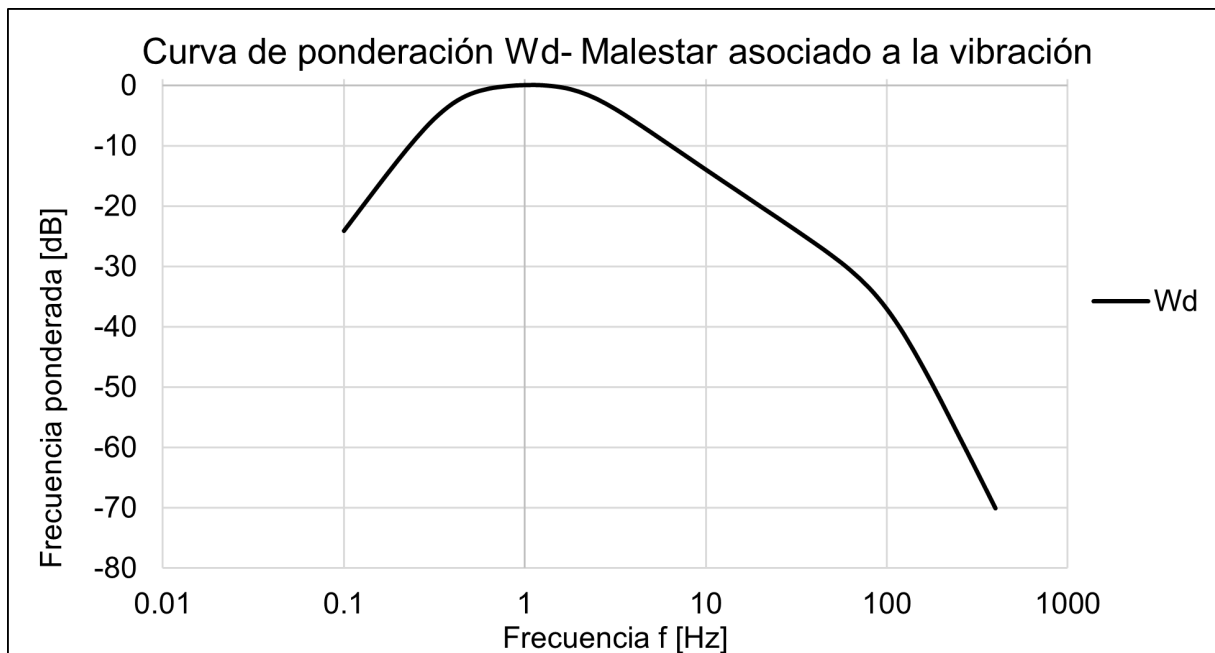
Tabla 3.5: Coeficientes de la ponderación W_d definidos en la ISO 2631

Ponderación	Ancho de banda		Trans. a-v		Continuación ascendente				
	f_1	f_2	f_3	f_4	Q_4	f_5	Q_5	f_6	Q_6
W_d	0.4	100	2	2	0.63	∞	-	∞	-

Tabla 3.6: Coeficientes de la ponderación W_d definidos en la BS 6841

Ponderación	Ancho de banda			Pesado							
	f_1	f_2	Q_1	f_3	f_4	f_5	f_6	Q_2	Q_3	Q_4	K
W_d	0.4	100	0.71	2	2	-	-	0.63	-	-	1

Otras curvas de ponderación de frecuencia para las diferentes posiciones y ejes de vibración son descritas en la tabla 3.7 en donde se incluye la W_f para la evaluación de la vibración de baja frecuencia que afecta el mareo. (ISO 2631,2009). Los filtros que se aplican

Figura 3.13: Curva de ponderación W_d .

en cascada para cada curva de ponderación se indican en la tabla 3.8 y se describen en el C. Las frecuencias y los factores de calidad para cada curva de ponderación se consignan en el apéndice C, a través de una serie de filtros los cuales se aplican en cascada (tabla 3.8) descritos en el C. Tabla 7. Ponderaciones: uso, valor pico y rango de frecuencia de las normas ISO 2631 Organización Internacional de Normalización, 1985a Organización Internacional de Normalización, 1985b ,BS 6841 Institution, 1987 y DIN 4150 Deutsches Institut für Normung e.V., 1999a.

Tabla 3.7: Ponderaciones de aceleración y velocidad en función de los rangos de frecuencia.

Aceleración			
Ponderación	Uso	Pico (Hz)	Rango de frecuencia (Hz)
Wb	Asientos-Vertical	8 Hz	1-80 Hz
Wc	Respaldos-Horizontal	4 Hz	1-80 Hz
Wd	Asientos/Malestar general	1 Hz	1-80 Hz
We	Rotaciones	0.8 Hz	0.1-400 Hz
Wf	Mareo	0.2 Hz	0.2-4 Hz
Wg	Interferencia en actividades	10 Hz	0.2-80 Hz
Wh	Vibraciones mano-brazo	16 Hz	1-1000 Hz
Wj	Vibraciones en la cabeza	25 Hz	0.1-400 Hz
Wk	Fatiga	6 Hz	0.1-400 Hz
Wm	Edificios	4 Hz	0.1-80 Hz
Velocidad			
HBnom	-	-	1-1000 Hz

Tabla 3.8: Filtros para cada ponderación.

Norma	BS 6841			ISO 2631-1 y 2631-2			
Ponderación	Delimitación de ancho de banda	Pesado Hw1	Pesado Hw2	Butterworth Pasa altas	Butterworth Pasa bajas	Transición aceleración-velocidad	Continuación ascendente
Wb	✓	✓					
Wc	✓	✓		✓	✓	✓	
Wd	✓	✓		✓	✓	✓	
We	✓	✓		✓	✓	✓	
Wf	✓		✓	✓	✓	✓	✓
Wg	✓	✓					
Wh	✓	✓					
Wj				✓	✓	✓	
Wk				✓	✓	✓	
Wm				✓	✓	✓	✓

Capítulo 4

Metodología

Se tratan 2 casos de evaluación de la vibración evaluados con EViiCON, software que creamos para el tratamiento y análisis de los registros obtenidos en los experimentos que realizamos. Los experimentos se realizaron en la Ciudad de México. En el primer caso, se reporta la percepción de la vibración sin verse comprometida la integridad estructural en el Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT), ubicado al norte de la ciudad. En el segundo caso se seleccionaron diversos medios de transporte público de la Ciudad de México: Línea 3 del metro, Línea 1 del Metrobús, Tren Ligero y Combi.

4.1. Evaluación de la vibración mediante el software EViiCON

El software EViiCON, que fue desarrollado en el Instituto de Ingeniería, consta de varias rutinas escritas en Python que analizan registros de aceleración y velocidad considerando los parámetros de los descriptores, ponderaciones y valores límites establecidos en las normas internacionales ISO 2631-1, BS 6841 y la DIN 4159. Los descriptores son métricas o parámetros que se utilizan para evaluar y cuantificar las características de las vibraciones en diferentes escenarios (tabla 4.1).

Cuenta con interfaces gráficas donde se puede elegir entre la evaluación de registros de aceleración o velocidad. Para el caso de aceleración se introducen los parámetros de

Tabla 4.1: Descriptores de vibración definidos en la norma ISO 2631-1, BS 6841 y DIN 4150.

Descriptor	Ecuación	Definición
Aceleración		
Factor de cresta FC	$CF = \frac{V_p}{a_w}$	Relación entre los valores pico y los valores de aceleración r.m.s. a_w
Aceleración r.m.s. a_w	$a_w = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt}$	Representa la magnitud promedio de la aceleración en la señal
Aceleración operante lenta $a_{w,\tau}(t_0)$	$a_{w,\tau}(t_0) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_0^t a_w^2(\xi) e^{\frac{t-\xi}{\tau}} d\xi}$	Se utiliza para capturar eventos transitorios y choques ocasionales en la señal de vibración
Valor de Vi- bración Transi- toria Máxima (MTVV)	$MTVV = \text{máx}[a_w(t_0)]$	El máximo valor de la aceleración operante lenta ponderada
Nivel de Acelera- ción (L_w)	$L_w = 20 \log \left(\frac{a_w(t)}{a_0} \right) [dB]$	Representa la medida del nivel de intensidad de la vibración
Valor de Dosis de Vibración (VDV)	$VDV_{dia/noche} = \sqrt[4]{\int_0^T a^4(t) dt}$	Proporciona la probabilidad de comentarios adversos a la vibración.
Velocidad		
Severidad de vi- bración KB_F	$KB_F = \sqrt{\frac{1}{.125} \int_0^t KB^2 e^{\frac{t-\xi}{\tau}} d\xi}$	Permite evaluar un registro en ventanas rápidas
Severidad de vi- bración KB_{FTR}	$KB_{FTR} = KB_{FTm} \sqrt{\frac{T_c}{T_d}}$	Permite evaluar un registro en periodo diurno y nocturno de exposición

fecha, equipo, localidad, factor de corrección y alguna ponderación de las establecidas en la tabla 3.7. Para el caso de velocidad se introduce el valor de ganancia así como los polos y ceros proporcionados de la hoja de calibración del sensor y se elige en qué tipo de zona se quiere hacer la evaluación de las establecidas en la tabla 3.3. Al finalizar, se obtiene un directorio donde se habrán creado carpetas que contienen las gráficas producto de la evaluación de cada registro y un reporte en formato docx o PDF que contiene los resultados

de cada registro, integrados en una tabla con un dictamen sobre si está por debajo, encima o dentro de los parámetros de evaluación que consideran las normas correspondientes. Se utilizó EViiCON para determinar y evaluar los niveles de vibración de los registros adquiridos en el CCUT y en los sistemas de transporte colectivo medidos, siguiendo el diagrama de flujo de la figura 4.1. Las normas indican que los registros de aceleración deben estar en $(\frac{m}{s^2})$ y los de velocidad en $(\frac{mm}{s})$, por lo que como parte del preprocesado se adecuaron los registros a estas unidades.

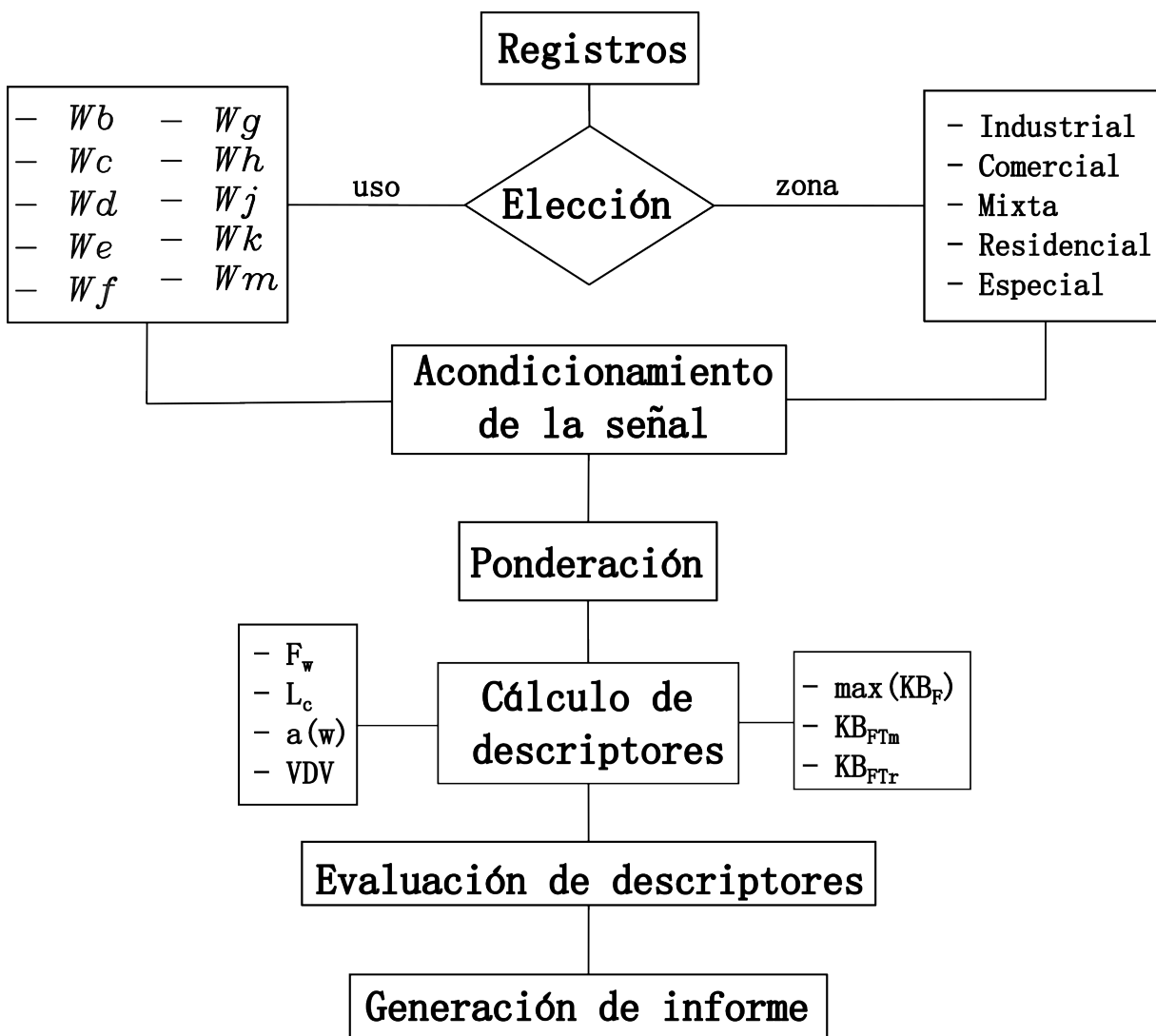


Figura 4.1: Diagrama de flujo del sistema EViiCON

4.2. CASO 1: Planificación del proyecto- CCUT

Las primeras mediciones se hicieron en la torre del Centro Cultural Universitario Tlatelolco (CCUT). El complejo CCUT es un grupo de tres estructuras de dos pisos y una torre de 22 pisos, construidos ambos en 1964. Está ubicado dentro de la zona geotécnica tres (de suelo blando, fig. 4.2) de la ciudad de México. Desde su más reciente readaptación terminada en 2009, la torre esta instrumentada con estaciones acelerométricas y geoposicionadores (Muria et al., 2020). Actualmente la torre del complejo no está totalmente ocupada, pero alberga tanto al personal que atiende el complejo CCUT como foros y oficinas de UNAM.

Se seleccionó instrumentar temporalmente la torre del CCUT con el objeto de aportar información experimental al análisis de las vibraciones a las que están expuestas las personas que trabajan o visitan la torre.

4.2.1. Condiciones geológicas:

En Ciudad de México, una parte significativa del área urbana se asienta sobre suelos blandos, específicamente sobre los sedimentos lacustres del antiguo Lago de Texcoco. Parte de la alcaldía Cuauhtémoc, en donde se localiza el CCUT, se encuentra en la zona del lago conformada por sedimentos blandos de arcillas altamente compresibles, limos y arenas, que actúan como filtros que amplifican las ondas sísmicas, incrementando el riesgo durante eventos sísmicos. Las frecuencias dominantes (fig.4.2) del suelo medidas en el entorno del complejo CCUT están en el intervalo entre 0.51 y 0.53 Hz, determinado mediante un estudio de vibración ambiental. Rodríguez et al., 2018. La alcaldía se ubica en la zona II, correspondiente a la zona de transición, donde los depósitos profundos se encuentran a 20 metros de profundidad o menos. También se extiende a las zonas IIIa, IIIb y IIIc del Lago, que están formadas por sedimentos de arcilla altamente compresibles, según la clasificación de zonas geotécnicas. El CCUT se encuentra específicamente en la zona IIIb (ver fig. 4.2).

Se instalaron diez equipos distribuidos de forma que los sitios coincidieran con aquellos de los acelerómetros de la red permanente de la torre. Uno en campo libre, tres equipos en el sótano, tres en el décimo piso y otros tres en el piso 21. La Fig.4.3 y en, tabla 4.2 reportan estas posiciones. La orientación del equipo dentro del inmueble fue hacia el Norte geográfico, de modo que la dirección Norte-Sur corresponde en nuestros registros con el componente transversal. La dimensión mayor de la torre está orientada, aproximadamente al Este-Oeste.

Los equipos se configuraron para hacer registros de una hora y a dos cadencias de muestreo: 100 y 200 muestras por segundo. Los equipos operaron ininterrumpidamente desde que se instalaron hasta que se retiraron, periodo que abarcó, aproximadamente, desde el mediodía del viernes 17 de mayo de 2024 hasta el mediodía del jueves 23 de mayo de 2024, esto es cerca 160 horas.

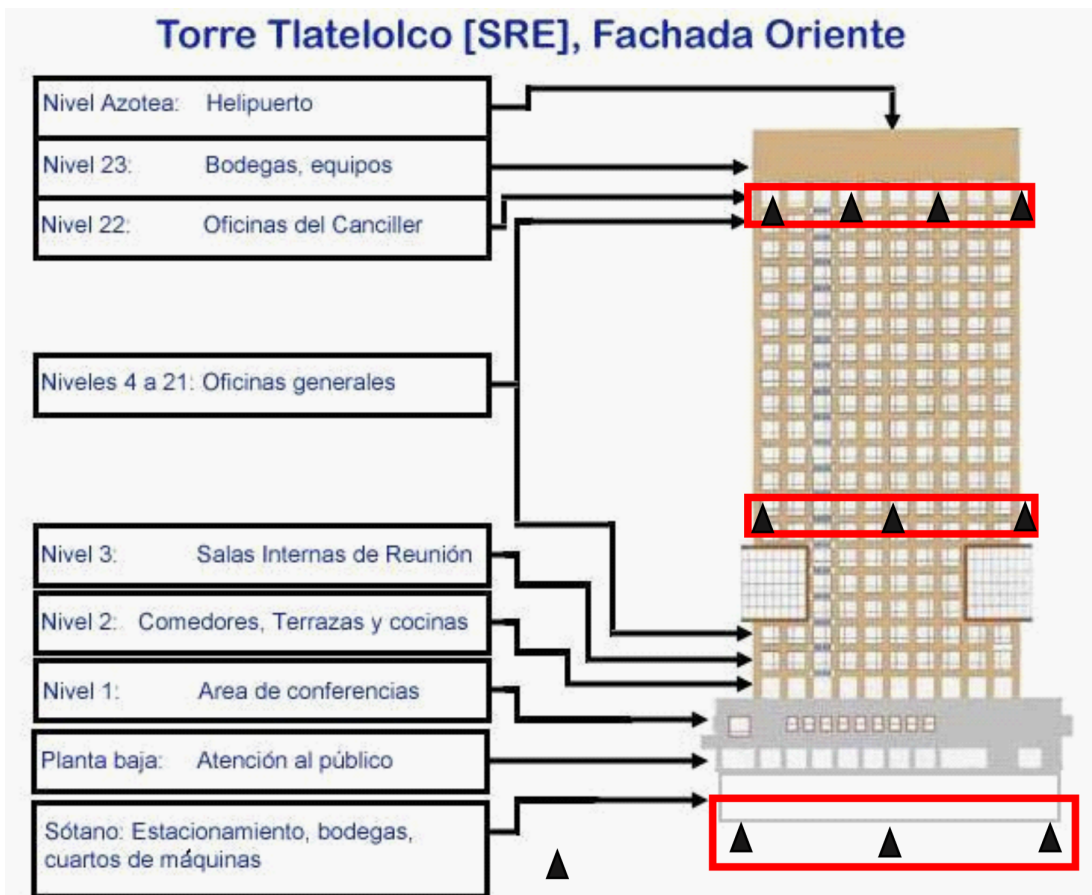


Figura 4.3: Ubicación de los sismómetros (triángulos negros).
Tomado de: SRE

El control y configuración de los equipos se hizo con el paquete SCREAM, propiedad de la compañía GURALP.

El procedimiento es el siguiente:

1. Cada sismómetro es conectado a la alimentación de una batería de 12V y a una antena GPS a través del breakout box.
2. Con el software Scream, se encienden los equipos a través del puerto serial USB-RS22, esperando hasta que se sincronicen con la antena GPS y coincida la hora UTC.
3. Inicialmente el tiempo de cada equipo fue tomado de su correspondiente geoposicionador el que fue desconectado antes de ser instalados en la torre.
4. En los casos en que los sitios seleccionados estuvieran cerca de un contacto de ali-

mentación eléctrica de la torre, el equipo se alimentó mediante el convertidor correspondiente.

5. Para retirar los equipos, basta quitar la alimentación y retirarlos del lugar.

Tabla 4.2: Descripción de la ubicación de los sensores.




Ubicación	Sensor	Lugar	100 Hz	200 Hz	Evidencia fotográfica
Campo libre	T6N67	Explanada	✓	✓	
Sótano	T6N52	Bodega	✓	✓	
	T6N61	Oficina	✓	✓	
	T6N65	CCT3	✓	-	
Piso 10	T6N82	Esquina SW	✓	-	

Tabla 4.2 – continuación

Ubicación	Sensor	Lugar	100 Hz	200 Hz	Evidencia fotográfica
	T6N50	Cubículo	✓	✓	
	T6N73	Sala multi-usos	-	-	
Piso 20	T6N60	Subestación	-	-	
	T6N57	Oficina Rector	✓	-	
	T6N62	Cocina Rector	✓	✓	
	T6N56	Sala Rec-tor	-	-	

4.3. CASO 2: Sistema de Transporte Público CDMX

4.3.1. Objetivos

. Determinar si los niveles de vibración en los diferentes tipos de transporte público (fig.4.4): Metro (línea 3), Metrobús (línea 1), Tren Ligero, combi y la plataforma de la estación Copilco, sobrepasan los límites permisibles establecidos en las normas internacionales y en las normas técnicas complementarias de diseño por sismo.

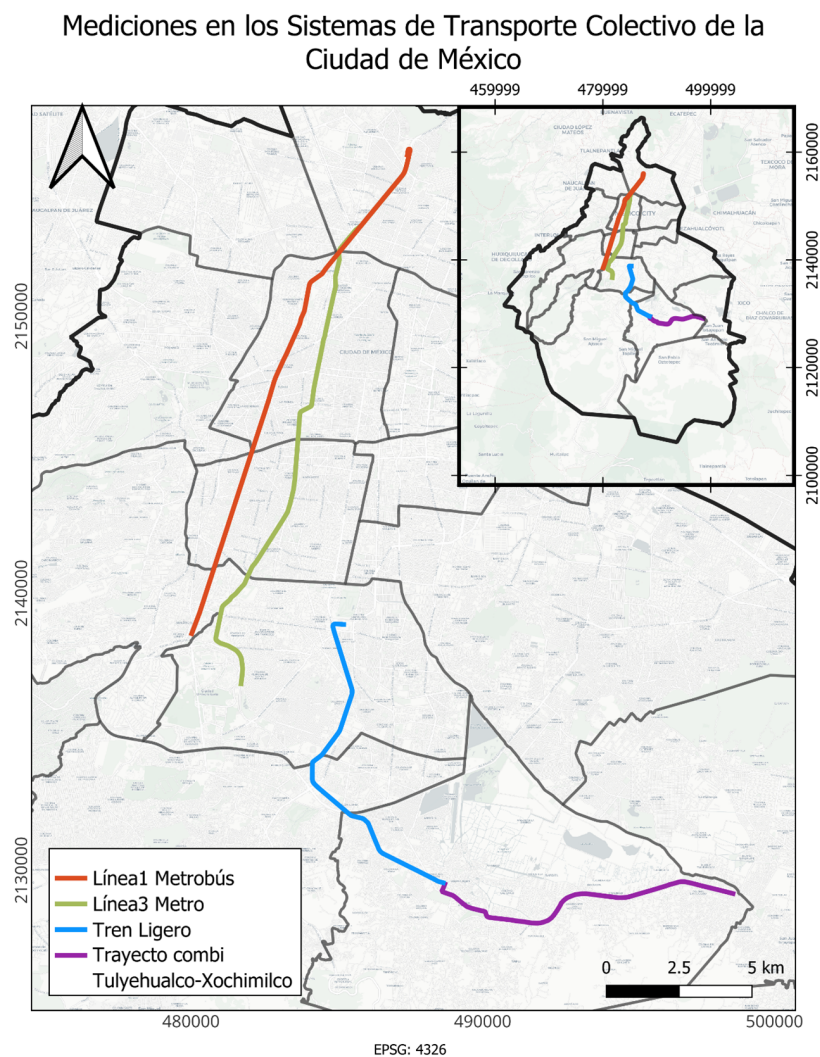


Figura 4.4: Ubicación de los sistemas de transporte donde se realizaron mediciones de aceleración.

4.3.2. Selección de equipos

En el STC, se usaron los acelerómetros de un teléfono iPhone 10 y un Samsung Galaxy M20 a través de una aplicación de la Play Store “Physics Toolbox Sensor Suite” que contiene diversas opciones de medición como fuerza G, acelerómetro lineal, barómetro, magnetómetro, y brújula. Se usó el acelerómetro lineal en su componente N,E y Z registrando en tiempo en hora de la CDMX. La aplicación guarda los datos en un archivo .csv con un muestreo de 0.002 s aproximadamente, dependiendo del celular. El iPhone 10 incorpora un acelerómetro de 3 ejes fabricado por STMicroelectronics o Bosch Sensortec, dependiendo del modelo. Este sensor puede medir la aceleración del dispositivo en tres direcciones (X, Y, Z) con un rango de medición de $\pm 2g$ y $\pm 16g$, seleccionable según las necesidades. La resolución también es ajustable, con opciones de 12 bits o 16 bits, lo que permite una mayor precisión en la medición. El ancho de banda del sensor es ajustable desde 0.01 Hz hasta 1.56 kHz, tiene una sensibilidad de 0.000244 g/LSB (Less Significant Bit). El Samsung Galaxy M20 está equipado con un acelerómetro de 3 ejes tipo MEM, que mide en los ejes x, y, z. Este tipo de acelerómetro tiene un rango de medición típicamente entre $\pm 2g$ y $\pm 16g$. La frecuencia de muestreo puede alcanzar hasta 100 Hz, dependiendo del modelo y configuración. La resolución en bits de los acelerómetros en los dispositivos móviles suele ser de 10 a 12 bits. El ancho de banda del sensor es ajustable desde 0.01 Hz hasta 1 kHz, tiene una sensibilidad de 0.00006103 g/LSB.

4.3.3. Mediciones y ubicación de los celulares

Metro

Las mediciones en el STC Metro (fig.4.5) se hicieron en la línea 3 Indios Verdes-Universidad durante 20 min aproximadamente. La componente N se alineó en la dirección de avance del convoy en su componente longitudinal, tomados los registros en el segundo vagón en dirección a Indios Verdes.



Figura 4.5: Diagrama de un vagón del metro.

Metrobús

Las mediciones se realizaron en el autobús biarticulado (fig.4.6) en la línea 1 del Metrobús Indios Verdes- Dr. Gálvez, durante 30 min aproximadamente. La componente N se alineó en la dirección de avance del autobús en su componente longitudinal.



Figura 4.6: Diagrama del autobús biarticulado del Metrobús.

Tren ligero

Las mediciones se realizaron la línea 1 del tren ligero (fig. 4.7) que opera al sur de la ciudad con ruta Taxqueña-Xochimilco. Su duración fue de 10 min aproximadamente. La componente N se alineó en la dirección de avance de la unidad en su componente longitudinal.



Figura 4.7: Diagrama del tren ligero.

Combi

Las mediciones que se realizaron durante 35 min aproximadamente, en el transporte público de la combi (fig. 4.8) al sur de la ciudad, que opera en la zona de Xochimilco. La componente N se alineó en la dirección de avance de la unidad en su componente longitudinal. La medición se realizó en los asientos de la parte trasera de la unidad.



Figura 4.8: Diagrama del una combi.

4.4. Procesamiento

4.4.1. CASO 1: Centro cultural universitario Tlatelolco

El material requerido para realizar la extracción de datos de cada sismómetro es:

- Disco duro externo exclusivo de Guralp.
- Una caja de conexiones (breakout box).
- Cables de interconexión.
- Ordenador

Uno de los procedimientos posibles inicia conectando el ordenador al equipo y ejecutando el programa SCREAM para enseguida abrir una ventana “terminal” y correr los comandos siguientes:

1. **ok-1** Inicia la comunicación con el equipo.
2. **flush** Se usa para iniciar la descarga de los registros obtenidos desde la descarga más reciente o el comando **flushall** para descargar toda la base de datos.

Posteriormente, se desconecta el disco duro del sensor y se conecta a la laptop para escanear y extraer los registros con el software GCFExtract de la compañía Guralp.

Preprocesamiento de datos

Los archivos extraídos quedaron en formato GCF. El formato GCF (Generic Common Format) es un estándar desarrollado para la estandarización y compatibilidad en el intercambio de datos sísmicos, utilizado por los sismómetros Guralp. El formato GCF se compone de varias secciones clave: un encabezado que incluye metadatos como la fecha y hora de adquisición, el identificador del sismómetro y detalles del archivo; los datos de señal que contienen las series temporales de aceleración, velocidad o desplazamiento en un formato binario para mayor eficiencia; metadatos adicionales sobre la estación sísmica y la calibración del equipo; y un control de calidad que informa sobre el estado del equipo. Dado que el sistema EViiCON recibe los datos en formato SAC, los archivos GCF se convierten a SAC utilizando nuevamente el programa SCREAM.

Acondicionamiento de las señales obtenidas y la corrección instrumental.

Los registros obtenidos por los sismógrafos son una versión modificada del movimiento del terreno debido a que cada equipo responde según su función de transferencia. La forma en que los sismógrafos 6TD responden a la velocidad del terreno según la frecuencia, entre 0.033 y 100 Hz, es plana, el movimiento del terreno se convierte en un registro que lo reproduce tal cual. Para frecuencias menores a 0.033 Hz y mayores a la frecuencia de Nyquist la respuesta decrece como f^{-2} y f^{-4} , respectivamente.

Las unidades de los registros obtenidos son [cuentas], correspondientes al voltaje con el que el sensor de movimiento responde a una entrada en velocidad [m/s]. Este voltaje se convierte a digital mediante el conversor analógico/digital (A/D) integrado en el elemento registrador. Para transformar el registro de cuentas a velocidad, debe tenerse en cuenta que:

1. El sensor tiene la capacidad de convertir el movimiento en voltaje a unidades de [Voltio/m/s].
2. Es común que el voltaje generado sea pequeño por lo que debe amplificarse con un factor de ganancia.
3. Las características del conversor debido a que el voltaje ya amplificado entra en el conversor A/D para obtener una serie en unidades del conversor [cuentas]

Un parámetro adicional que debe considerarse es el filtro antialias que previene un muestreo adecuado. Para hacer la corrección instrumental deben considerarse al menos dos casos. El primero es que el análisis de los registros se hará dentro del ancho de banda en que la respuesta de los equipos 6TD es plana, así los registros pueden convertirse a unidades de velocidad con un factor que se obtiene según se consigna en la figura siguiente:

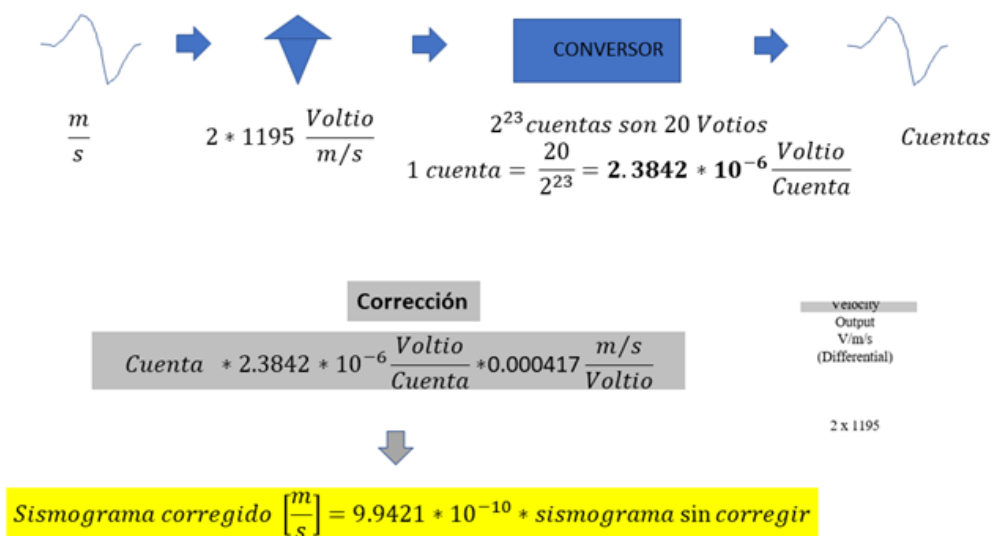


Figura 4.9: Cálculo del factor de corrección

El segundo caso es aquel en que se tenga el interés de corregir los registros obtenidos debido a la forma de la respuesta, a frecuencias menores que la frecuencia natural del sensor ($f_0=0.033\text{Hz}$) y mayores que la frecuencia de corte requerida para un muestro adecuado ($f_c=0.8$ de la frecuencia de Nyquist). Es común calcular la función de transferencia en el dominio de la frecuencia y deconvolucionar el registro para obtener un sismograma corregido. En este trabajo se hizo de manera diferente, en el dominio del tiempo, mediante la transformada bilineal. La Fig. 4.10 consigna la comparación entre las señales obtenidas al hacer las correcciones en el dominio del tiempo y de la frecuencia.

En el apéndice E se incluye una descripción breve del procedimiento utilizado.

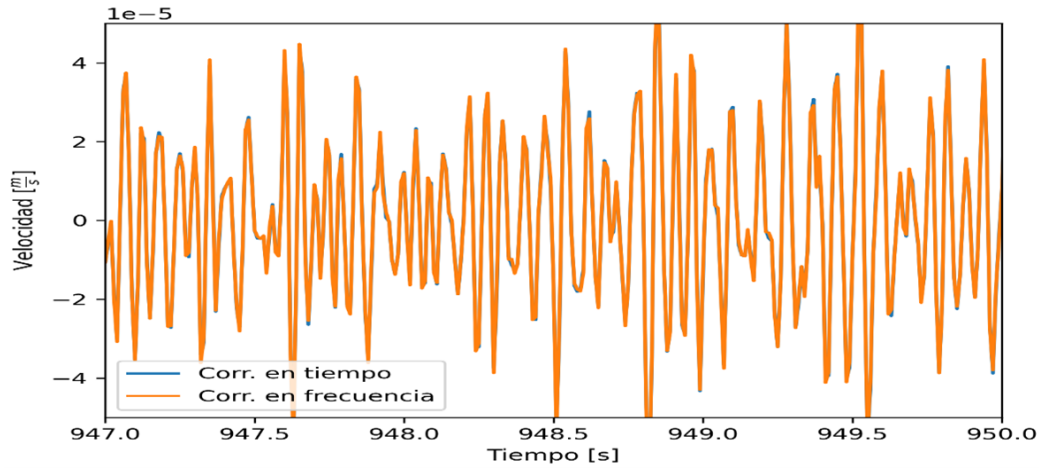


Figura 4.10: Comparación entre correcciones instrumentales.

Conversión de velocidad a aceleración.

En el presente estudio se utiliza `np.gradient` de la biblioteca Numpy para calcular la aceleración a partir de los datos de velocidad obtenidos de las mediciones experimentales. La velocidad, que es una medida del cambio de posición respecto al tiempo, debe ser convertida a aceleración para evaluar los niveles de vibración de acuerdo con la norma ISO 2631 y BS 6841 (fig. 4.11). La función `np.gradient` calcula el gradiente de una función definida en un espacio discreto. En el caso de datos unidimensionales (datos que dependen de una sola variable), el gradiente corresponde a la derivada numérica de la función, mientras que, en datos multidimensionales (datos que dependen de múltiples variables X, Y o Z), proporciona las derivadas parciales a lo largo de cada eje.

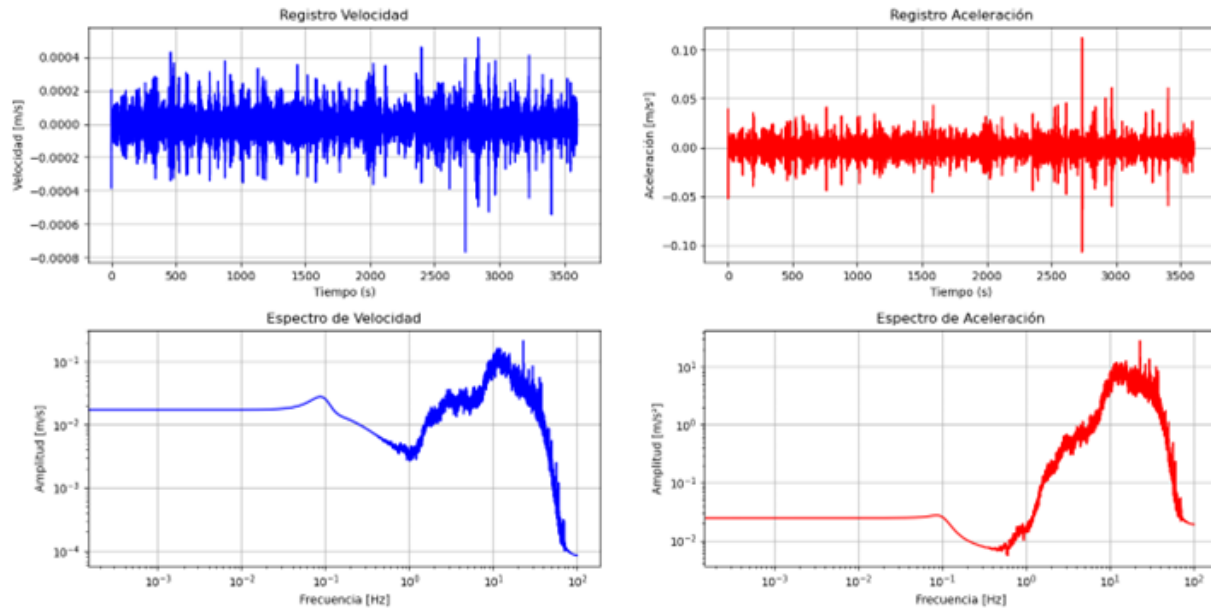


Figura 4.11: Ejemplo de conversión de registro de velocidad a aceleración y sus espectros de amplitud.

Se realizaron los registros de tambor -los cuales permiten apreciar un periodo de medición en una componente dispuesto en renglones y normalizado, lo que facilita mostrar el comportamiento del registro- con los registros de velocidad para los días de grabación, con el propósito de captar el comportamiento dinámico del terreno (figura 4.12), donde las partes sombreadas en morado corresponden al horario nocturno de 10 pm a 6 am.

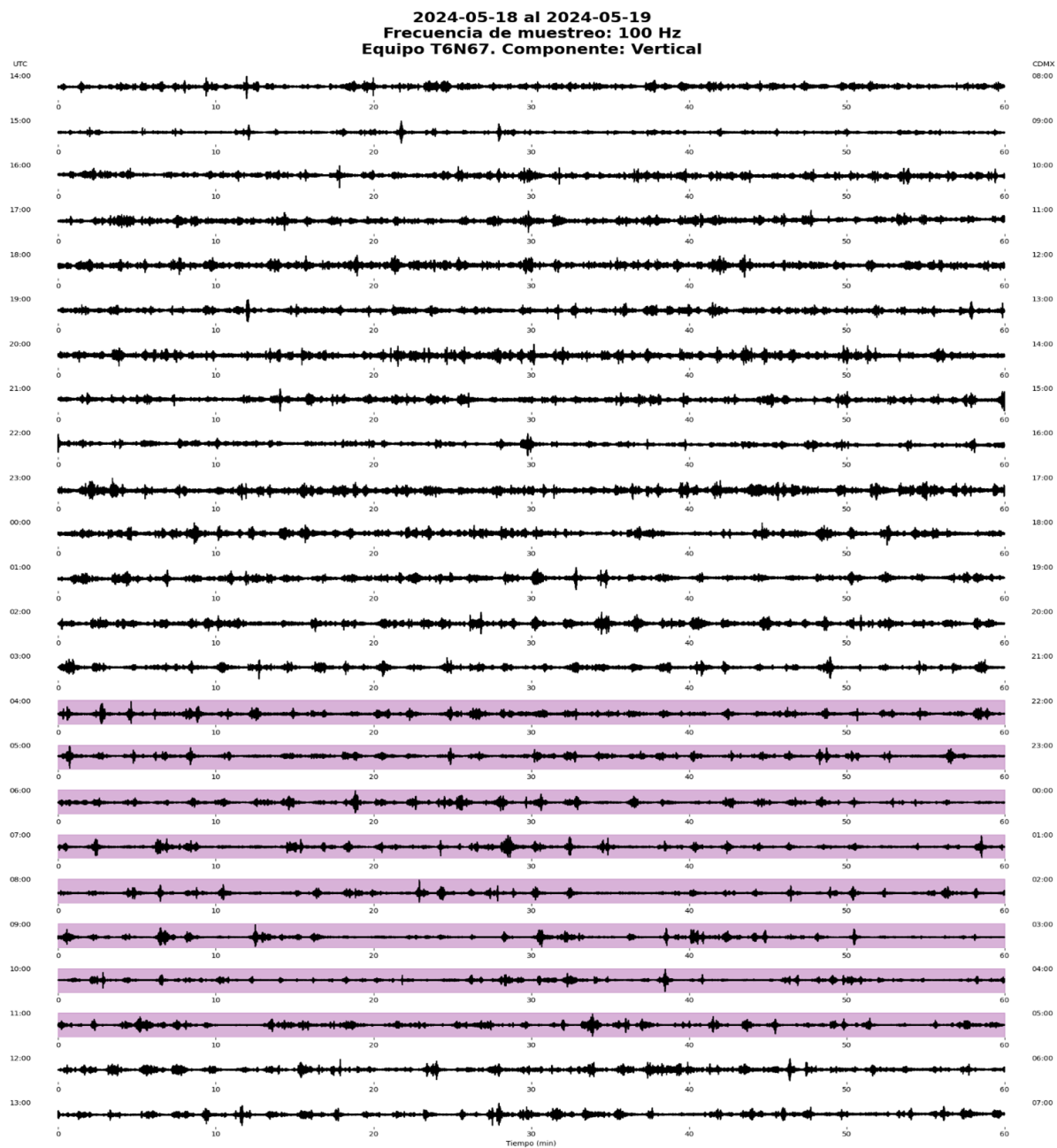


Figura 4.12: Registro de tambor del 18 de mayo de 2024.

Evaluacion de la vibración utilizando el software EViiCON

Para determinar y evaluar los niveles de vibración de los registros adquiridos en el CCUT y en los sistemas de transporte colectivo, se utilizó el software EViiCON. Las normas indican que los registros de aceleración deben estar en $[\frac{m}{s^2}]$ y los de velocidad en

$[\frac{mm}{s}]$, por lo que parte del preprocesado es llevar los registros a estas unidades.

Análisis previo

En un análisis simultáneo de los registros obtenidos de los diferentes niveles del edificio y del campo libre (fig.4.13) medidos el domingo 19 de mayo a las 3 am (UTC), se pueden observar que los impulsos registrados en campo libre y son amplificados en los pisos 10 y 20. Se eligió este día porque no es laboral y el tráfico no es tan pesado aunque siga siendo un factor.

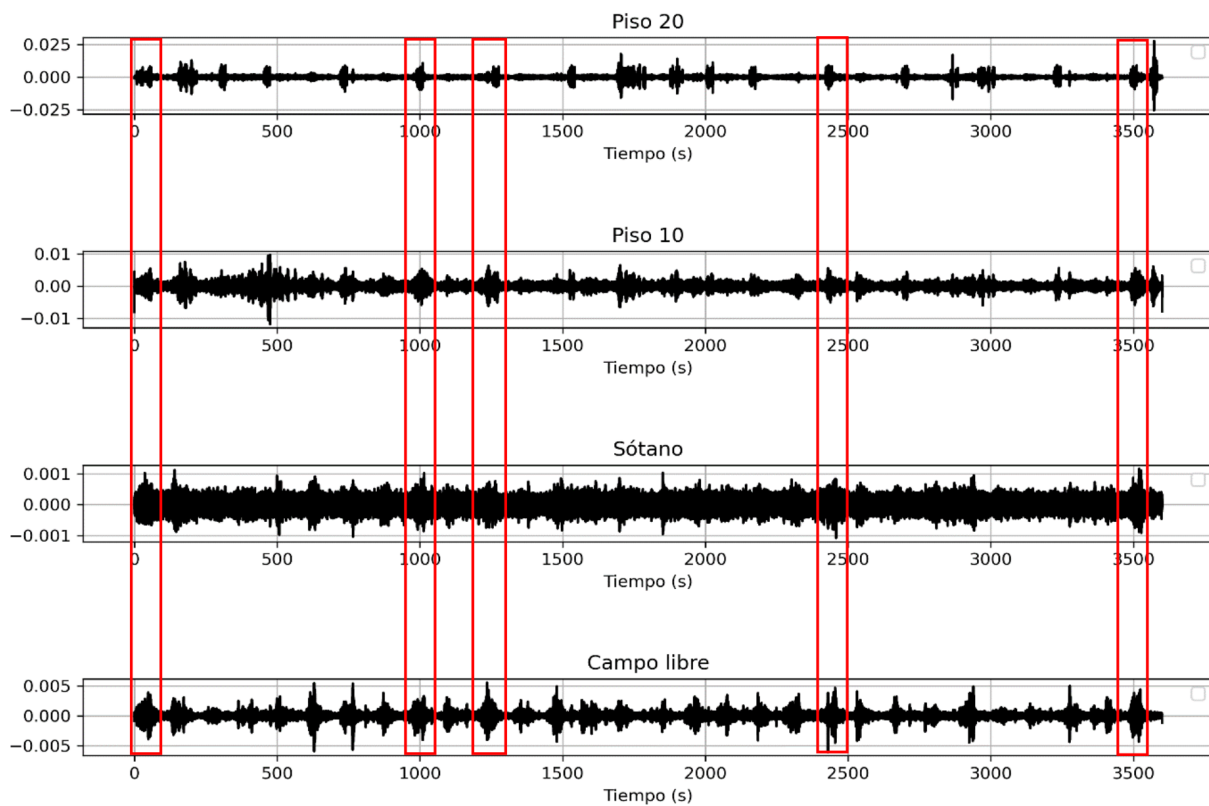


Figura 4.13: Registro de aceleración domingo 19 de mayo 3 am (UTC), componente E.

El espectrograma (fig. 4.14) muestra pulsos asociados al tránsito vehicular, evidenciados en una frecuencia cercana a 10 Hz, lo que puede estar relacionado con la intensidad del tráfico en el área cercana.

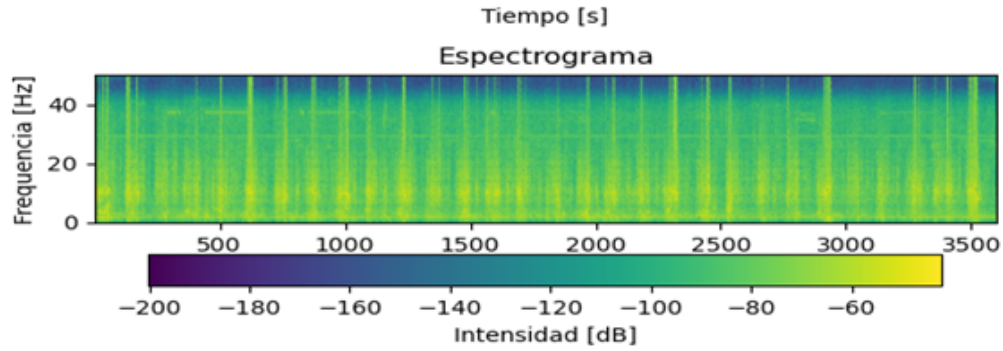


Figura 4.14: Espectrograma del registro de aceleración Domingo a las 3 a.m. UTC

Una forma de calcular el promedio de una señal en una ventana de tiempo es integrando la señal en esa ventana. Esto aunado a una ponderación como la que se logra multiplicando la señal por una exponencial decreciente, permite dar mayor peso a valores cercanos entre sí y menor peso a los lejanos. Es de esta forma que los descriptores de severidad de vibración KB_F y Arms operante funcionan, un ejemplo de ello considerando la norma DIN 4150 se presenta en la figura 4.15.

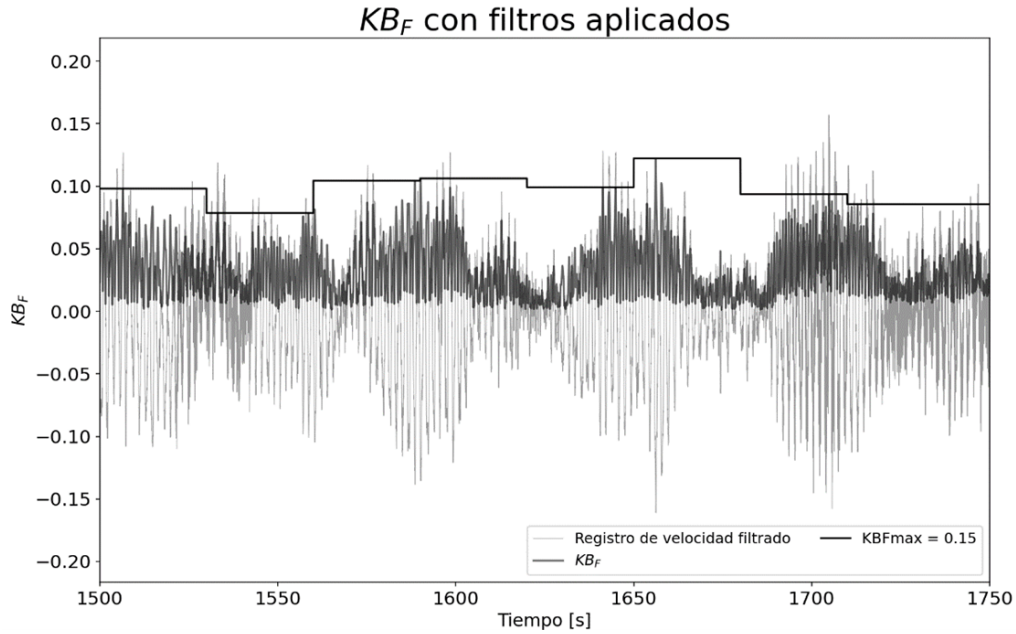


Figura 4.15: KB_F por ventanas

La aceleración r.m.s. ($a_w(t_0)$) operante, (fig.4.16) es una medida utilizada en la evaluación de la vibración para caracterizar la amplitud máxima de respuesta que una persona

o estructura puede soportar de manera continua sin sufrir daños. Al calcularse en ventanas de 1 segundo se está evaluando la amplitud máxima de las vibraciones en intervalos cortos y específicos. El valor transitorio máximo de vibración (MTVV) representa la amplitud máxima de las vibraciones que ocurren a lo largo del registro, generadas, entre otras fuentes, por el paso de vehículos o maquinaria pesada, mientras que $a_w(t_0)$ representa al promedio de la amplitud máximo local de cada ventana.

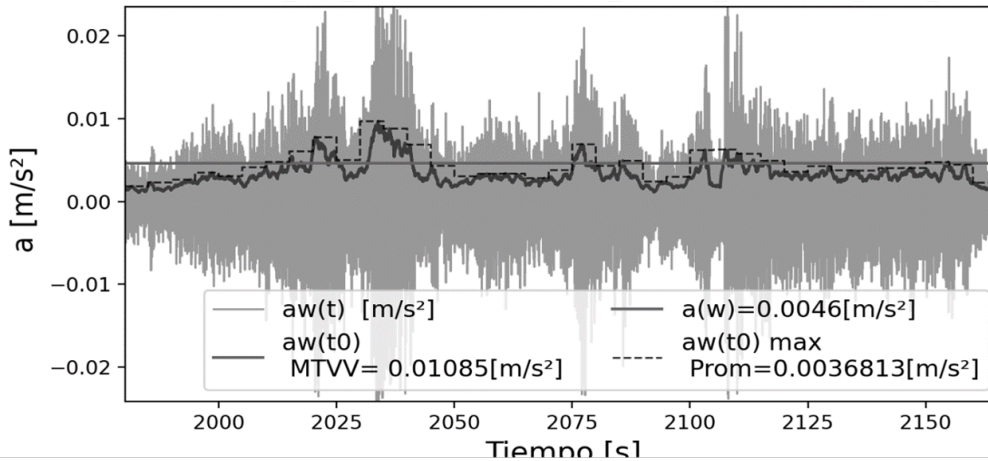


Figura 4.16: Acelerograma, a r.m.s. y MTVV del registro del día 19 de mayo.

Los valores obtenidos con este procedimiento permiten realizar un acercamiento al comportamiento de la vibración en una ventana definida como rápida, pues son de 120 segundos para velocidad. Aunado a este análisis se calculan espectros de potencia para aceleración (fig. 4.17) y velocidad (fig 4.18) mediante el método de Welch (los ejemplos aquí mostrados toman como unidad de vibración al cuadrado como nivel de referencia, esto es $1 [(\frac{m}{s})^2]$ o $1 [(\frac{m}{s^2})^2]$, dependiendo si se esta evaluando velocidad o aceleración, respectivamente) y filtrándolos en tercios de octava. Los valores en tercios de octava se tomaron conforme a lo estipulado en Havskov, esto es se consideró el valor rms en cada banda de tercio de octava y se multiplicó dos veces por la frecuencia mayor y menor de la banda en cuestión. Esto permite visualizar la frecuencia que mayor energía aporta en la vibración durante su registro.

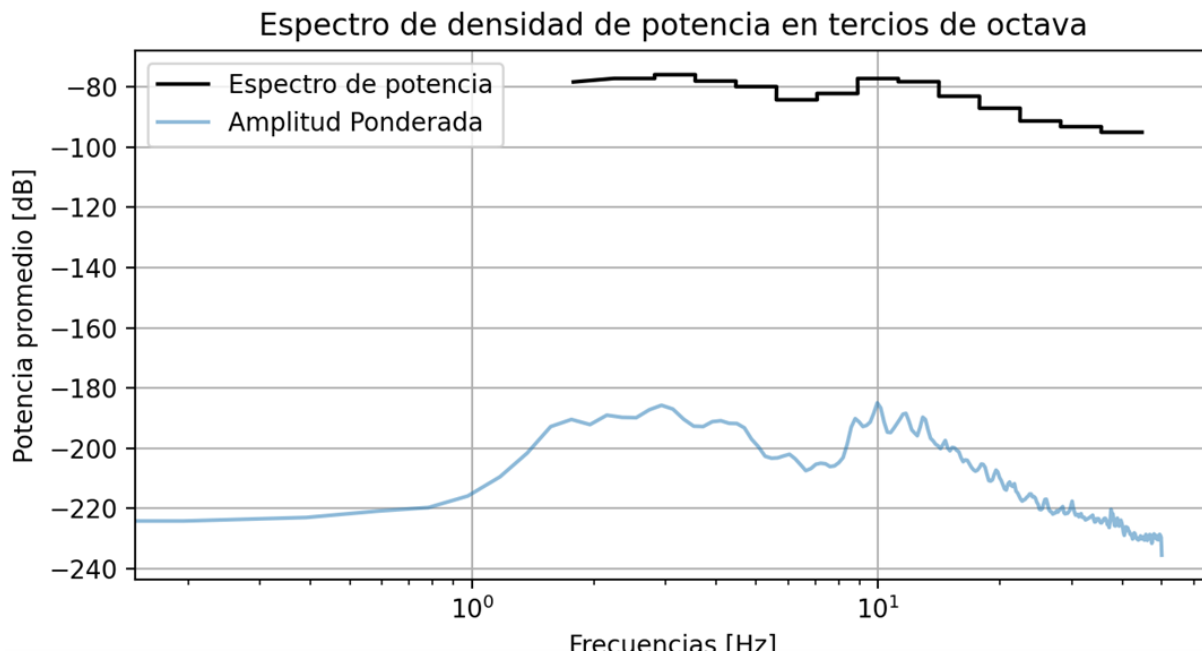


Figura 4.17: Espectros calculados de un registro de aceleración en tercios de octava.

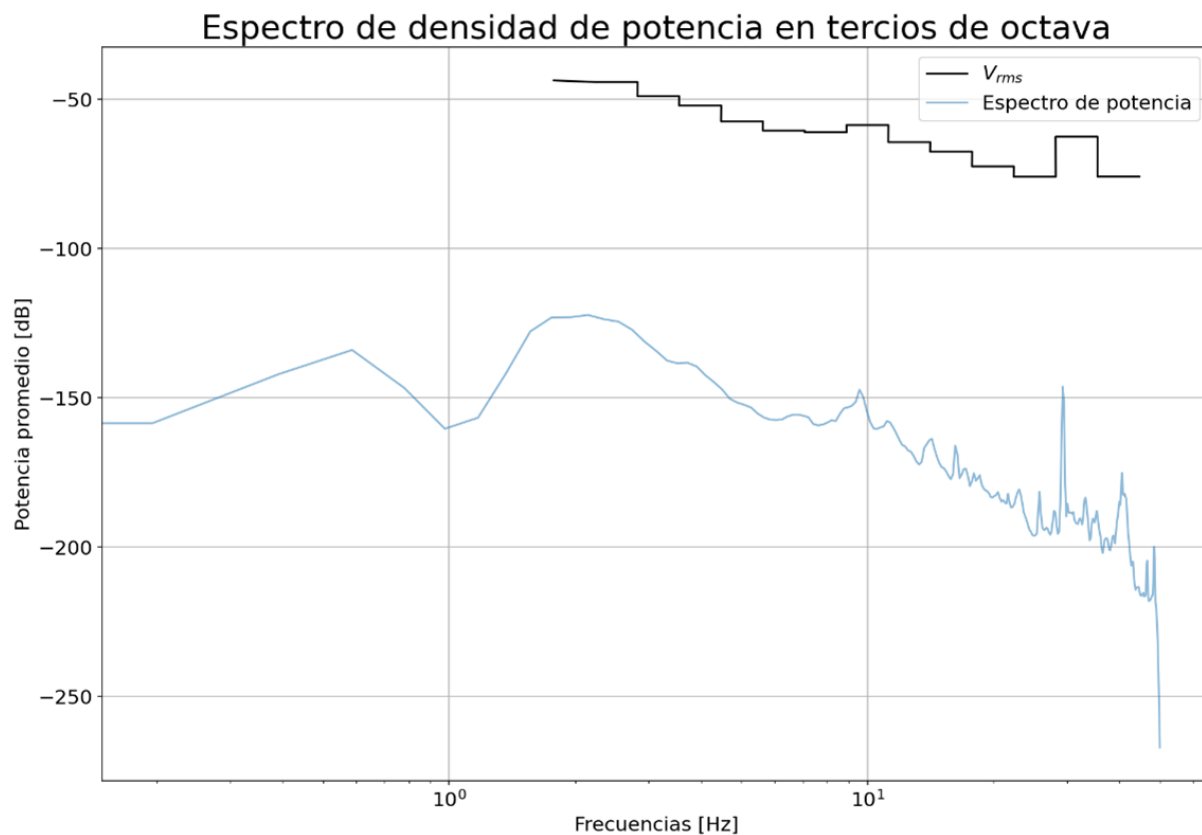


Figura 4.18: Espectros calculados de un registro de velocidad en tercios de octava.

El espectro calculado durante el día 19 de mayo (domingo), indica que el máximo espectral está en, aproximadamente, 0.55 Hertz. El contenido de frecuencia de los registros utilizados del componente N (fig.4.19) y E (fig.4.20) se agrupa en dos bandas principalmente, entre 0.4 y 1.2 Hz y entre 1.5 y 5Hz.

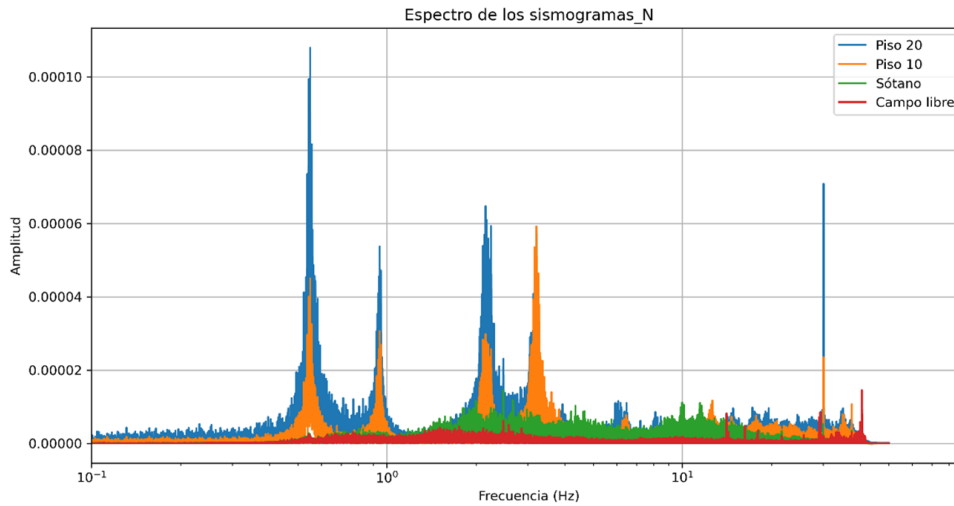


Figura 4.19: Espectro del registro del domingo 19 de mayo- Componente N.

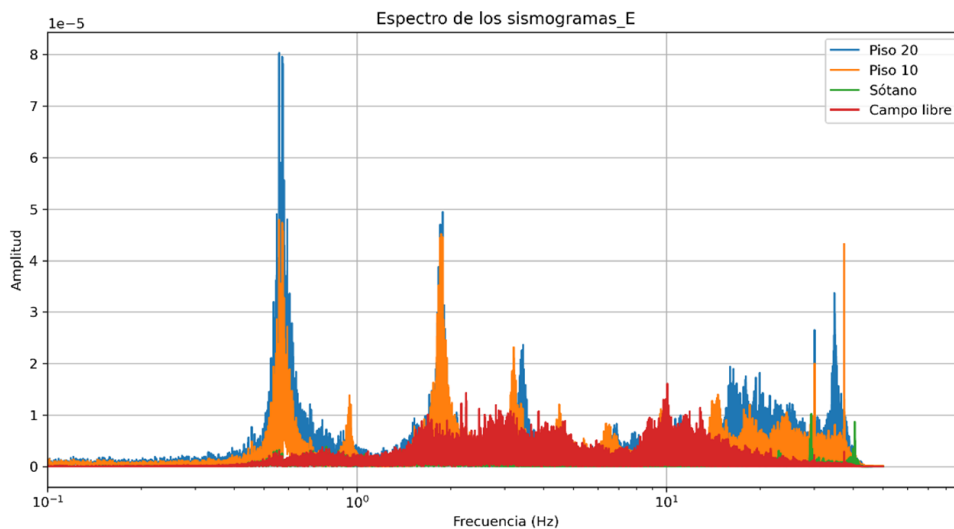


Figura 4.20: Espectro del registro del domingo 19 de mayo- Componente E.

Adicionalmente se calculó la envolvente de Hilbert con la intención de precisar la señal periódica vista en el espectrograma anterior, donde parece tener un periodo de 120 segundos. De esta forma, se generó una nueva señal buscando los máximos en ventanas de

100 segundos tanto para el registro en campo libre como para el registro en el piso 10. De esta manera se puede realizar una comparación de las señales (campo libre y piso 10) en la misma ventana de tiempo como se observa en las figuras 4.21 y 4.22 para los registros obtenidos, donde en el piso 10 del edificio la periodicidad de la señal es 4 segundos mayor que la de campo libre que tiene un periodo de 120 segundos. El factor de cresta (FC) es un parámetro que da la relación de la severidad de los picos de la señal con la aceleración r.m.s. Un valor de cresta elevado indica eventos transitorios o impulsivos, mientras que un valor bajo indica una señal más suave y continua. Cuando relacionamos el factor de cresta con la envolvente de Hilbert, se logra una visión de la variación y comportamiento de la amplitud de los valores máximos a lo largo de una ventana de tiempo, en este caso, la duración del semáforo.

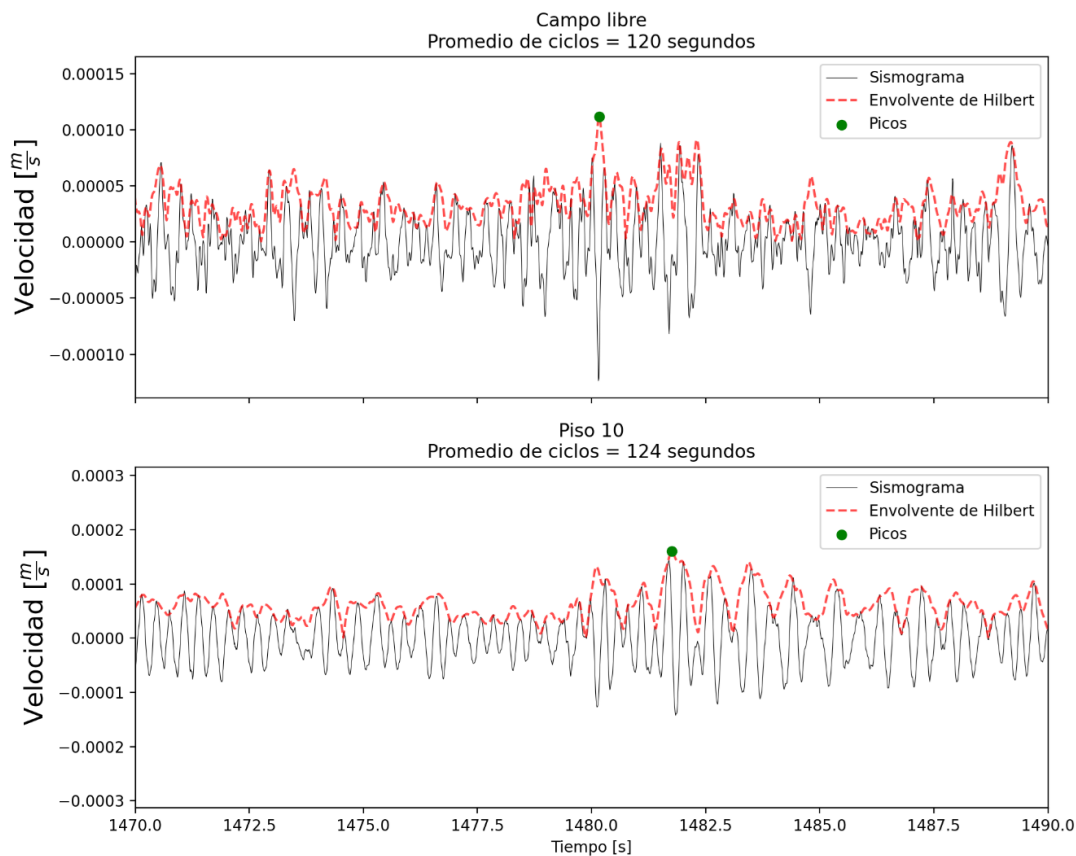


Figura 4.21: Acercamiento a la envolvente de Hilbert.

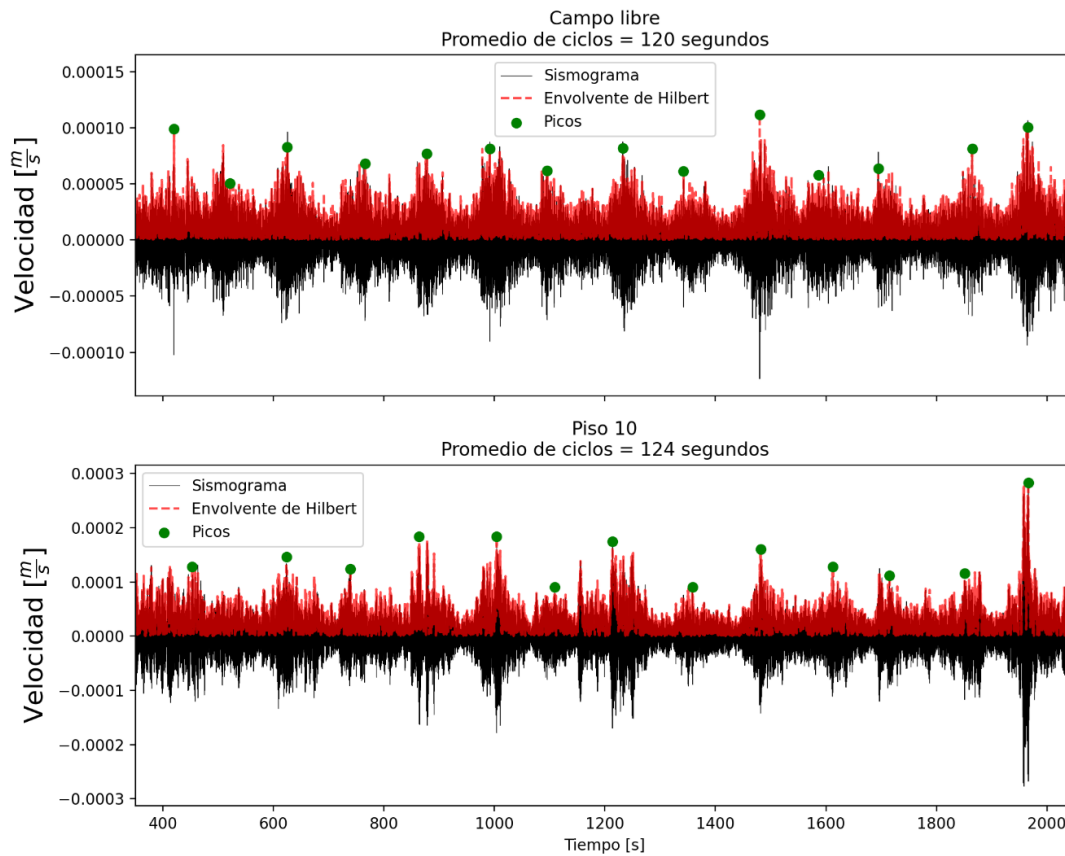


Figura 4.22: Envolvente de Hilbert.

Para evaluar la distribución de los datos a lo largo de los días de medición, se realizaron histogramas que representan gráficamente la frecuencia de observaciones dentro de valores definidos y que permiten identificar patrones y tendencias significativas, así como la densidad en diferentes rangos.

Para la aceleración r.m.s.(fig.36), los valores se concentran principalmente entre $0.0001 \left[\frac{m}{s^2}\right]$ y $0.0005 \left[\frac{m}{s^2}\right]$. La media es de $0.00042 \left[\frac{m}{s^2}\right]$, la mediana $0.00030 \left[\frac{m}{s^2}\right]$ y la moda es de $0.0001 \left[\frac{m}{s^2}\right]$. Para el valor máximo transitorio (MTVV) (fig.4.24), los valores se concentran principalmente entre $0.0001 \left[\frac{m}{s^2}\right]$ y $0.002 \left[\frac{m}{s^2}\right]$. La media es de $0.001 \left[\frac{m}{s^2}\right]$, la mediana $0.001 \left[\frac{m}{s^2}\right]$ y la moda es de $0.0001 \left[\frac{m}{s^2}\right]$.

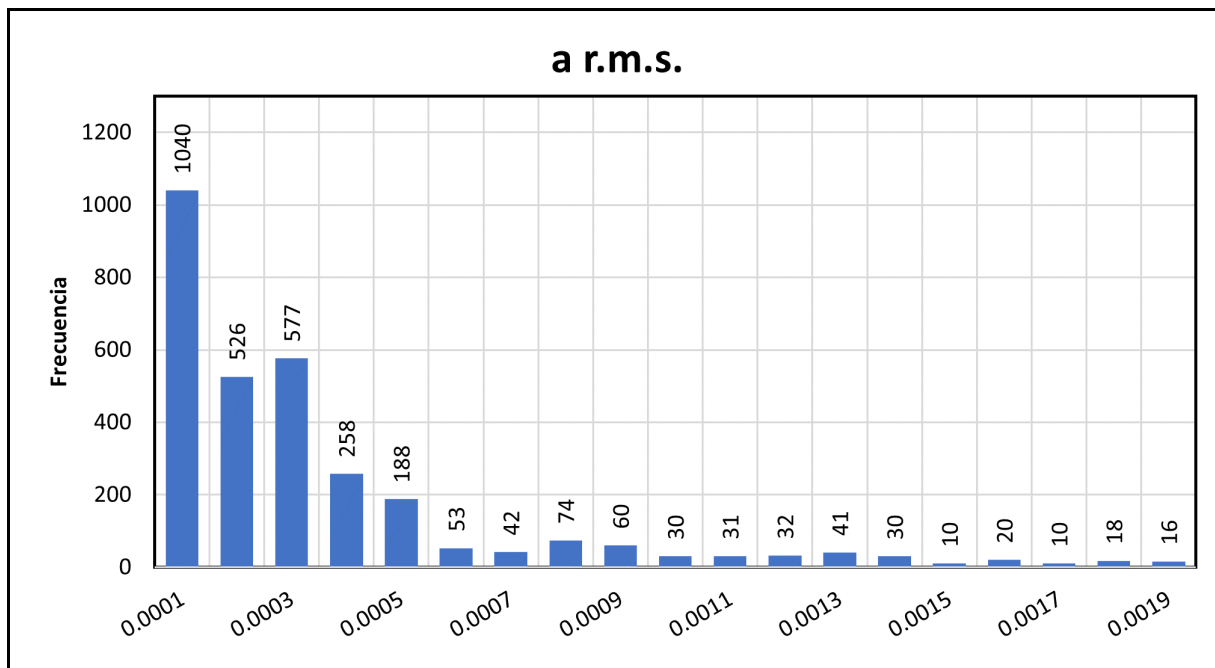


Figura 4.23: Histograma a r.m.s.

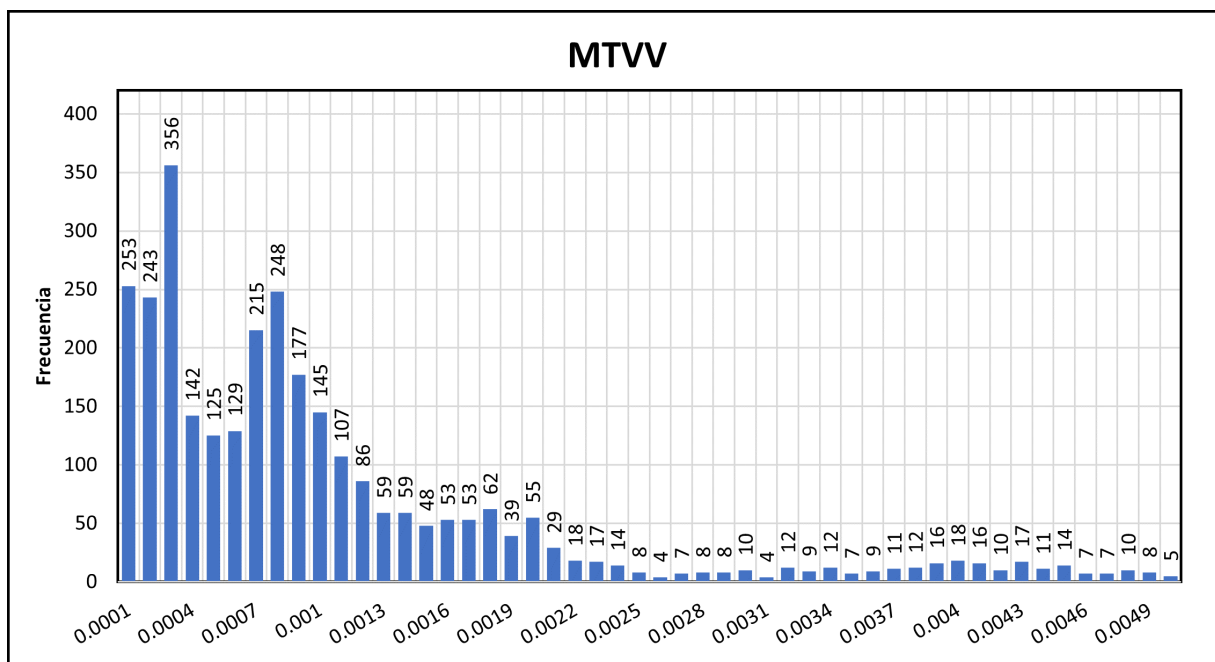


Figura 4.24: Histograma de MTVV.

Para el valor de dosis de vibración (VDV) (fig.4.25), los valores se concentran principalmente entre $0.0001 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ y $0.006 \left[\frac{m}{s^2} \right]$. La media es de $0.005 \left[\frac{m}{s^2} \right]$, la mediana $0.003 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ y la moda es de $0.0001 \left(\left[\frac{m}{s^2} \right] \right)$.

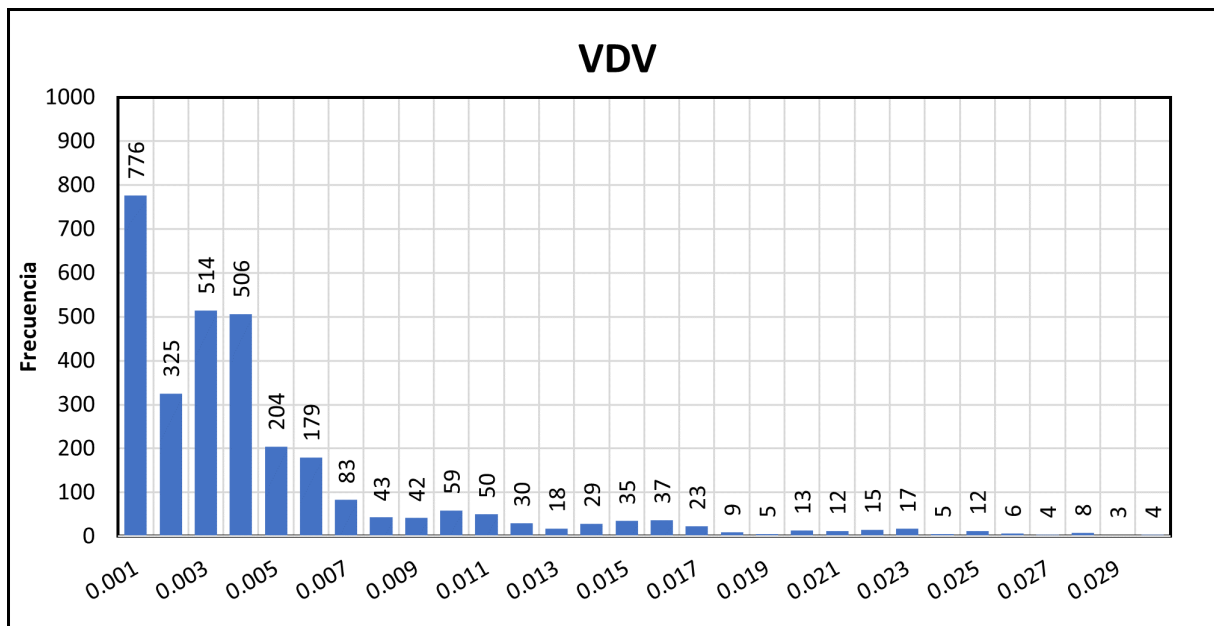


Figura 4.25: Histograma de VDV.

Para el caso de los descriptores de velocidad se observa que los valores de mayor repetibilidad para el caso de severidad de vibración KBF son .03 el cual no sobre pasa el límite inferior $A_u = 0.15$ de consideración para una segunda evaluación. Donde en esta segunda evaluación se considera el valor $A_r = 0.07$ y la cual no es superada por el valor de mayor frecuencia .03 de los valores de evaluación de severidad de vibración KBFTr.

Para los valores de KBFMAX (fig.4.26), los valores se concentran principalmente entre 0.01 y 0.16. La media es de 0.19, la mediana es de 0.1 y la moda es de 0.03. Para los valores de KBFMAX (fig.4.27), los valores se concentran principalmente entre 0.04 y 0.23. La media es de 0.13, la mediana es de 0.11 y la moda es de 0.12. Con lo anterior mencionado, podemos decir que el valor de mayor frecuencia para la evaluación de la vibración según la DIN 4150, no sobrepasa los valores permisibles y estipulados en esta directriz.

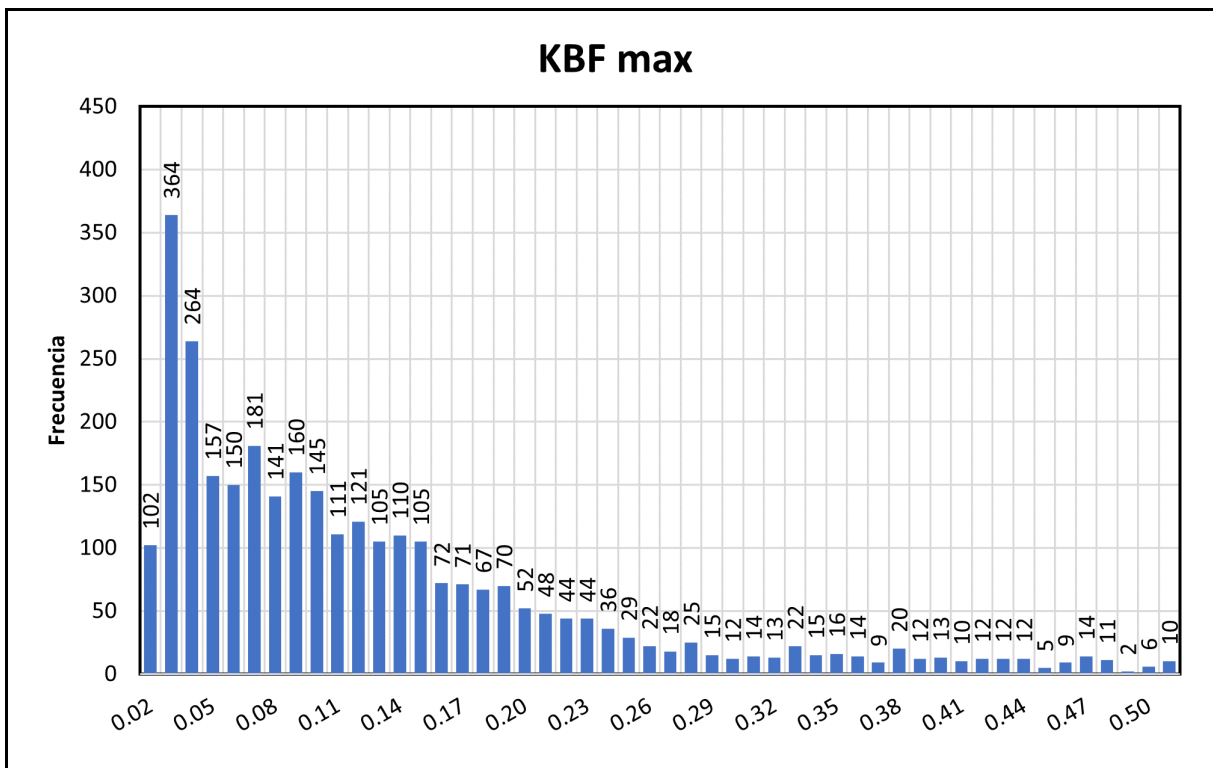


Figura 4.26: Histograma de KBFmax.

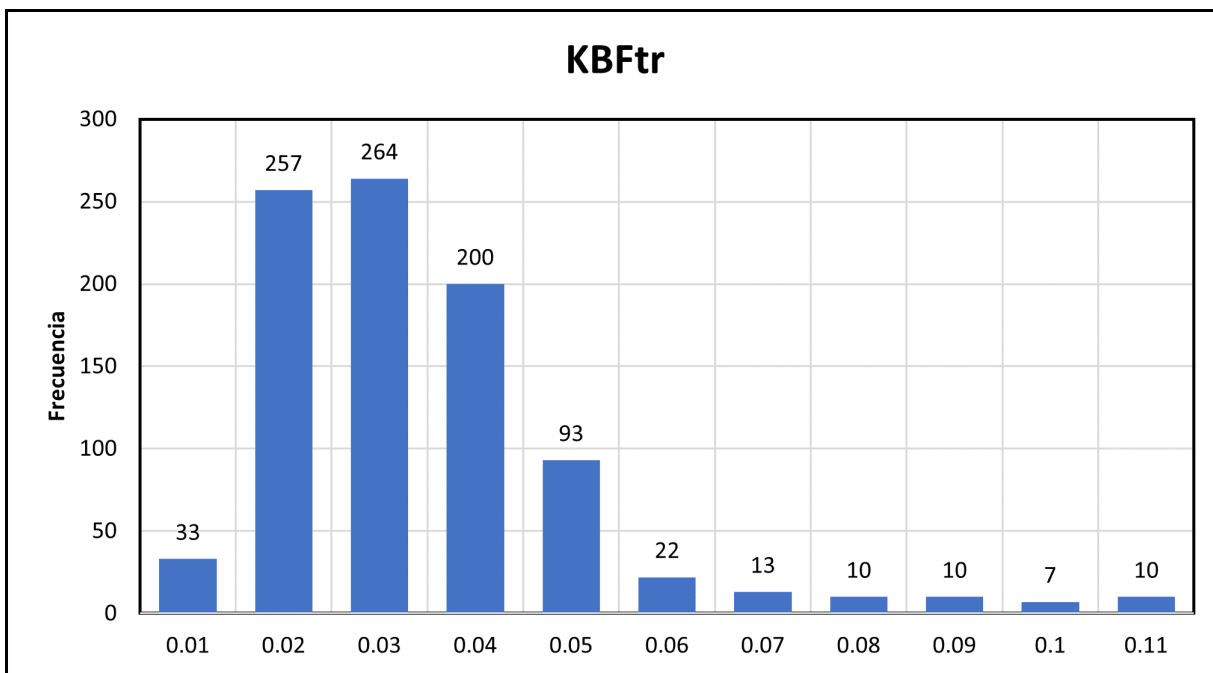


Figura 4.27: Histograma de KBFtr.

4.4.2. Transporte público

En el sistema de transporte público de la Ciudad de México solo obtuvieron y evaluaron registros de aceleración haciendo uso de EViiCON.

Exportación de datos

Los archivos .csv, que graban las mediciones mediante la aplicación “Physics Toolbox Suite”, no se almacenan dentro de la aplicación por lo que los registros deben compartirse en el momento en que se detiene la medición, ya sea por correo o WhatsApp, por mencionar algunas.

Los archivos .csv deben separarse por componentes con el mismo formato para poder ser evaluados por EViiCON. En esta aplicación no es necesario utilizar ningún factor de corrección, por lo que el valor se queda en 1. Los registros en su componente norte para los distintos medios de transportes público se muestran a continuación (fig. 4.28):

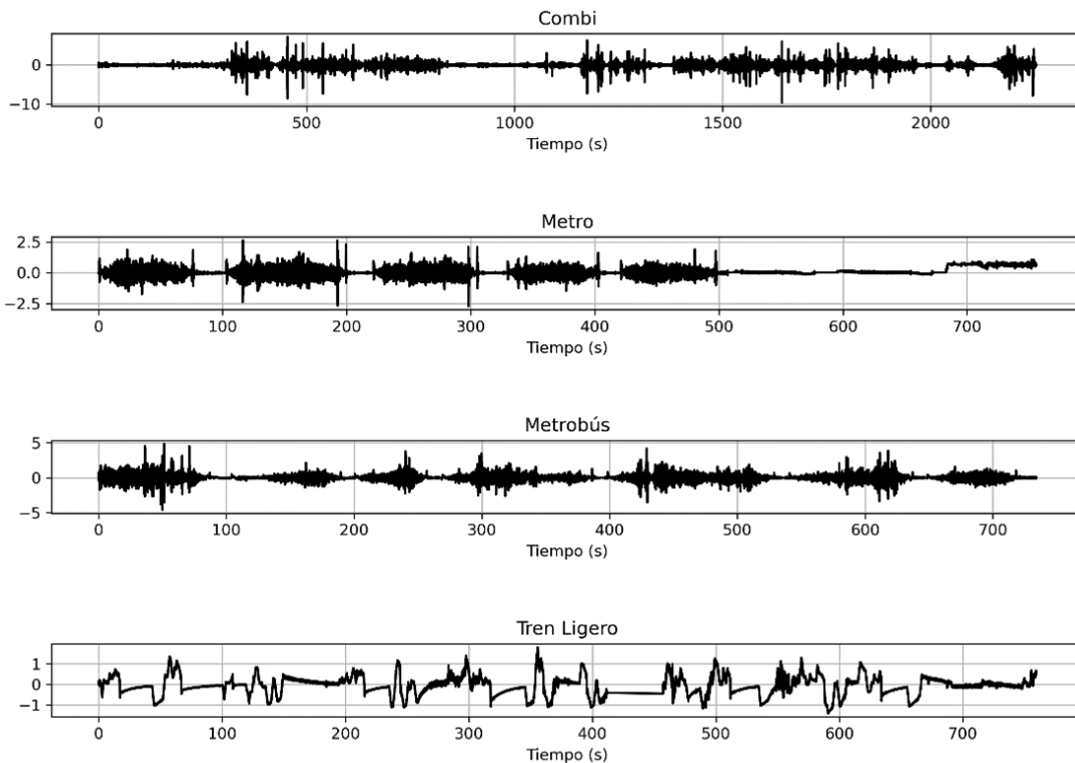


Figura 4.28: Componente N de los registros obtenidos para los diferentes medios de transporte.

Análisis de vibración mediante EViiCON

Se hicieron análisis temporales para aceleración con ventanas de 3 segundos (fig.4.29 y 4.30) donde $aw(t)$ es la señal ponderada, $a(w)$ es la aceleración r.m.s total de la señal, $a_w(t_0)$ es el valor máximo por ventana y MTVV es el valor máximo de la señal total. También se calcularon los descriptores antes mencionados.

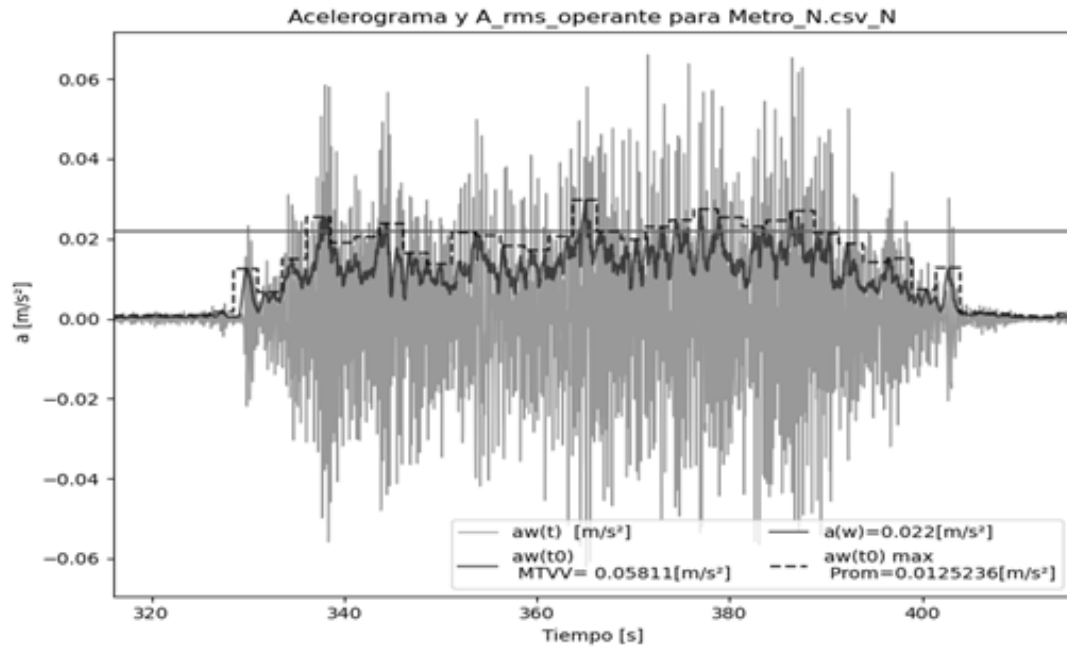


Figura 4.29: Acercamiento a r.m.s operante para el Metro componente N

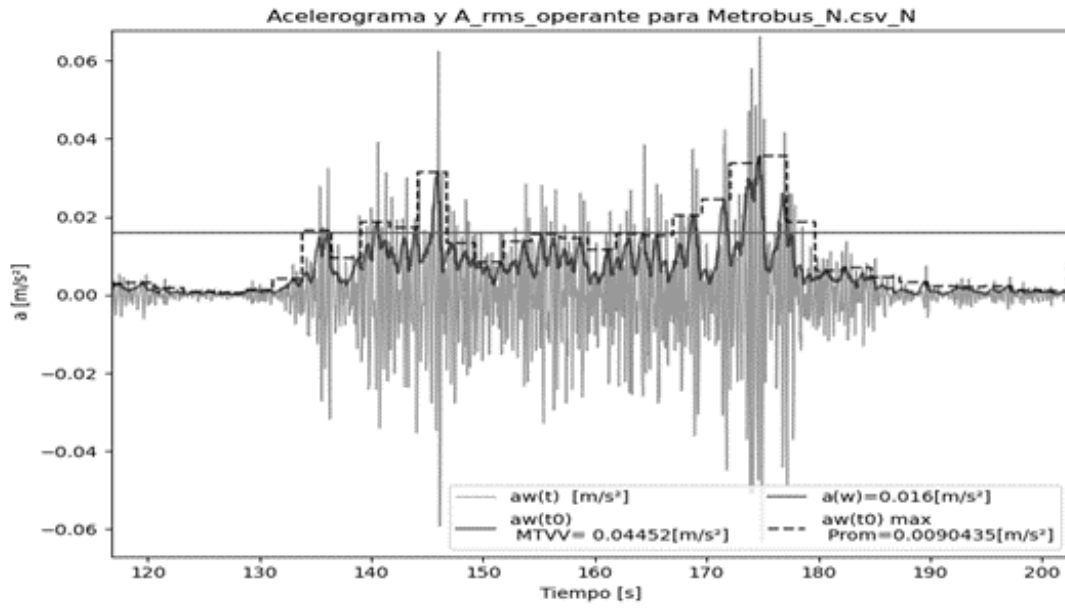


Figura 4.30: Acercamiento a r.m.s operante para el Metrobus componente N

Capítulo 5

Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos mediante el sistema EViiCON para registros de velocidad y registros de aceleración.

5.1. Centro Cultural Universitario Tlatelolco

La exposición humana a la vibración del inmueble se evaluó ponderando los registros de aceleración con la curva W_m utilizada en la norma británica 6841. Esta curva se utiliza para evaluar los riesgos para la salud asociados con la vibración vertical en edificios, especialmente aquellos que afectan al cuerpo humano sentado, de pie o recostado.

La curva W_m tiene un pico a una frecuencia de alrededor de 4 Hz, atenuando las señales de baja frecuencia (por debajo de 1 Hz) y de forma más significativa a las señales de alta frecuencia (por encima de 10 Hz).

La ponderación con W_m es más sensible a las vibraciones en el rango de frecuencia de 1 a 80 Hz, por lo que sugiere el uso de esta ponderación para evaluar molestia, fatiga e interferencia con las actividades diarias. Los registros medidos en el CCUT se evaluaron utilizando el registro completo (análisis general) y en ventanas de una hora.

5.1.1. Evaluación de los registros de aceleración

Evaluación total de los registros de aceleración

El valor máximo registrado por los sensores en la componente N (tabla 5.1) se da en el sismómetro T6N57 ubicado en el piso 20 en la oficina del Rector, con un valor de VDV de $0.0004 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y una aceleración máxima r.m.s. de $0.0001 \left[\frac{m}{s^2} \right]$.

Los siguientes 2 valores altos se dan en el sensor T6N50 con un valor de VDV de $0.005 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y una aceleración máxima r.m.s. de $0.002 \left[\frac{m}{s^2} \right]$ y en el T6N82 con un valor de VDV de $0.005 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y una aceleración máxima r.m.s. de $0.00001 \left[\frac{m}{s^2} \right]$, ambos ubicados en el piso 10.

Tabla 5.1: Evaluación total componente N.

NORTE						
Piso	Equipo	FC	a r.m.s. máx. $\left[\frac{m}{s^2} \right]$	MTVV $\left[\frac{m}{s^2} \right]$	Lw máx. [dB]	VDV $\left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$
10	T6N50	7.640	0.000	0.002	51.580	0.005
sótano	T6N52	5.700	0.0001	0.0004	40.200	0.0008
20	T6N57	5.041	0.0001	0.0003	60.154	0.0004
sótano	T6N61	6.120	0.0001	0.0004	40.170	0.0009
20	T6N62	5.010	0.0001	0.003	60.589	0.0013
sótano	T6N65	5.129	0.00001	0.001	48.499	0.0032
explanada	T6N67	7.550	0.00001	0.001	47.330	0.0034
10	T6N82	6.940	0.00001	0.002	52.110	0.0050

El valor máximo registrado por los sensores en la componente E (tabla 5.2) se da en el sismómetro T6N62 ubicado en el piso 20 en la cocina de la oficina del Rector, con un valor de VDV de $0.005 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y una aceleración máxima r.m.s. de $0.001 \left[\frac{m}{s^2} \right]$. Los siguientes 2 valores altos se dan en el sensor T6N50 con un valor de VDV de $0.004 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y una aceleración máxima r.m.s. de $0.0001 \left[\frac{m}{s^2} \right]$, ubicado en el piso 20 y en el T6N82 con un valor de VDV de $0.004 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y una aceleración máxima r.m.s. de $0.00001 \left[\frac{m}{s^2} \right]$, ubicado en el piso 10.

El valor máximo registrado por los sensores en la componente Z (tabla 5.3) se da en el sismómetro T6N50 y T6N67 ubicado en el piso 10 y explanada, respectivamente, con un valor de VDV de $0.013 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y una aceleración máxima r.m.s. de $0.001 \left[\frac{m}{s^2} \right]$. Los siguientes 2 valores altos se dan en el sensor T6N65 con un valor de VDV de $0.007 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y una aceleración máxima r.m.s. de $0.001 \left[\frac{m}{s^2} \right]$, ubicado en la explanada como campo libre.

En los resultados del análisis general, la componente con valores más altos es Z para el descriptor VDV y para la aceleración ponderada r.m.s. En las gráficas de las figs. 5.1 y

Tabla 5.2: Evaluación total componente E.

ESTE						
Piso	Equipo	FC	a r.m.s. máx. [$\frac{m}{s^2}$]	MTVV [$\frac{m}{s^2}$]	Lw máx. [dB]	VDV [$\frac{m}{s^{1.75}}$]
10	T6N50	8.36	0.0003	0.001	49.760	0.004
sótano	T6N52	6.00	0.0001	0.0004	44.614	0.001
20	T6N57	5.05	0.0001	0.0003	41.670	0.002
sótano	T6N61	7.44	0.0001	0.0005	47.432	0.001
20	T6N62	6.83	0.0001	0.0003	44.361	0.005
sótano	T6N65	5.17	0.0003	0.0006	48.587	0.003
explanada	T6N67	7.60	0.0002	0.0009	46.940	0.002
10	T6N82	7.16	0.00001	0.0014	51.150	0.004

Tabla 5.3: Evaluación total componente V (Z).

VERTICAL						
Piso	Equipo	FC	a r.m.s. máx. [$\frac{m}{s^2}$]	MTVV [$\frac{m}{s^2}$]	Lw máx. [dB]	VDV [$\frac{m}{s^{1.75}}$]
10	T6N50	9.40	0.001	0.004	57.650	0.013
sótano	T6N52	6.60	0.0002	0.001	47.630	0.003
20	T6N57	5.00	0.0001	0.0001	62.415	0.006
sótano	T6N61	6.70	0.000	0.001	47.200	0.003
20	T6N62	5.06	0.001	0.005	66.451	0.003
sótano	T6N65	5.04	0.001	0.001	55.369	0.007
explanada	T6N67	8.30	0.001	0.004	60.700	0.013
10	T6N82	8.03	0.000	0.002	51.020	0.006

5.2 se muestran los valores de referencia de las normas internacionales (0.2 en VDV) y los calculados de los registros medidos. Como referencia, los valores propuestos en las normas técnicas complementarias (0.015 en a r.m.s.) están por encima de los valores resultantes calculados.

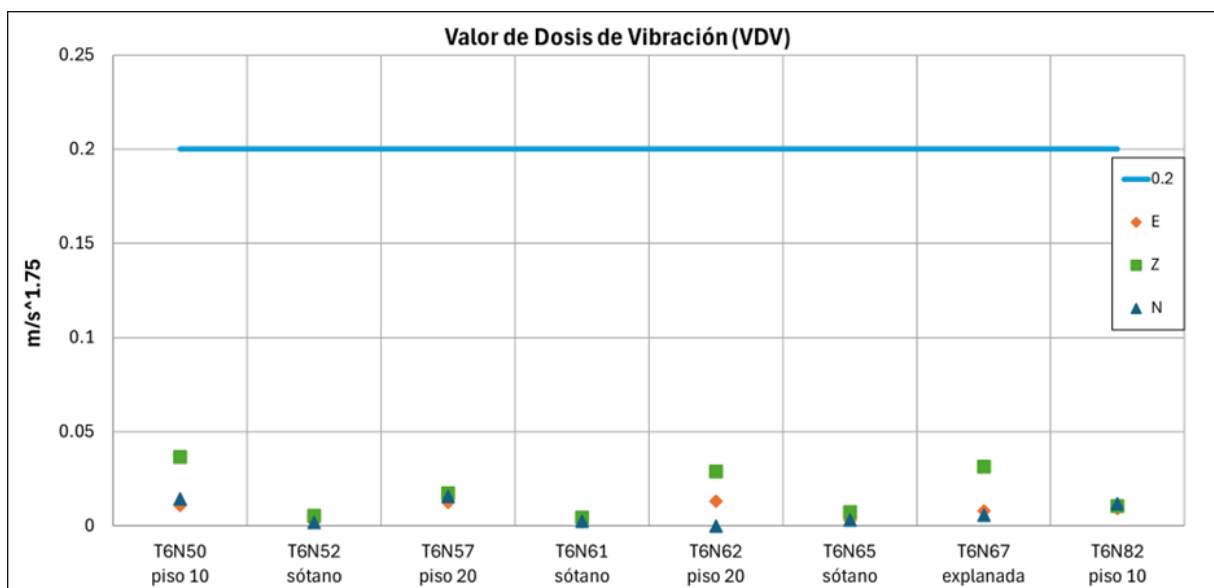


Figura 5.1: Valor de Dosis de Vibración para la evaluación total.

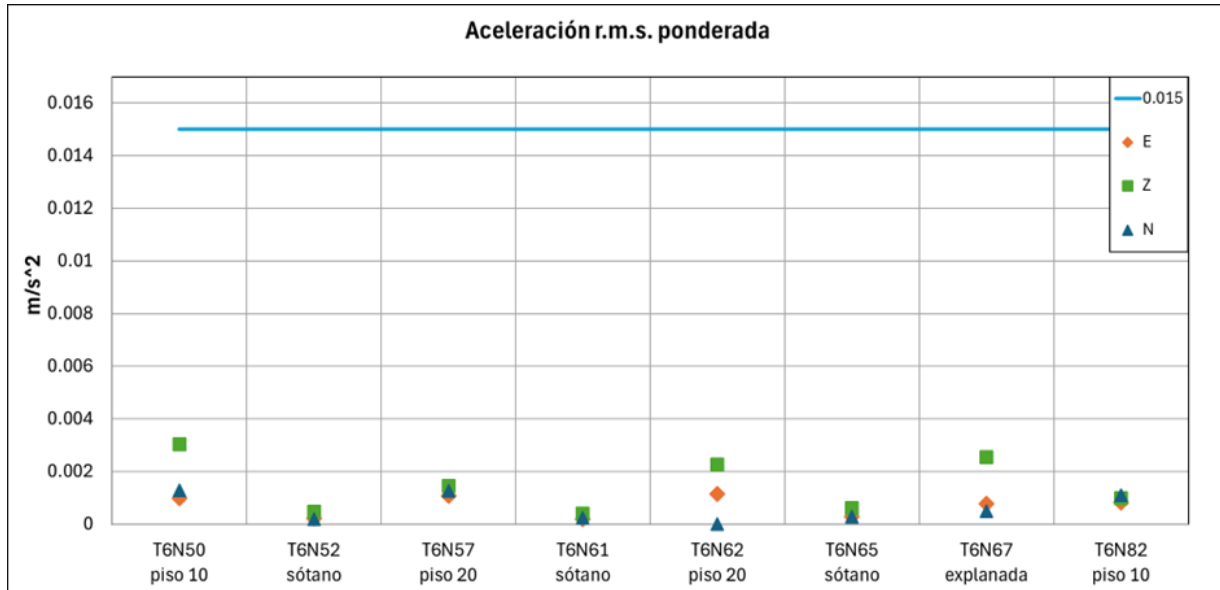


Figura 5.2: Aceleración r.m.s. ponderada para la evaluación total.

Análisis por hora

En este análisis por hora se presentan los sensores donde se registraron los valores más altos, el resto se encuentran en el apartado de anexos. En las 4 gráficas (figs. 5.4 a 5.7) se observa una tendencia a tener lecturas bajas durante el periodo nocturno. Las horas están definidas conforme a la zona horaria UTC por lo que para obtener la hora en la ciudad de México, se les debe restar seis horas. En el horario de 12:00h a 03:00h UTC (06:00h a 21:00h de la CDMX) corresponde con la actividad humana y por lo tanto con la actividad vehicular, lo cual explica el incremento y decremento de los valores registrados. Considerando que las mediciones se realizaron abarcando un fin de semana, el incremento en las vibraciones es notorio del domingo en la noche al lunes en la mañana.

Las gráficas de VDV y de aceleración r.m.s. son similares por lo que solo se muestran las de VDV ya que estas indican la probabilidad de que las personas hagan comentarios adversos a la vibración. En el sensor T6N62 solo se obtuvieron registros en la componente N el valor más alto es $0.018 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y en Z el valor más alto es $0.038 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$.

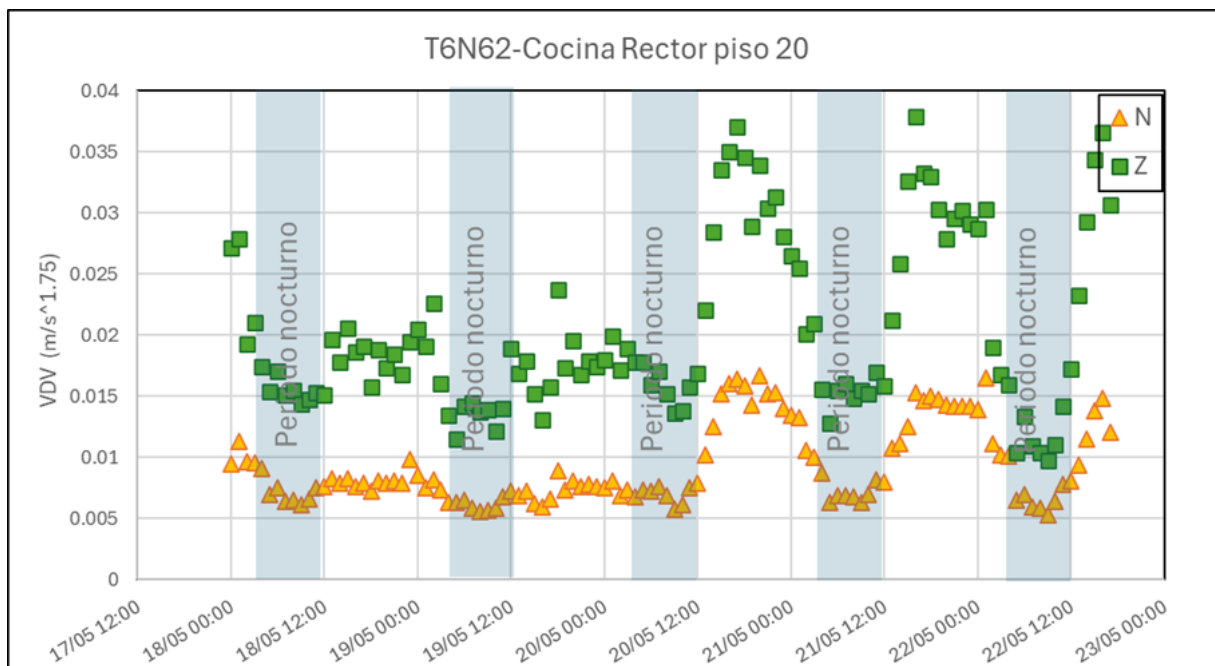


Figura 5.3: VDV para el sensor T6N62 ubicado en la cocina del rector en el piso 20.

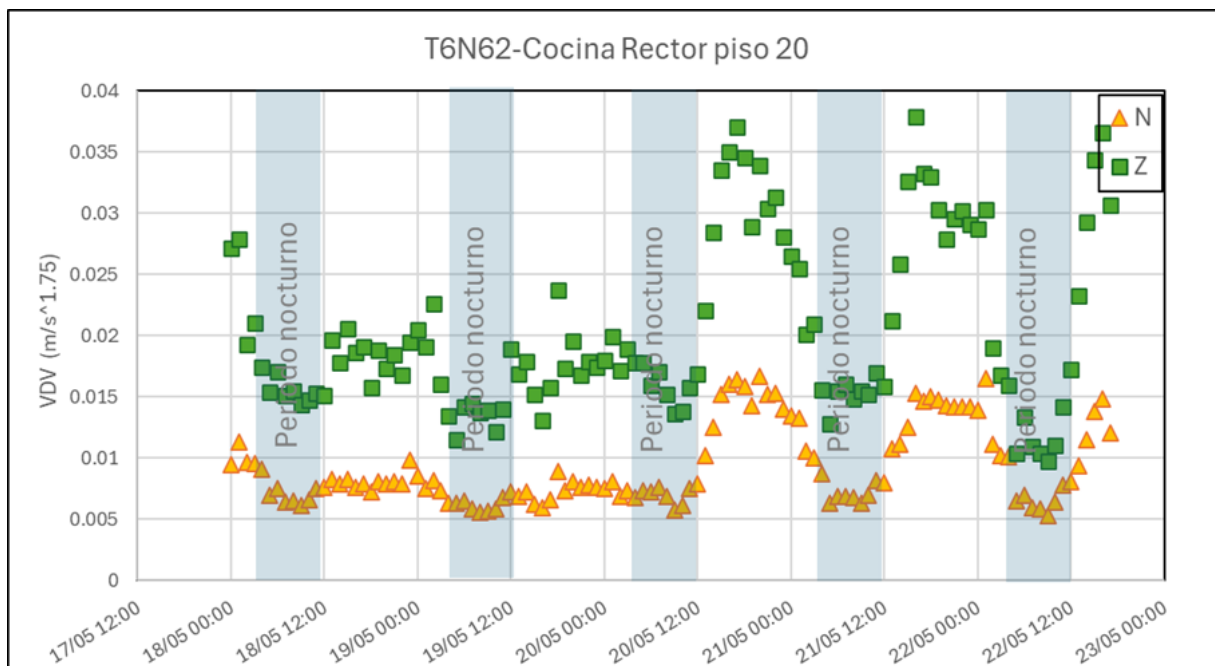


Figura 5.4: VDV para el sensor T6N62 ubicado en la cocina del rector en el piso 20.

En el sensor T6N65 (fig.5.5) se obtuvieron registros en las 3 componentes. En la componente N el valor más alto es $0.0048 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$, en la componente E es $0.0086 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y en Z es $0.0108 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$.

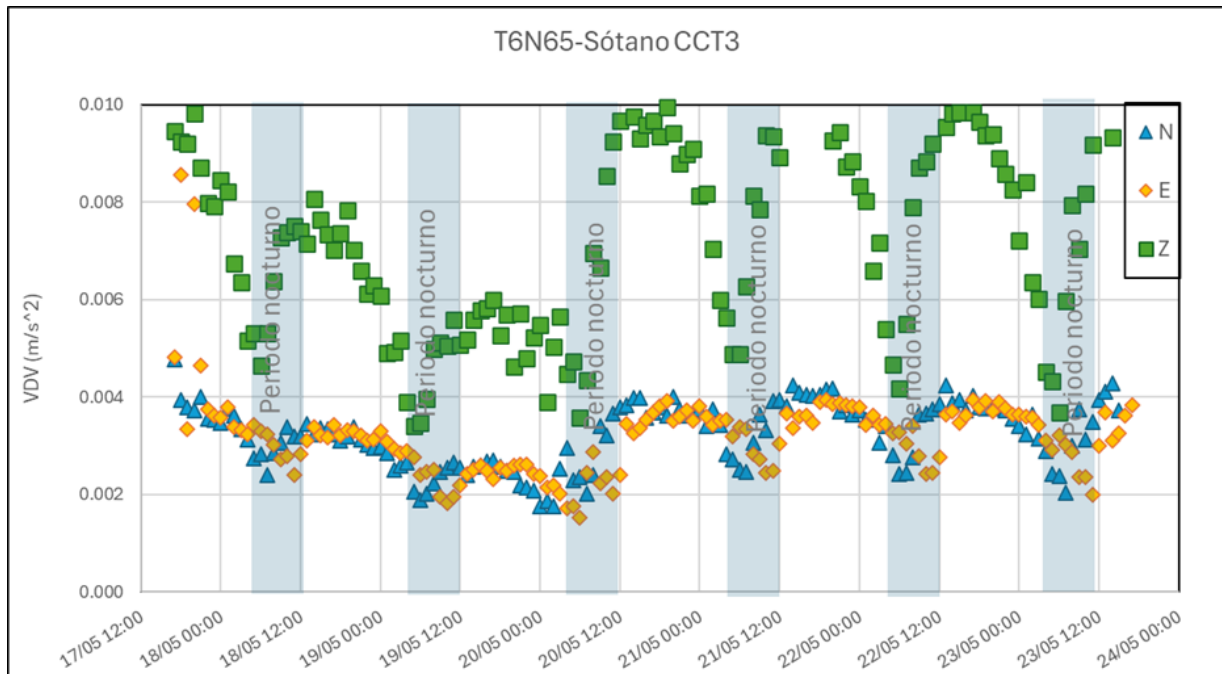


Figura 5.5: VDV para el sensor T6N65 ubicado en el sótano.

En el sensor T6N67(fig.5.6) se obtuvieron registros en las 3 componentes. En la componente N el valor más alto es $0.004 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$, en la componente E es $0.021 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y en Z es $0.023 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$.

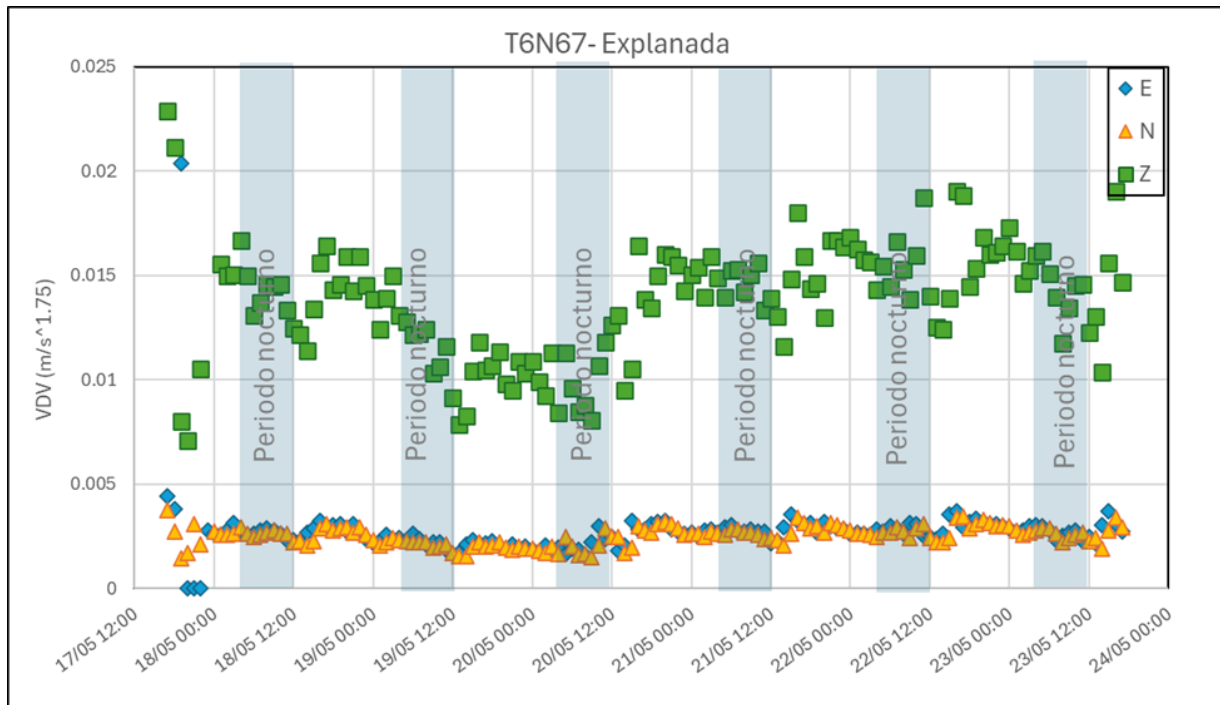


Figura 5.6: VDV para el sensor T6N67 ubicado en la explanada.

En el sensor T6N82 (fig. 5.7) se obtuvieron registros en las 3 componentes. En la componente N el valor más alto es $0.0078 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$, en la componente E es $0.0065 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y en Z es $0.0063 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$. Este es el único sensor en donde se obtienen valores más altos para la componente transversal que para la vertical. En la ubicación donde se colocó el sensor es notoria la inclinación que tiene el edificio.

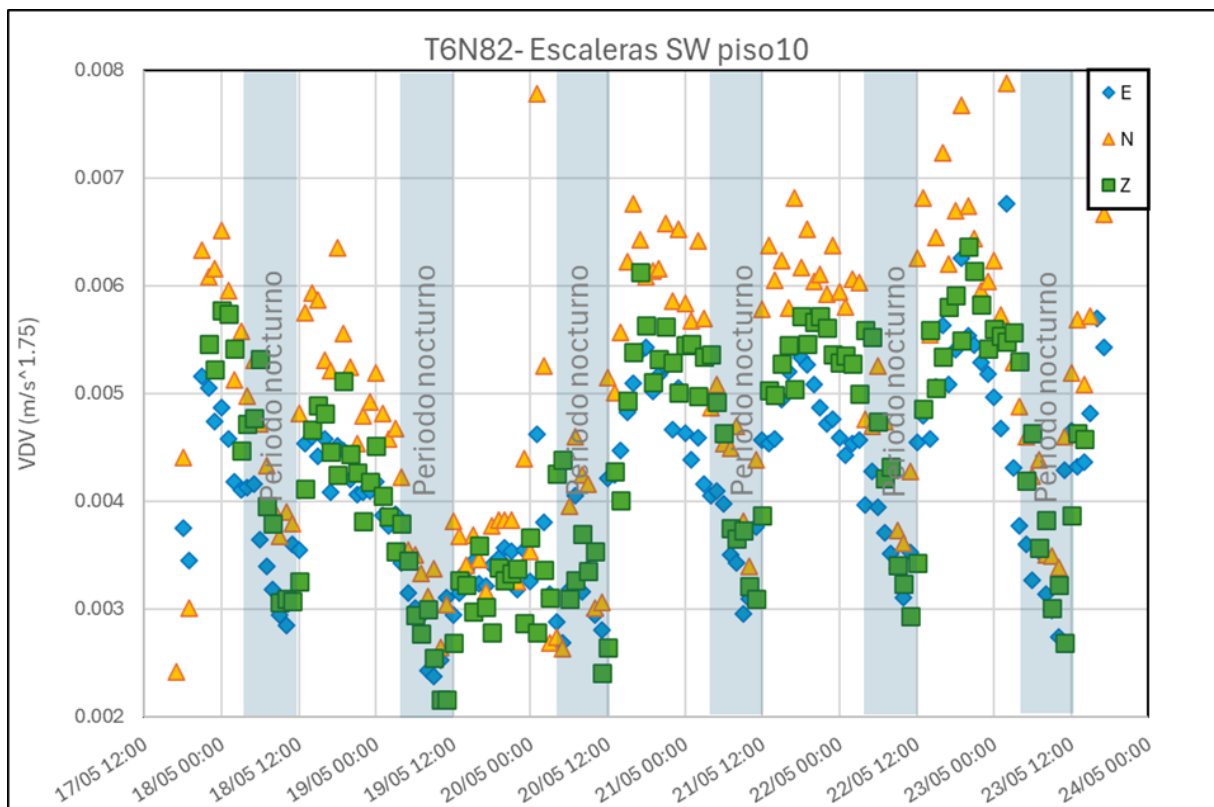


Figura 5.7: VDV para el sensor T6N82 ubicado en las escaleras SW en el piso 10.

5.1.2. Evaluación de los registros de velocidad

La evaluación de los registros de velocidad se lleva a cabo en dos etapas. A continuación, se presentan los gráficos con los resultados del análisis de algunos de los registros obtenidos en el sótano (fig.5.8 y 5.9), explanada (fig.5.10 y 5.11), piso 10 (fig.5.12 y 5.13) y piso 20 (fig.5.14 y 5.15). Las barras oscuras dispuestas en los gráficos indican los períodos nocturnos comprendidos de las 21 hrs a las 6 hrs del día siguiente.

Para el caso del sótano se observan valores que para las tres componentes casi no tienen variación. Muchos de ellos que apenas sobrepasan el valor mínimo de evaluación, se encuentran muy por debajo del límite permisible de vibración.

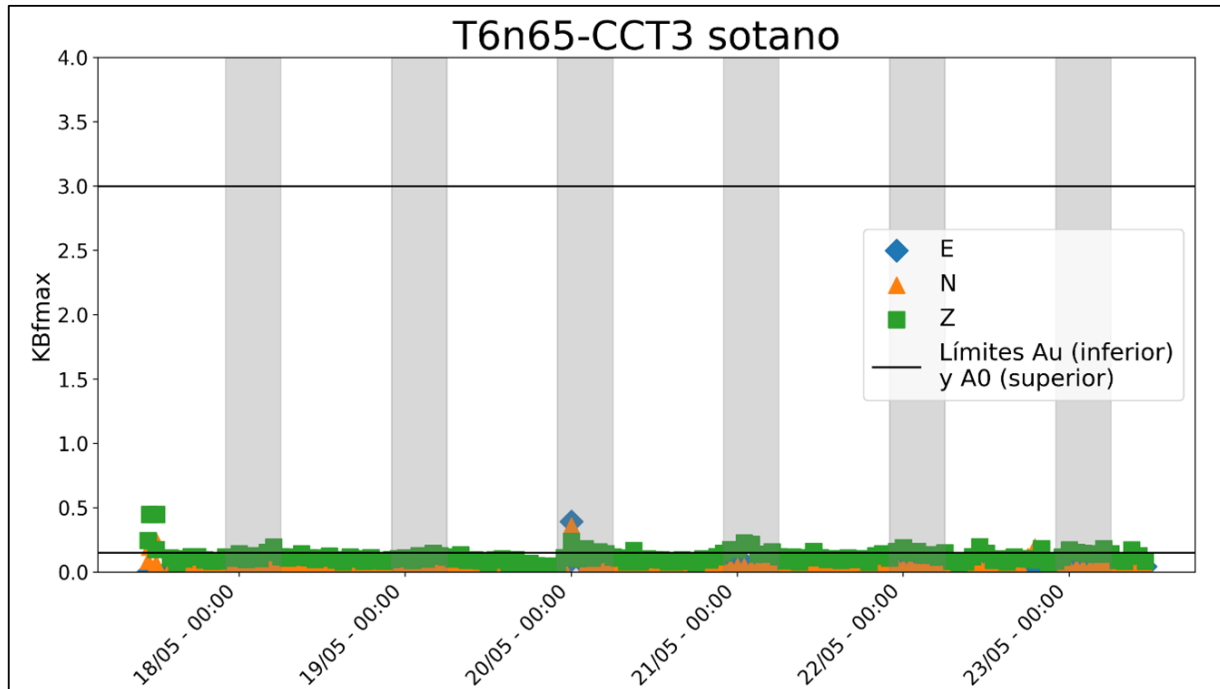


Figura 5.8: Severidad de vibración KBF por hora para el sótano.

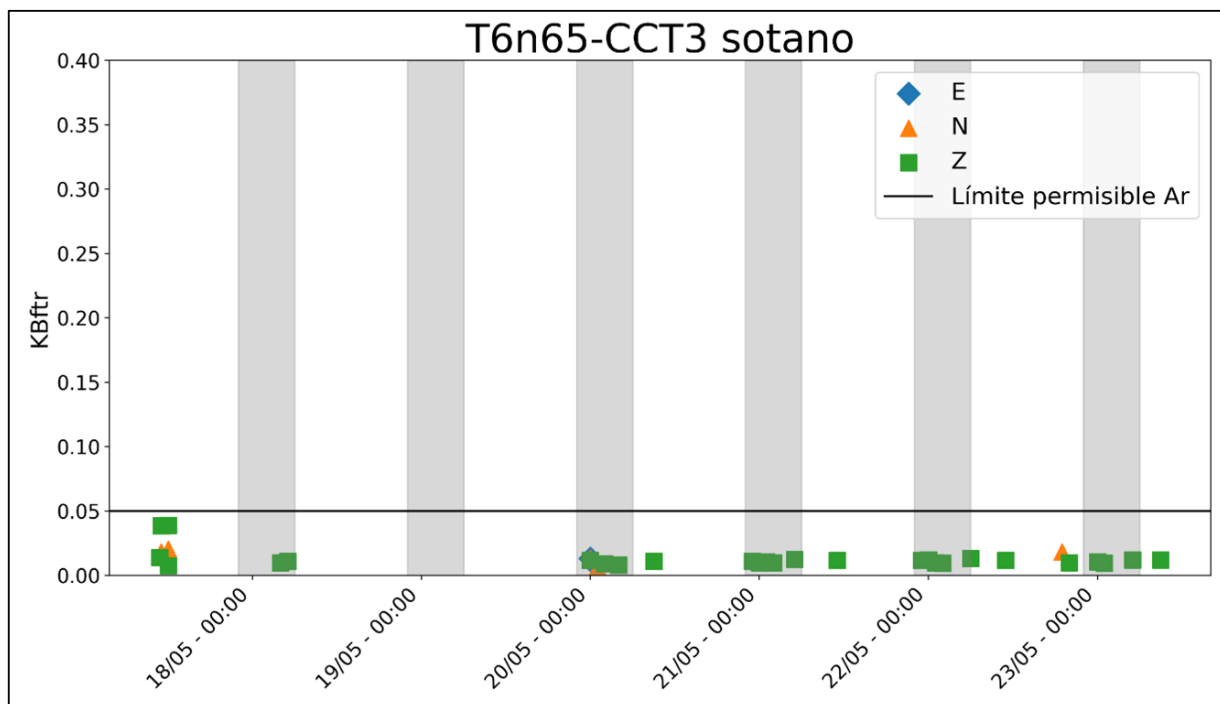


Figura 5.9: Severidad de vibración KBftr por hora para el sótano.

En el caso de la explanada, los valores de mayor magnitud son los de la componente

vertical que, en su mayoría se encuentran entre los límites permisibles inferior (A_u) y superior (A_0). Casi todos los valores obtenidos para las componentes horizontales están por debajo A_u , aunque sí se presentan algunos valores altos, con uno de ellos (componente N) sobrepasando el límite A_0 .

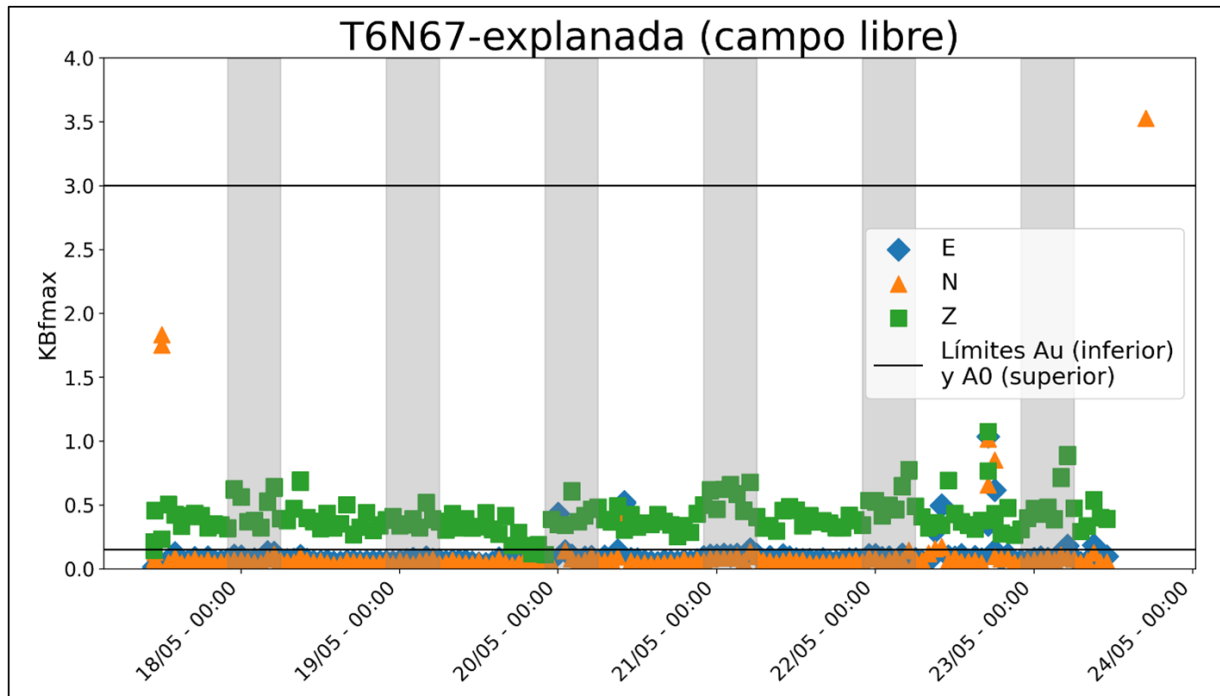


Figura 5.10: Severidad de vibración KBF por hora para el campo libre.

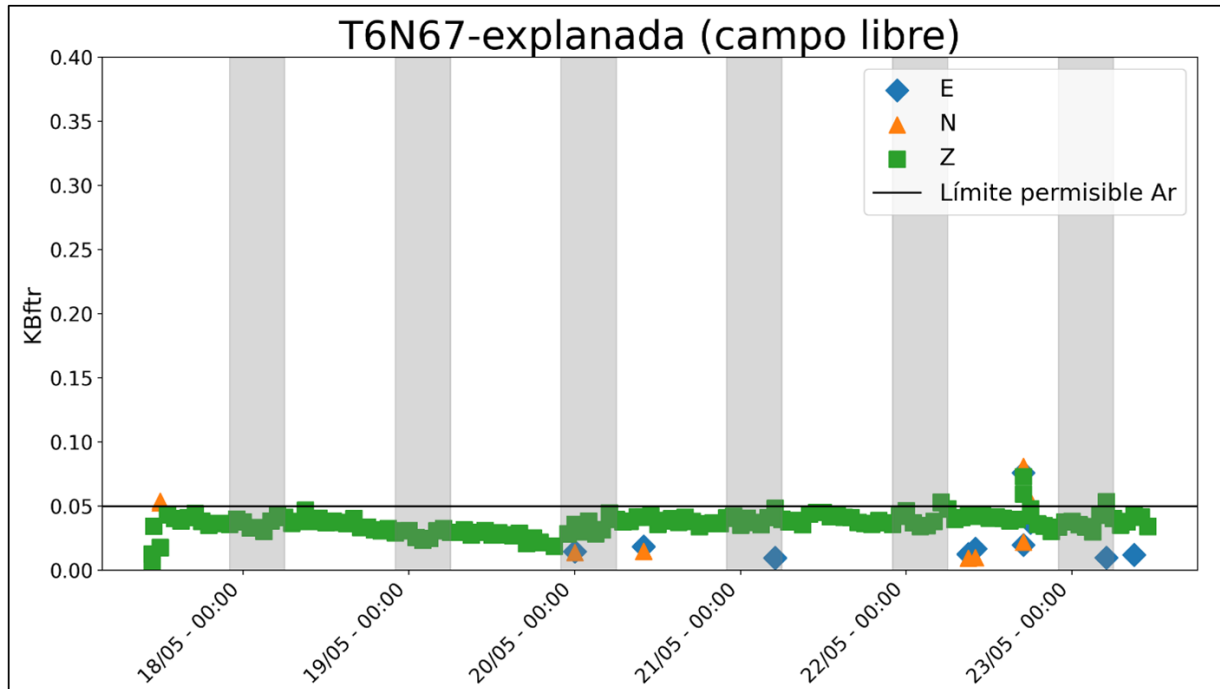


Figura 5.11: Severidad de vibración KBftr por hora para el campo libre.

En las figuras 5.12 y 5.13 se observan los resultados de la evaluación del piso 10 en el tiempo total de medición. Se observa que los valores más altos de severidad de vibración KBfmax pertenecen a las componentes horizontales para ambos gráficos. Se observan tres días con mayor actividad, el 18, el 20 y 23 de mayo del presente año, en los cuales se sobrepasa incluso la segunda evaluación en las componentes horizontales. En la figura 5.13 se observa un incremento de actividad sin llegar sobrepasar los valores permisibles en las tardes del 18, 19, 21 y 22 de mayo del presente año.

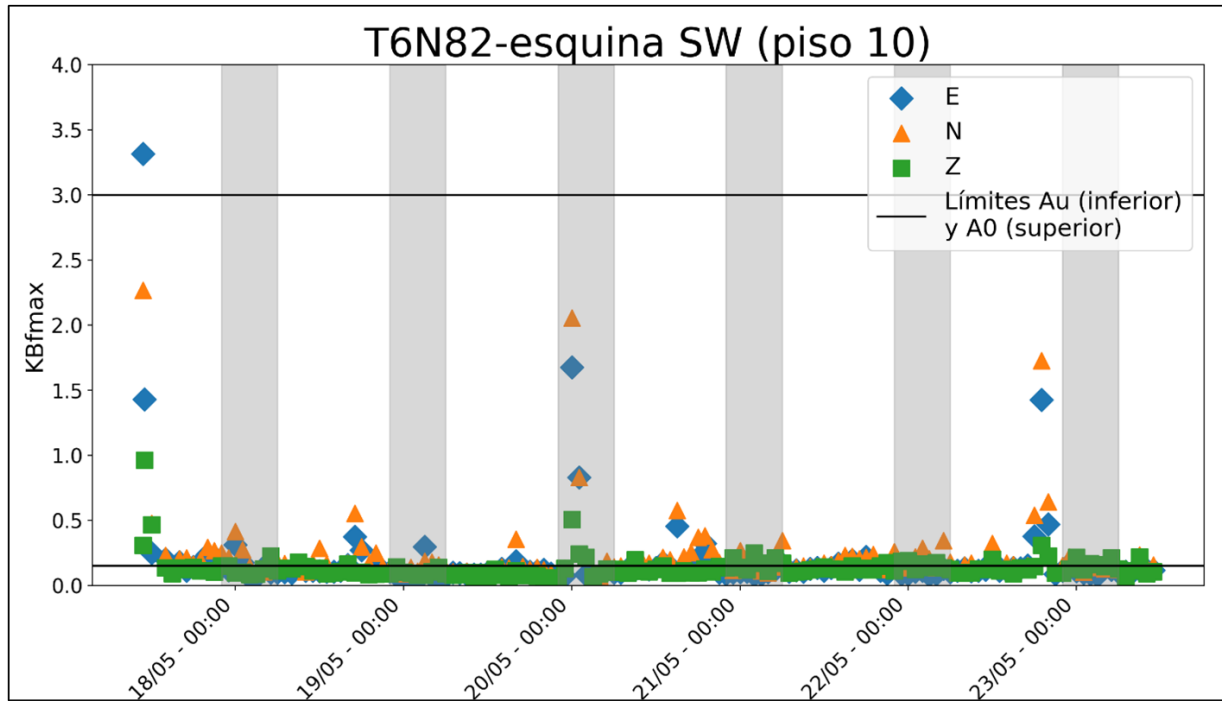


Figura 5.12: Severidad de vibración KBF por hora para el piso 10.

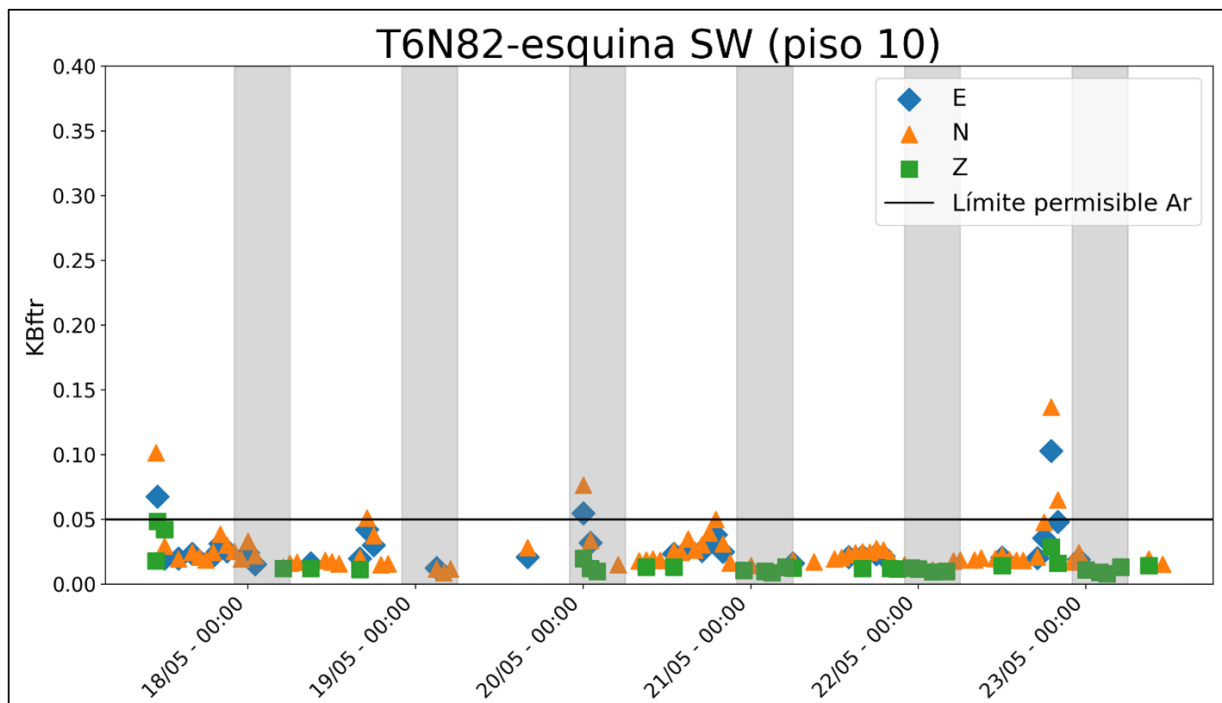


Figura 5.13: Severidad de vibración KBftr por hora para el piso 10.

Por último, para el piso 20, conserva la presencia de las componentes horizontales con-

serva, teniendo que los valores de evaluación de severidad de vibración para la componente N son los de mayor magnitud y presencia en la evaluación.

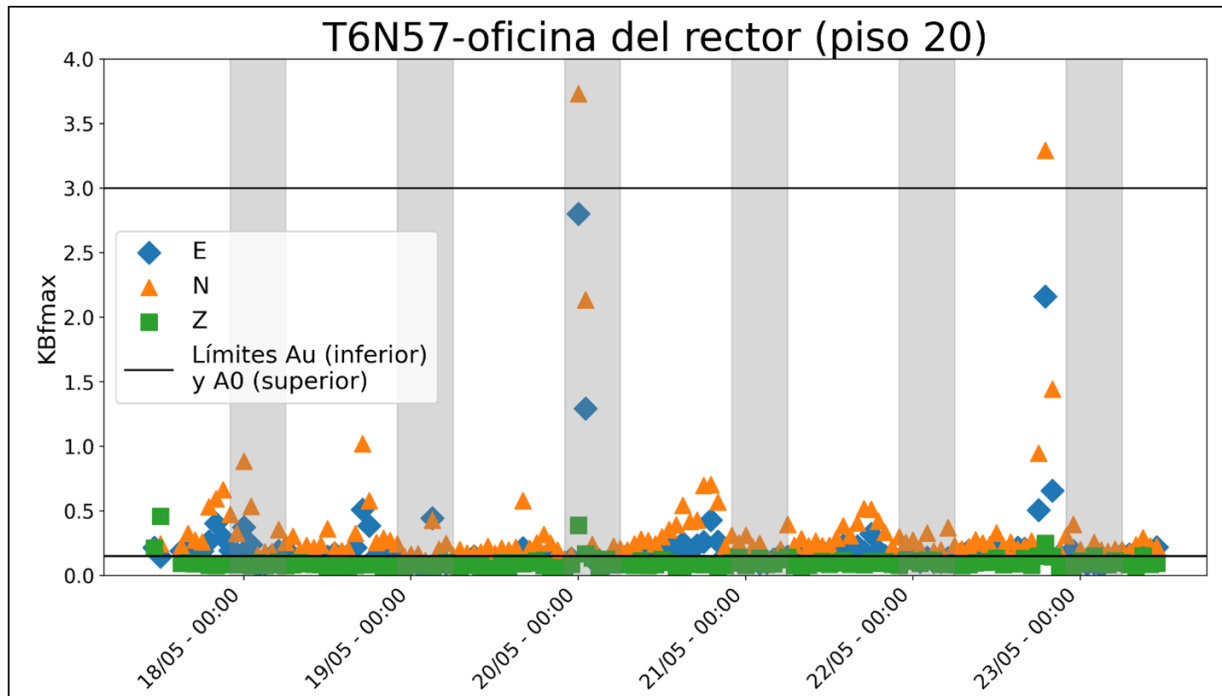


Figura 5.14: Severidad de vibración KBF por hora para el piso 20.

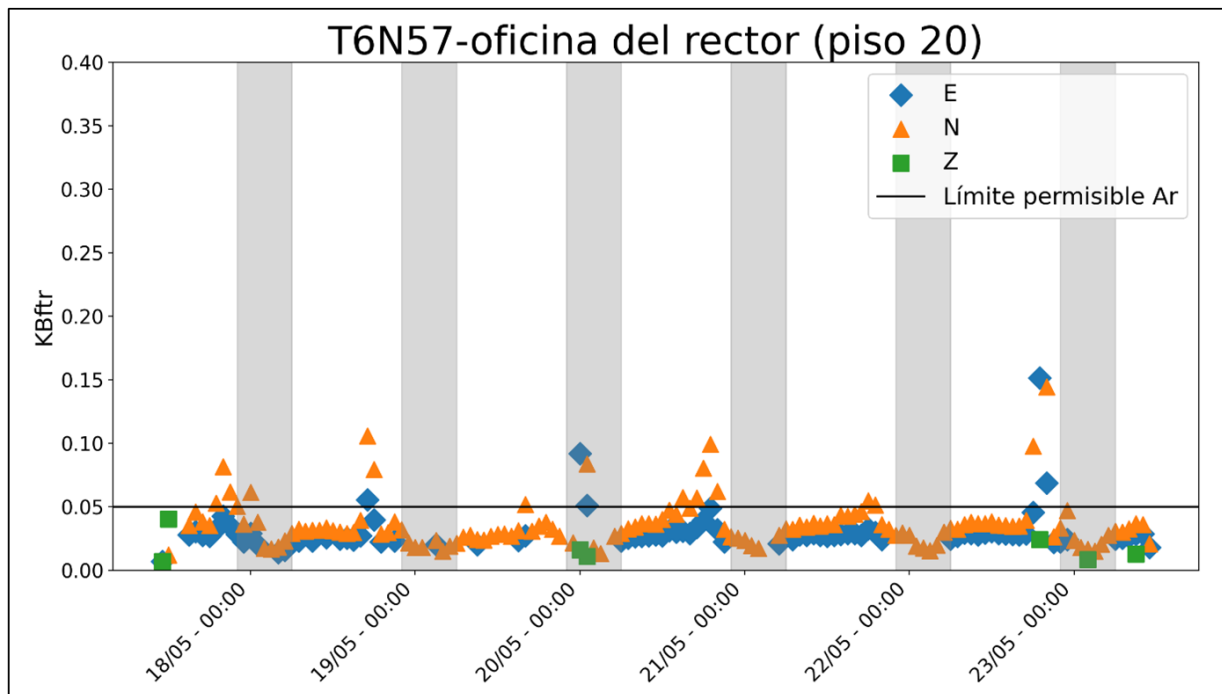


Figura 5.15: Severidad de vibración KBftr por hora para el piso 20.

Tabla 5.4: Análisis total de los registros de velocidad por sensor y componente

Piso	Equipo	Norte		Este		Vertical	
		KBF	KBFTr	KBF	KBFTr	KBF	KBFTr
10	T6N50	0.38	0.02	0.43	0.025	0.58	0.3
Sótano	T6N52	0.2	0.018	0.21	0.019	0.38	0.034
20	T6N57	0.5	0.03	0.38	0.03	0.20	0.017
Sótano	T6N61	0.18	0.015	0.16	0.009	0.15	0.014
20	T6N62	0.33	0.03	-	-	0.14	0.01
Sótano	T6N65	0.13	0.01	0.12	0.001	0.21	0.012
explanada	T6N67	0.25	0.026	0.17	0.018	0.47	0.03
10	T6N82	0.35	0.025	0.23	0.028	0.19	0.014

La tabla anterior (5.4) refleja el comportamiento promedio de los sensores dispuestos en los diferentes lugares dentro del inmueble. Los valores de severidad de vibración promedio aquí expuestos, se mantienen en el rango de evaluación con excepción del valor perteneciente al sótano (sensor T6N65). El resto de los sensores no exceden el valor permisible Ar de evaluación de la severidad de vibración. En la figura 58 se muestra una representación de la distribución de los valores por componente de VDV (5.16.a, b y c) y KBFmax (5.16.d, e y f) colocando los valores de la evaluación total por piso e interpolando entre el resto de los pisos del edificio. Se observa que en el sótano, y en la explanada se tienen los valores más bajos y estables para las componentes horizontales, pero en la componente vertical se presentan los más elevados que reflejan su cercanía con la fuente que es el tráfico vehicular. En los pisos 10 y 20 son las componentes horizontales las que presentan valores altos. En el área de las oficinas del piso 10 fue donde se midieron los movimientos más grandes y por lo tanto los de mayor probabilidad de ser percibidos.

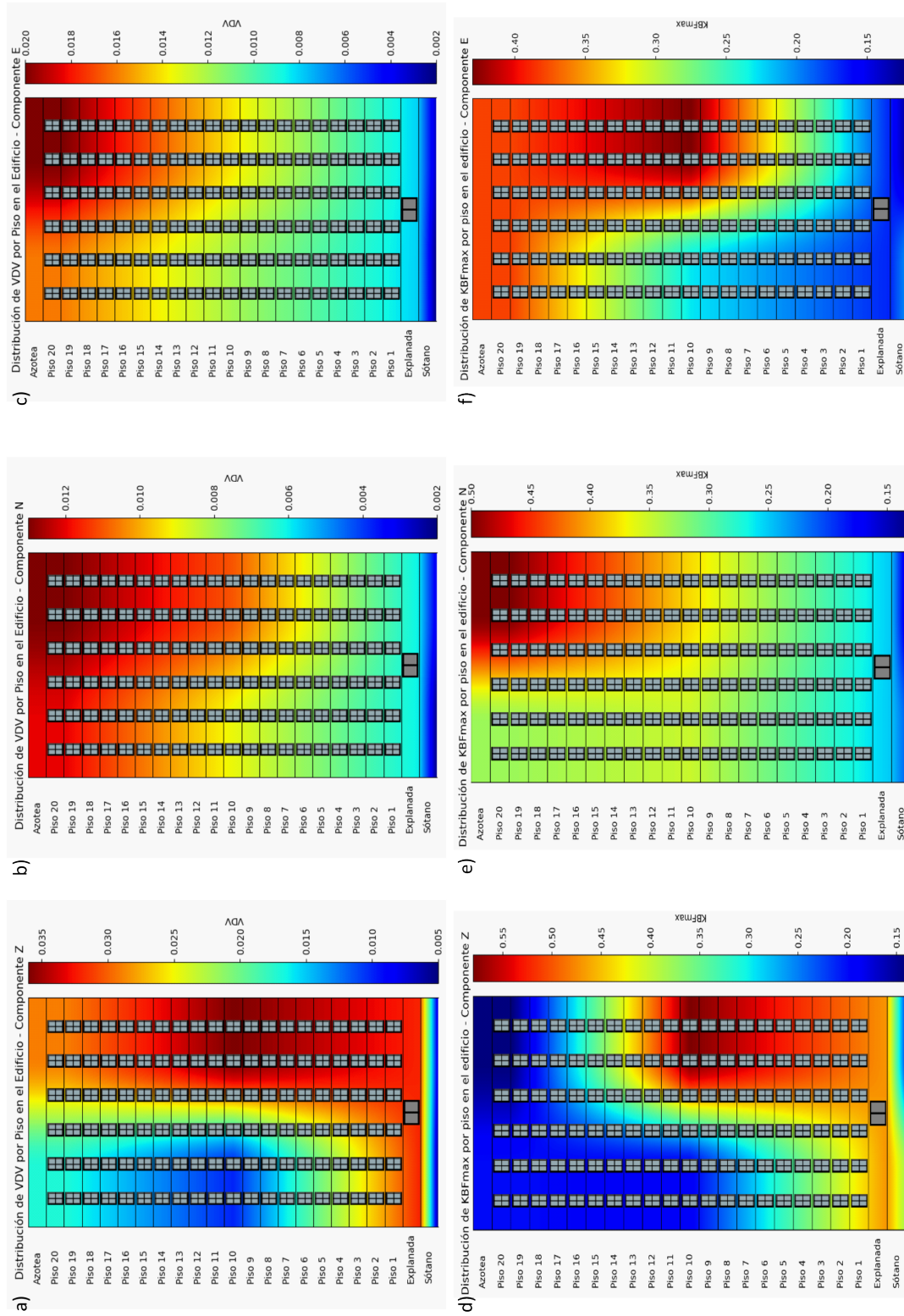


Figura 5.16: Representación bidimensional de la distribución de los valores de VDV (a, b y c) y de KBFmax (d, e y f).

5.2. Sistema de transporte colectivo de la Ciudad de México

Los registros de aceleración se calcularon con la ponderación Wd que evalúa el malestar en general en personas sentadas. De igual forma, en el sistema de transporte colectivo el descriptor que es destacado es el VDV. El valor máximo registrado de los 4 sistemas de transporte en la componente N (tabla 5.5) se obtuvo para el tipo combi, con un valor de VDV de $0.65 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y una aceleración máxima r.m.s. de $0.067 \left[\frac{m}{s^2} \right]$.

Tabla 5.5: Evaluación por hora para la componente N en los sistemas de transporte.

Norte					
Transporte	Factor de Cresta	Aceleración r.m.s. máx. $\left[\frac{m}{s^2} \right]$	MTVV $\left[\frac{m}{s^2} \right]$	Nivel de Aceleración r.m.s. máx. $[dB]$	Valor VDV $\left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$
Metrobús	7.76	0.01794	0.08211	85.1	0.166
Metro	6.08	0.02223	0.06261	86.9	0.1667
Combi	4.55	0.067	0.002	96.5	0.65
Tren Ligero	18.81	0.00247	0.02001	67.9	0.0332

El valor máximo registrado de los 4 sistemas de transporte en la componente E (tabla 5.6) se obtuvo para el tipo combi, con un valor de VDV de $0.39 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y una aceleración máxima r.m.s. de $0.0174 \left[\frac{m}{s^2} \right]$.

Tabla 5.6: Evaluación por hora para la componente E en los sistemas de transporte

Este					
Transporte	Factor de Cresta	Aceleración r.m.s. máx. $\left[\frac{m}{s^2} \right]$	MTVV $\left[\frac{m}{s^2} \right]$	Nivel de Aceleración r.m.s. máx. $[dB]$	Valor VDV $\left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$
Metrobús	7.59	0.01221	0.03154	81.7	0.0936
Metro	9.2	0.01295	0.06358	82.2	0.1158
Combi	8.28	0.036	0.002	91.1	0.39
Tren Ligero	10.8	0.00182	0.00855	65.2	0.0174

El valor máximo registrado de los 4 sistemas de transporte en la componente Z (tabla 5.7) se obtuvo para el tipo combi, con un valor de VDV de $0.39 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$ y una aceleración máxima r.m.s. de $1.4 \left[\frac{m}{s^2} \right]$.

En la siguiente gráfica (fig.5.17) se muestran los límites establecidos por las normas internacionales en donde se muestra en que rango caen los valores obtenidos mediante la

Tabla 5.7: Evaluación por hora para la componente Z en los sistemas de transporte

Este					
Transporte	Factor de Cresta	Aceleración r.m.s. máx. $[\frac{m}{s^2}]$	MTVV $[\frac{m}{s^2}]$	Nivel de Aceleración r.m.s. máx. $[dB]$	Valor VDV $[\frac{m}{s^{1.75}}]$
Metrobús	11.47	0.02238	0.09217	87	0.1883
Metro	5.8	0.03485	0.10012	90.8	0.2703
Combi	10.28	0.102	0.006	100.2	1.4
Tren Ligero	18.86	0.00248	0.02795	67.9	0.0397

medición con celulares: Baja probabilidad de comentarios adversos, Posibles comentarios adversos y Probables comentarios adversos. Los valores medidos en el transporte tipo combi son los más altos abarcando los 3 rangos. La componente E para todos los sistemas es la que tiene los menores valores registrados.

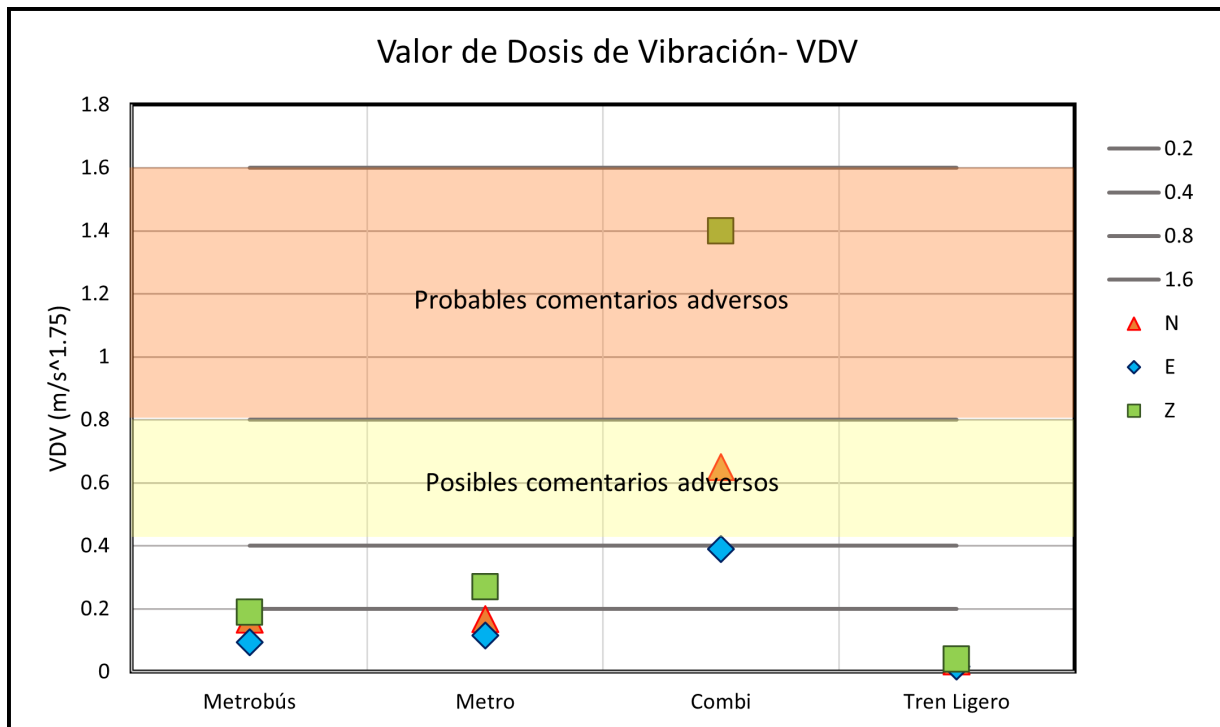


Figura 5.17: Valor de Dosis de Vibración para los sistemas de transporte público.

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Conclusiones y trabajo a futuro

En el análisis de los registros obtenidos en el Centro Cultural Universitario, se aprecia que los niveles de VDV (Valor de Dosis de Vibración) no exceden el límite inferior de 0.2, ni el umbral de percepción de 0.015 establecido por las normas internacionales. Según las NTCC, el límite de aceleración permitido es de 0.26 VDV.

En el caso de los registros de velocidad, los valores promedio de la severidad de vibración de cada sensor, exceptuando los pertenecientes a el sensor T6N65 dispuesto en el sótano, se encuentran en el rango de evaluación contemplado por la norma alemana DIN 4150 y no sobrepasan el valor permisible A_r en una segunda evaluación, esto de manera general. En una evaluación más detalla, considerando ventanas de una hora, se observa cómo es la actividad diaria en la edificación. Se observó un movimiento limitado en los sensores ubicados en el sótano, predominando la componente vertical en estos registros, junto con la de la explanada. En contraste, en los pisos 10 y 20, los registros de los cuatro sensores (dos en cada piso) mostraron la presencia de componentes horizontales. Los registros obtenidos con el sensor T6N50 ubicado en el piso 10 muestran una gran actividad en su componente vertical contrastando con el sensor T6N82 dispuesto en el mismo piso pero en contra esquina.

Aunque del análisis de los registros se concluye que la probabilidad de comentarios adversos en el CCUT es baja, la percepción de vibraciones puede variar de persona a persona,

siendo algunas más sensibles que otras. Además, para tener una conclusión de mayor peso se deberán efectuar mediciones durante distintas épocas del año, para determinar si las festividades propias de la ciudad o el clima, tienen alguna influencia.

Se ha determinado que las vibraciones registradas en el edificio son causadas principalmente por el tránsito vehicular durante el horario diurno sobre la avenida Ricardo Flores Magón.

En cuanto al sistema de transporte colectivo, se debe considerar que el metro y el tren ligero cuentan con barras guía que facilitan el mantenimiento de una trayectoria recta, evitando las irregularidades del pavimento que afectan a otros medios de transporte como el Metrobús y la combi. Al evaluar el malestar general utilizando la ponderación de vibraciones, se observa que los valores son generalmente inferiores a $0.2 \left[\frac{m}{s^{1.75}} \right]$, con la excepción de la componente vertical del metro y las componentes triaxiales de la combi, que se sitúan en niveles superiores, convirtiéndose en los medios de transporte más incómodos según esta evaluación.

6.1.1. Limitaciones del estudio y consideraciones ambientales y externas del CCUT

Para mejorar el modelo de propagación de las vibraciones se requiere contar con mayor número de mediciones simultáneas y colocar acelerómetros contiguos a los sismómetros. En el caso de las mediciones en el CCUT se aprecia que las arcillas sobre las que está cimentado el edificio amplifican las vibraciones, pero también se debe considerar la influencia que la actividad humana tiene cuando las personas se encuentran cerca de los sensores. La corrección instrumental en el dominio del tiempo para estos sensores en particular tuvo ciertas complicaciones por lo cual no fue realizada y los registros solamente fueron escalados para poder trabajar con ellos, pues el rango de interés para la obtención de estos resultados se encuentra acorde a la respuesta plana de los sensores.

6.1.2. STC

Las principales limitaciones durante la adquisición de los datos lo fueron el ancho de banda de los sensores y la frecuencia de muestreo y el número de equipos utilizados.

En el caso de los 4 diferentes medios de transporte evaluados se deben considerar que no se cuenta con un sistema para fijar los dispositivos móviles a la unidad por lo que los sensores utilizados (que se encuentran en la aplicación de los celulares) son sujetados por la mano del experimentador lo que, indudablemente, altera las mediciones registradas.

6.1.3. Conclusiones finales

Atendiendo a los objetivos propuestos en este trabajo:

- Se logró evaluar el impacto de la vibración en las personas dentro de edificaciones y durante las actividades rutinarias como son el transportarse usando el STC.
- Mediante el uso de la normatividad internacional y aplicando lo que en ellas se estipula, se lograron calcular los diferentes descriptores que permitieron comparar los resultados aquí presentados.
- Se logró desarrollar un sistema integral de evaluación de vibraciones, en donde se realiza el procesamiento de datos en formato SAC y también llevar a cabo la comparación de los resultados obtenidos con los diferentes parámetros de las normatividades.

Referencias

- Clarke, H. R. (1967). Efectos de la vibración en el cuerpo humano. *Revista de Ergonomía*, 10(2), 112-128.
- Coermann, R. R. (1962). La impedancia mecánica del cuerpo humano en posición sentada y de pie a bajas frecuencias. *Factores Humanos*, 4, 227-253.
- de la Ciudad de México, G. (2023). *Normas Técnicas Complementarias para el Diseño y Construcción de Estructuras en la Ciudad de México*. Secretaría de Obras y Servicios.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (1999a). *Structural Vibration - Part 2: Effects of Vibration on Structures* (inf. téc. N.º DIN 4150-2). DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Germany.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (1999b). *Structural Vibration - Part 3: Effects of Vibration on Structures* (inf. téc. N.º DIN 4150-3). DIN Deutsches Institut für Normung e.V. Berlin, Germany.
- Deutsches Institut für Normung e.V. (2012). DIN 4566-1: Design and Construction of Reinforced Concrete Silo Structures - Part 1: General Rules. <https://www.beuth.de/en/technical-rule/din-4566-1/157821453>
- Getline, J. H. (1955). Efectos de la vibración sobre el cuerpo humano. *Revista de Ergonomía*, 5(4), 267-280.
- Goldman, D. E. (1948). La sensación de vibración. *Journal of the Acoustical Society of America*, 20(4), 519-541.
- Griffin, M. J. (1990). *Handbook of Human Vibration*. Human Factors Research Unit, Institute of Sound; Vibration Research, The University.

- Griffin, M. J., Lewis, C. H., Parsons, K. C., & Whitham, E. M. (1979). La respuesta biodinámica del cuerpo humano y su aplicación a los estándares. En H. E. von Gierke (Ed.), *Actas de la Conferencia AGARD CP-253 En: Modelos y análogos para la evaluación de la respuesta biodinámica humana, rendimiento y protección* (A28).
- Havskov, J., & Alguacil, G. (2010). *Instrumentation in Earthquake Seismology* (2nd). Springer.
- Institution, B. S. (1984). *La evaluación de la exposición humana a la vibración en edificios (de 1 Hz a 80 Hz)*.
- Institution, B. S. (1987). *Medición y evaluación de la exposición humana a la vibración mecánica de cuerpo completo y choque repetido*.
- ISO 2631. (1997). *Evaluación de la exposición del cuerpo humano a la vibración*. Organización Internacional de Normalización.
- Janeway, C. A. (1948). La influencia de la vibración en el sistema nervioso humano. *Journal of Clinical Investigation*, 27(2), 123-139.
- Kowalska-Koczwara, A., Pachla, F., & Nering, K. (2021). Environmental Protection Against Noise and Vibration. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1203, 032026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1203/3/032026>
- Magid, A. (1960). La respuesta del cuerpo humano a la vibración. *Revista de Investigación en Ergonomía*, 8(1), 45-59.
- Magid, E., & Coermann, R. R. (1960). Actas del Instituto de Ciencias Ambientales. *Instituto de Ciencias Ambientales*.
- Miwa, T. (1967a). Métodos de evaluación para efectos de vibración. Parte 1. Mediciones de umbral y contornos de sensación igual de todo el cuerpo para vibraciones verticales y horizontales. *Industrial Health*, 5, 183-205.
- Miwa, T. (1967b). Métodos de evaluación para efectos de vibración. Parte 2. Medición del nivel de sensación igual para todo el cuerpo entre vibraciones sinusoidales verticales y horizontales. *Industrial Health*, 5, 206-212.

- Miwa, T. (1967c). Métodos de evaluación para efectos de vibración. Parte 3. Mediciones de umbral y contornos de sensación igual en la mano para vibraciones sinusoidales verticales y horizontales. *Industrial Health*, 5, 213-220.
- Miwa, T. (1969). Métodos de evaluación para efectos de vibración. Parte 8. La magnitud de la vibración de ondas aleatorias. *Industrial Health*, 7, 89-115.
- Organización Internacional de Normalización. (1974). *Guía para la evaluación de la exposición humana a la vibración de cuerpo completo*.
- Organización Internacional de Normalización. (1978). *Guía para la evaluación de la exposición humana a la vibración y el impacto mecánico de cuerpo completo*.
- Organización Internacional de Normalización. (1980). *Guía para la evaluación de la exposición humana a la vibración y el impacto en edificaciones (de 1 Hz a 80 Hz)*.
- Organización Internacional de Normalización. (1982). *Guía para la evaluación de la exposición humana a la vibración de cuerpo completo. Enmienda 1*.
- Organización Internacional de Normalización. (1985a). *Evaluación de la exposición humana a la vibración de cuerpo completo - Parte 1: Requisitos generales*.
- Organización Internacional de Normalización. (1985b). *Evaluación de la exposición humana a la vibración de cuerpo completo - Parte 2: Evaluación de la exposición humana a la vibración y el impacto en edificaciones (1 a 80 Hz)*.
- Organización Internacional de Normalización. (1985c). *Evaluación de la exposición humana a la vibración de cuerpo completo - Parte 3: Evaluación de la exposición a la vibración vertical de eje z de cuerpo completo en el rango de frecuencia de 0.1 a 0.63 Hz*.
- Organización Internacional de Normalización. (1989). *Evaluación de la exposición humana a la vibración de cuerpo completo - Parte 2: Exposición humana a vibraciones continuas e inducidas por impacto en edificaciones (1 a 80 Hz)*.
- Rodríguez, M., Rojas, R., & Murià-Vila, D. (2018). *Estimación de los periodos predominantes de vibrar del terreno y de la estructura de velocidad de corte en cuatro sitios (edificios PC, CCUT, JAL y DUR)* (inf. téc.). Instituto para la Seguridad de las Construcciones de la Ciudad México. México.

- Sarria, G. A. (2006). Estudios urbanos y de movilidad en Bogotá: Desafíos y oportunidades. *Revista de Estudios Urbanos y Regionales*, 18(2), 45-67.
- Scherbaum, F. (2001). *Of Poles and Zeros: Fundamentals of Digital Seismology* (2nd). Springer.
- Seidel, H. (1988). Myoelectric reactions to ultra-low frequency and low-frequency whole-body vibration. *European Journal of Applied Physiology*, 57, 558-562.
- Seidel, H., Bastek, R., Brauer, D., Buchholz, C., Meister, A., Metz, A.-M., & Rothe, R. (1980). On human response to prolonged repeated whole-body vibration. *Ergonomics*, 23, 191-211.
- Seidel, H., Bluethner, R., & Hinz, B. (1986). Effects of sinusoidal whole-body vibration on the lumbar spine: the stress-strain relationship. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 57, 207-223.
- Seidel, H., & Heide, R. (1986). Long-term effects of whole-body vibration: a critical survey of the literature. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 58, 1-26.
- Seidel, H., & Troster, F. A. (1970). Ergebnis einer gezielten Reihenuntersuchung von 60 Traktoristen auf Gesundheitsschaden durch Lärm und Vibration (Results of a serial mass screening of 60 tractor drivers on health damage by noise and vibration). *Zeitschrift für die gesamte Hygiene und ihre Grenzgebiete*, 16, 447-450.
- Volkov, V. F. (1958). Estudio de las vibraciones y su influencia en el cuerpo humano. *Revista de Fisiología Aplicada*, 12(3), 215-230.
- Wald, D., Quitoriano, V., Heaton, T., & Kanamori, H. (1999). Relationships between Peak Ground Acceleration, Peak Ground Velocity, and Modified Mercalli Intensity in California. *Earthquake Spectra*, 15, 557-564.
- Wood, H. O., & Neumann, F. (1931a). Escala de Intensidad de Mercalli Modificada de 1931. *Boletín de la Sociedad Sismológica de América*, 21(4), 277-283.
- Wood, H. O., & Neumann, F. (1931b). Modified Mercalli Intensity Scale of 1931. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 21(4), 277-283.

- Worden, C., Gerstenberg, M., Rhoades, A., & Wald, D. (2012). Probabilistic Relationships between Ground-Motion Parameters and Modified Mercalli Intensity in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 102, 204-221.

Bibliografía

- Coermann, R. R. (1940). Investigaciones sobre el efecto de la vibración en el cuerpo humano (Untersuchungen über die Einwirkung von Schwingungen auf den Menschlichen Organismus) [Traducido por Shirley, W., Royal Aircraft Establishment, Farnborough, Biblioteca de Traducción 153]. *Luftfahrtmedizin*, 4, 73-117.
- Coermann, R. R. (1961). *Comparación de las características dinámicas de maniqués, animales y humanos*. Academia Nacional de Ciencias, Consejo Nacional de Investigación.
- Duffner, L. R., Hamilton, L. H., & Schmitz, M. A. (1962). Efecto de la vibración vertical de cuerpo completo en la respiración de sujetos humanos. *Journal of Applied Physiology*, 17, 913-916.
- Dupuis, H., & Zerlett, G. (1986). *Los efectos de la vibración de cuerpo completo*. Springer-Verlag.
- Dupuis, H., & Zerlett, G. (1987). Vibración de cuerpo completo y trastornos de la columna vertebral. *Archivos Internacionales de Salud Ocupacional y Ambiental*, 59, 323-336.
- Ernsting, J. (1961). *Efectos respiratorios de la vibración de cuerpo completo* (inf. téc. N.º 179). Instituto de Medicina de Aviación. Farnborough.
- Espinosa, J. L. (2005). Torre de Tlatelolco, en riesgo desde su origen. *El Universal*, 1.
- Griffin, M. J. (1975a). Niveles de vibración de cuerpo completo que afectan la visión humana. *Medicina de Aviación, Espacial y Ambiental*, 46, 1033-1040.
- Griffin, M. J. (1975b). Vibración vertical de sujetos sentados: efectos de la postura, nivel de vibración y frecuencia. *Medicina de Aviación, Espacial y Ambiental*, 46, 269-276.
- Griffin, M. J. (1975c). La evaluación de la exposición humana a la vibración de helicópteros. *La Revista Aeronáutica de la Real Sociedad Aeronáutica*, 110-123.

- Griffin, M. J. (1978). La evaluación de la vibración de vehículos y asientos. *Ergonomía Aplicada*, 9, 15-21.
- Griffin, M. J. (1981). Relaciones dosis-efecto para el dedo blanco inducido por vibración. *Actas de la Reunión Informal del Grupo del Reino Unido sobre Respuesta Humana a la Vibración*, 112-127.
- Griffin, M. J. (1982a). La definición de valores de dosis de riesgo para la vibración y el impacto de cuerpo completo. *Actas de la Reunión del Grupo Informal del Reino Unido sobre Respuesta Humana a la Vibración*, 5.
- Griffin, M. J. (1982b). *Los efectos de la vibración en la salud* (inf. téc. N.º Memorando No. 632). Instituto de Investigación de Sonido y Vibraciones, Universidad de Southampton. Laboratorios de Medicina Ocupacional e Higiene, Cricklewood.
- Griffin, M. J. (1984). Valores de dosis de vibración para la vibración de cuerpo completo: algunos ejemplos. *Actas de la Reunión del Grupo Informal del Reino Unido sobre Respuesta Humana a la Vibración*, 244-263.
- Griffin, M. J. (1988). Norma Internacional 2631 y Norma Británica 6841: una comparación de dos guías para la medición y evaluación de la exposición humana a la vibración de cuerpo completo y el shock repetido. *Actas de la Reunión Conjunta Franco-Británica*.
- Griffin, M. J., Macfarlane, C. R., & Norman, C. D. (1982). La transmisión de la vibración a la mano y la influencia de los guantes. En A. J. Brammer & W. Taylor (Eds.), *Efectos de la vibración en la mano y el brazo en la industria*. Wiley.
- Griffin, M. J., Parsons, K. C., & Whitham, E. M. (1982). Vibración y confort. IV. Aplicación de resultados experimentales. *Ergonomics*, 25, 721-739.
- Griffin, M. J., & Whitham, E. M. (1976). Duración de la exposición a la vibración de cuerpo completo: su efecto en el confort. *Journal of Sound and Vibration*, 48, 333-339.
- Griffin, M. J., & Whitham, E. M. (1977a). Estudios del malestar producido por la vibración de cuerpo completo impulsiva. *Actas de la Reunión del Grupo Informal del Reino Unido sobre la Respuesta Humana a la Vibración*.
- Griffin, M. J., & Whitham, E. M. (1977b). Evaluación del malestar de la vibración de cuerpo completo de doble eje. *Journal of Sound and Vibration*, 54, 107-116.

- Griffin, M. J., & Whitham, E. M. (1980a). Dependencia temporal del malestar por vibración de cuerpo completo. *Journal of Acoustical Society of America*, *68*, 1522-1523.
- Griffin, M. J., & Whitham, E. M. (1980b). Malestar producido por la vibración de cuerpo completo impulsiva. *Journal of Acoustical Society of America*, *68*, 1277-1284.
- Guignard, J. (1964). *Una nota sobre la frecuencia cardíaca durante la vibración de cuerpo completo de baja frecuencia* (inf. téc. N.º Memorando Científico No. 58). Instituto de Medicina de Aviación de la Real Fuerza Aérea. Farnborough.
- Guignard, J. (1985). Vibración. En C. y Cralley (Ed.), *Higiene Industrial y Toxicología de Patty* (2da Edición, pp. 653-724, Vol. 3b). Wiley.
- Guignard, J., & McCauley, M. (1982). Incidencia de mareo por movimiento inducido por formas de onda periódicas complejas. *Medicina de Aviación, Espacial y Ambiental*, *53*, 554-563.
- Guignard, J., & Travers, P. (1959). *Efecto de la vibración de la cabeza y de todo el cuerpo en la actividad electromiográfica de los músculos posturales en el hombre* (inf. téc. N.º Memorando 120). Comité de Investigación de Personal de Vuelo del Ministerio del Aire.
- Hopkins, G. (1971). *Modelo matemático de parámetros concentrados no lineales de la respuesta dinámica del cuerpo humano* (inf. téc. N.º Informe Técnico No. 71-29). Laboratorios de Investigación Médica Aeroespacial. Dayton, Ohio.
- Hornick, R., & Lefritz, N. (1966). Un estudio y revisión de la respuesta humana a la vibración aleatoria prolongada. *Factores Humanos*, *8*, 481-492.
- Martínez González, J., Lermo Samaniego, J., Vergara-Huerta, F., & Ramos Pérez, E. (2015). Avances en la zonificación sísmica de la Ciudad de México y zona de Chalco, Edo. de Mex., propuesta de nuevo mapa de periodos dominantes para las ntc para diseño por sismo del reglamento del D.F.
- Miwa, T. (1964a). Estudios en protectores de mano para herramientas vibratorias portátiles. 1. Mediciones del efecto de atenuación de materiales elásticos porosos. *Industrial Health*, *2*, 95-105.

- Miwa, T. (1964b). Estudios en protectores de mano para herramientas vibratorias portátiles. 2. Simulaciones de materiales elásticos porosos y sus aplicaciones a protectores de mano. *Industrial Health*, 2, 106-123.
- Miwa, T. (1968a). Métodos de evaluación para efectos de vibración. Parte 4. Mediciones de la magnitud de la vibración para todo el cuerpo y la mano en vibraciones verticales y horizontales. *Industrial Health*, 6, 1-10.
- Miwa, T. (1968b). Métodos de evaluación para efectos de vibración. Parte 5. Método de cálculo del nivel de magnitud de la vibración en vibraciones compuestas. *Industrial Health*, 6, 11-17.
- Miwa, T. (1968c). Métodos de evaluación para efectos de vibración. Parte 7. La magnitud de la vibración de los pulsos. *Industrial Health*, 6, 143-164.
- Miwa, T. (1975). Impedancia mecánica del cuerpo humano en diversas posturas. *Industrial Health*, 13, 1-22.
- Miwa, T. (1988). Evaluación de la vibración vertical dada al pie humano. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 83, 984-990.
- Miwa, T., & Yonekawa, Y. (1969). Métodos de evaluación para efectos de vibración. Parte 9. Respuesta a la vibración sinusoidal en postura de reposo. *Industrial Health*, 7, 116-126.
- Miwa, T., & Yonekawa, Y. (1971). Métodos de evaluación para efectos de vibración. Parte 10. Medición del efecto de atenuación de la vibración de los cojines. *Industrial Health*, 9, 81-98.
- Miwa, T., & Yonekawa, Y. (1973a). Medición y evaluación de vibraciones ambientales. Parte 1. Problemas relacionados con las mediciones. *Industrial Health*, 11, 159-176.
- Miwa, T., & Yonekawa, Y. (1973b). Medición y evaluación de vibraciones ambientales. Parte 2. Interacción del sonido y la vibración. *Industrial Health*, 11, 177-184.
- Miwa, T., Yonekawa, Y., & Kanada, K. (1979). Aisladores de vibración para herramientas vibratorias portátiles: Parte 4. Guantes de aislamiento de vibraciones. *Industrial Health*, 17, 141-152.

- Miwa, T., Yonekawa, Y., & Kanada, K. (1982). Potenciales lentos evocados por vibraciones impulsivas de cuerpo completo en hombres recostados. *Journal of the Acoustical Society of America*, *72*, 214-221.
- Miwa, T., Yonekawa, Y., & Kanada, K. (1984). Umbrales de percepción de la vibración en hombres recostados. *The Journal of the Acoustical Society of America*, *75*, 849-854.
- Miwa, T., Yonekawa, Y., & Kojima-Sudo, A. (1973). Medición y evaluación de vibraciones ambientales. Parte 3. Criterio de exposición a la vibración. *Industrial Health*, *11*, 185-196.
- Pushkina, N. N. (1961). Algunos índices sanguíneos en sujetos expuestos al efecto de la vibración general (total). *Gigiena Truda i Professional'nye Zabolevaniya*, *6*(2), 29-32.
- Reason, J. T., & Brand, J. J. (1975). *Mareo por movimiento*. Academic Press.
- Robertson, C. D., & Griffin, M. J. (1989). *Estudios de laboratorio de la respuesta electromiográfica a la vibración de cuerpo completo* (inf. téc.). Instituto de Investigación de Sonido y Vibración, Universidad de Southampton. Southampton.
- Rylands, J. M. (1985). *El efecto de una exposición prolongada al ruido y la vibración en el rendimiento de tareas* [Tesis de maestría, Universidad de Londres].
- Sontag, L. W., & Wallace, R. F. (1936). Cambios en la frecuencia cardíaca fetal humana en respuesta a estímulos vibratorios. *American Journal of Diseases of Children*, *51*, 583-589.
- Ullsperger, P., & Seidel, H. (1980). Sobre los potenciales evocados auditivos y la frecuencia cardíaca en el hombre durante la vibración de cuerpo completo. *European Journal of Applied Physiology*, *43*, 183-192.

Anexos

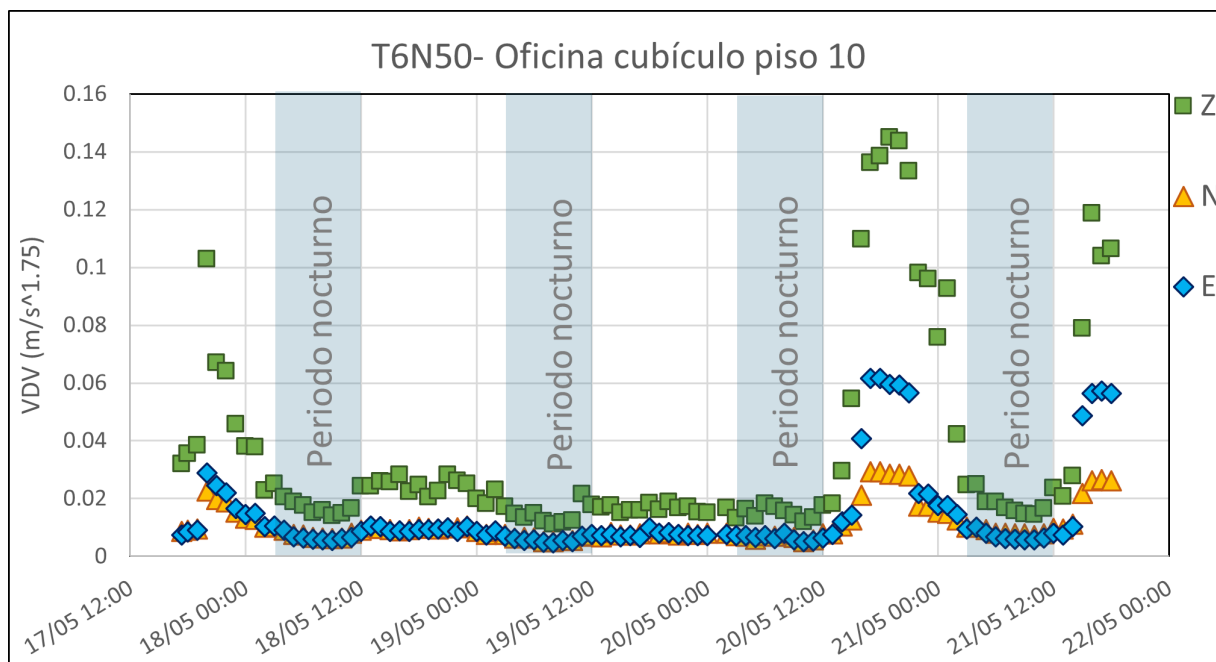


Figura 1: VDV para el sensor T6N50 ubicado en las oficinas en el piso 10

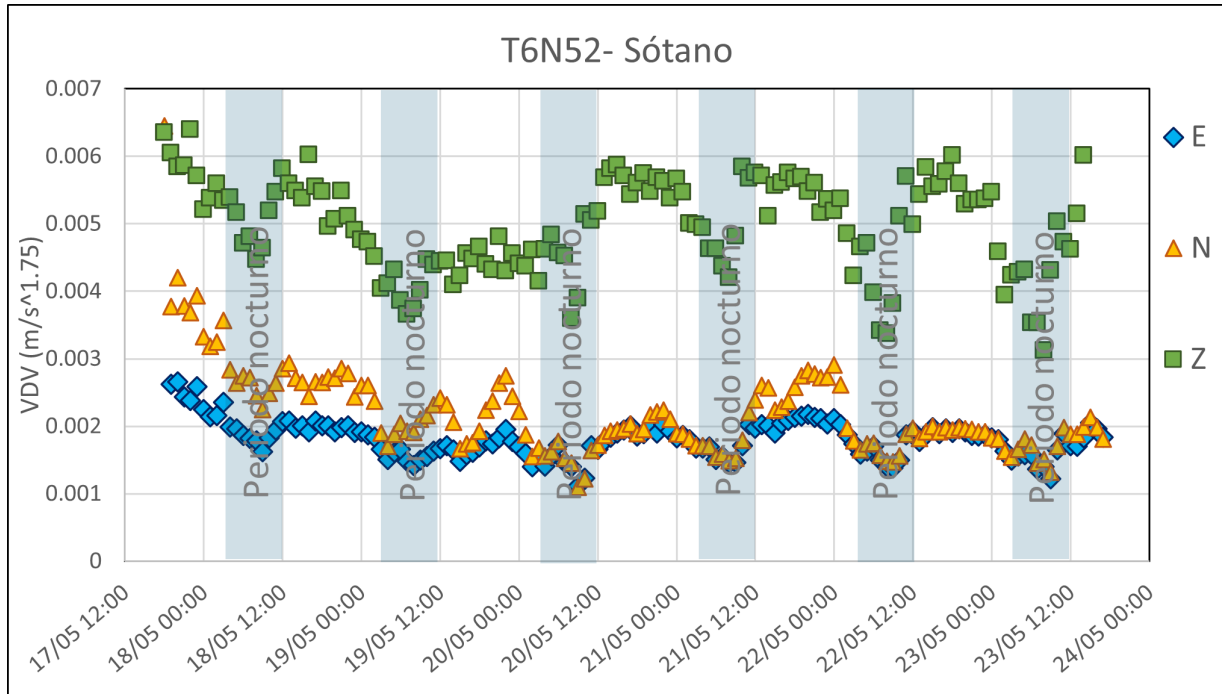


Figura 2: VDV para el sensor T6N52 ubicado en el sótano

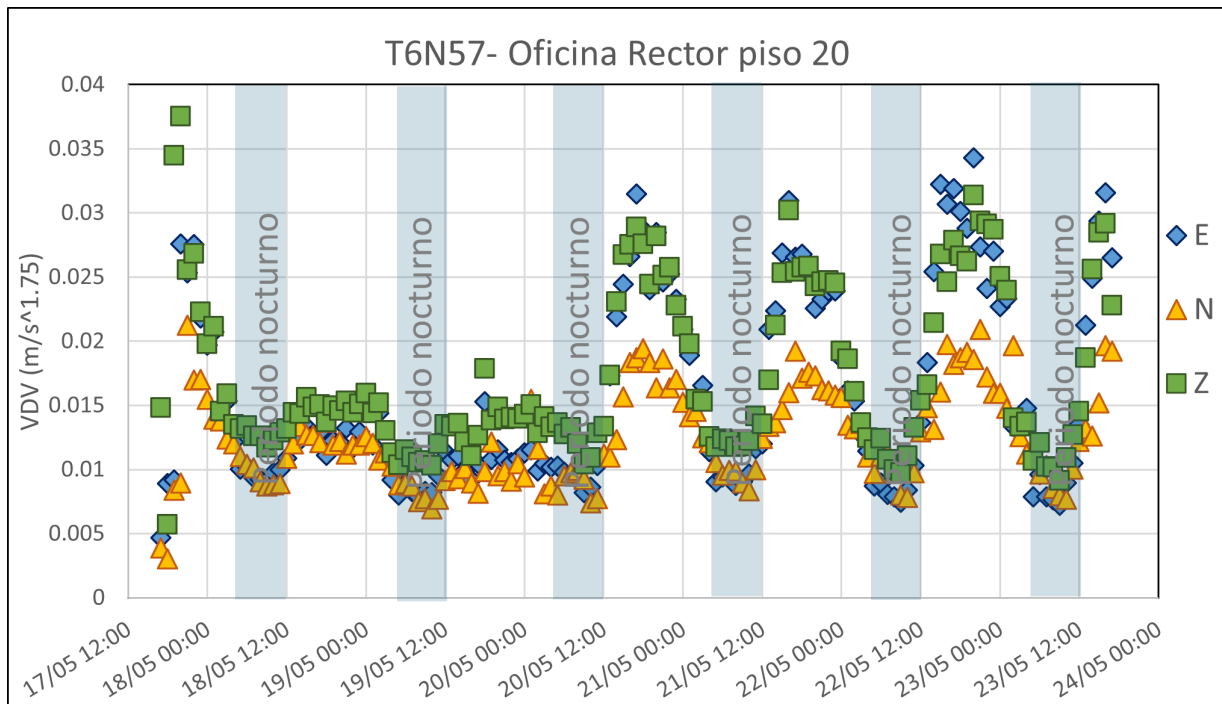


Figura 3: VDV para el sensor T6N57 ubicado en la oficina del rector en el piso 20

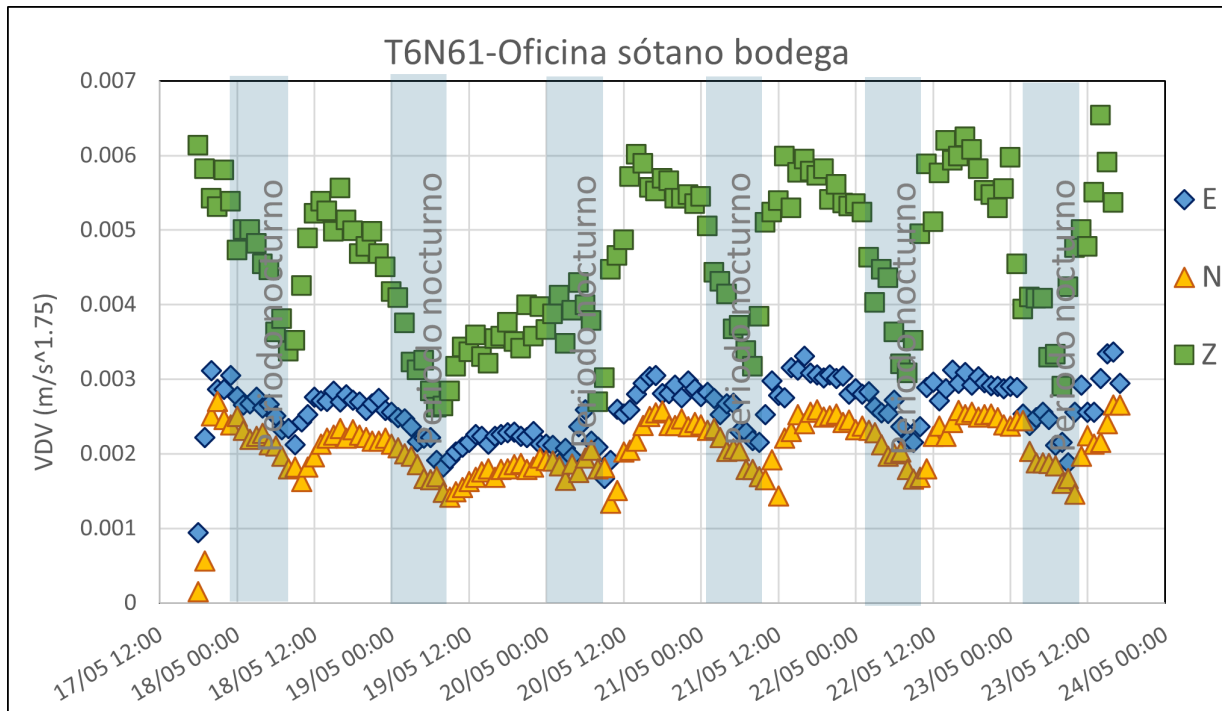


Figura 4: VDV para el sensor T6N61 ubicado en la oficina del sótano

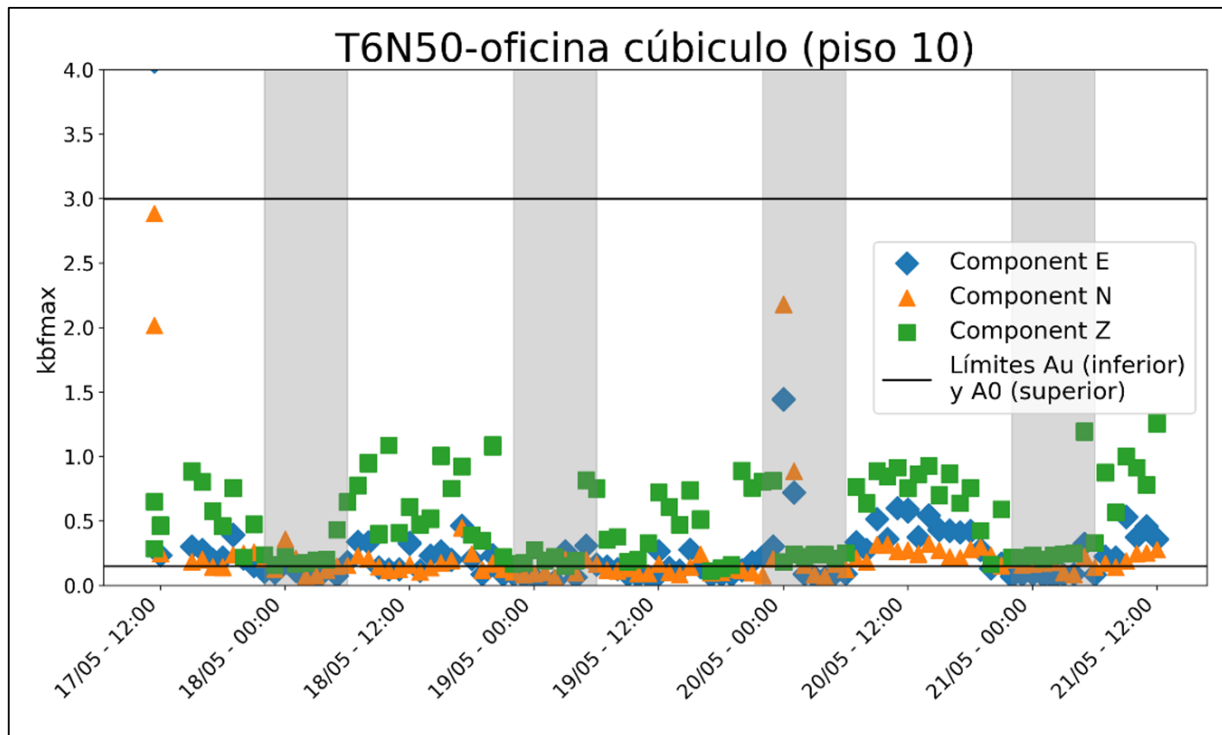


Figura 5: KBFmax para el sensor T6N50 ubicado en las oficinas en el piso 10

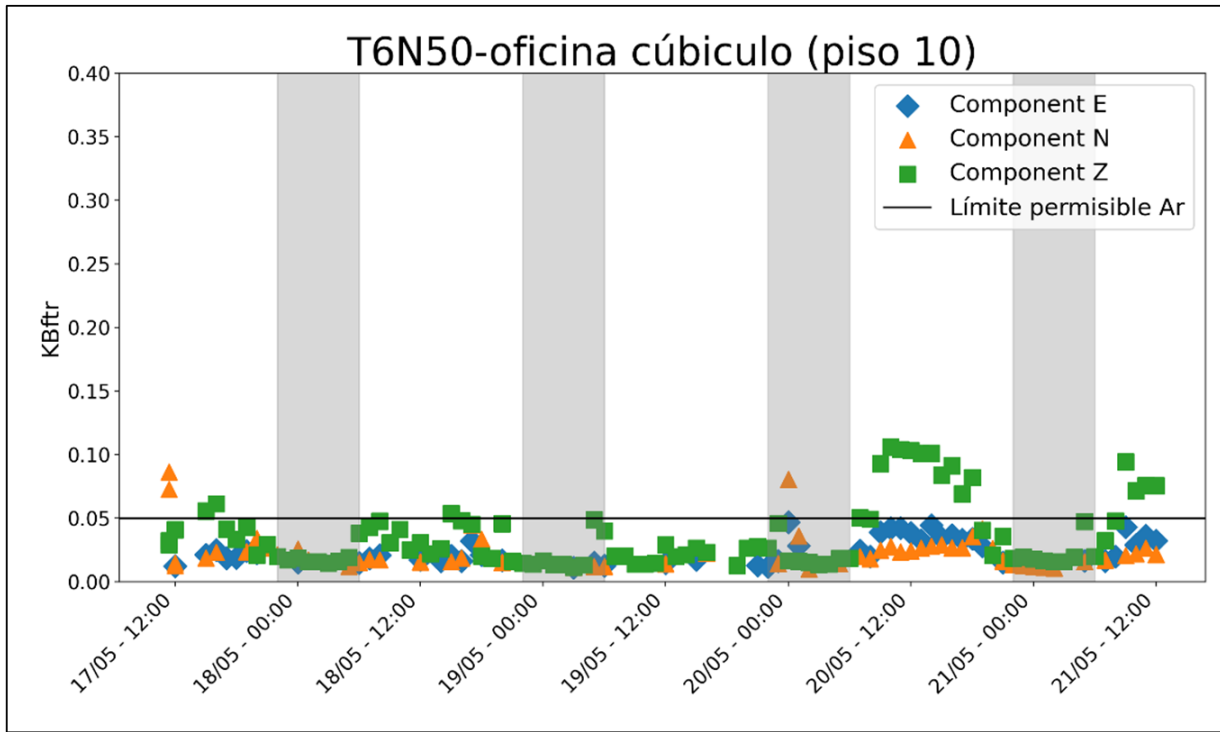


Figura 6: KBFtr para el sensor T6N50 ubicado en las oficinas en el piso 10

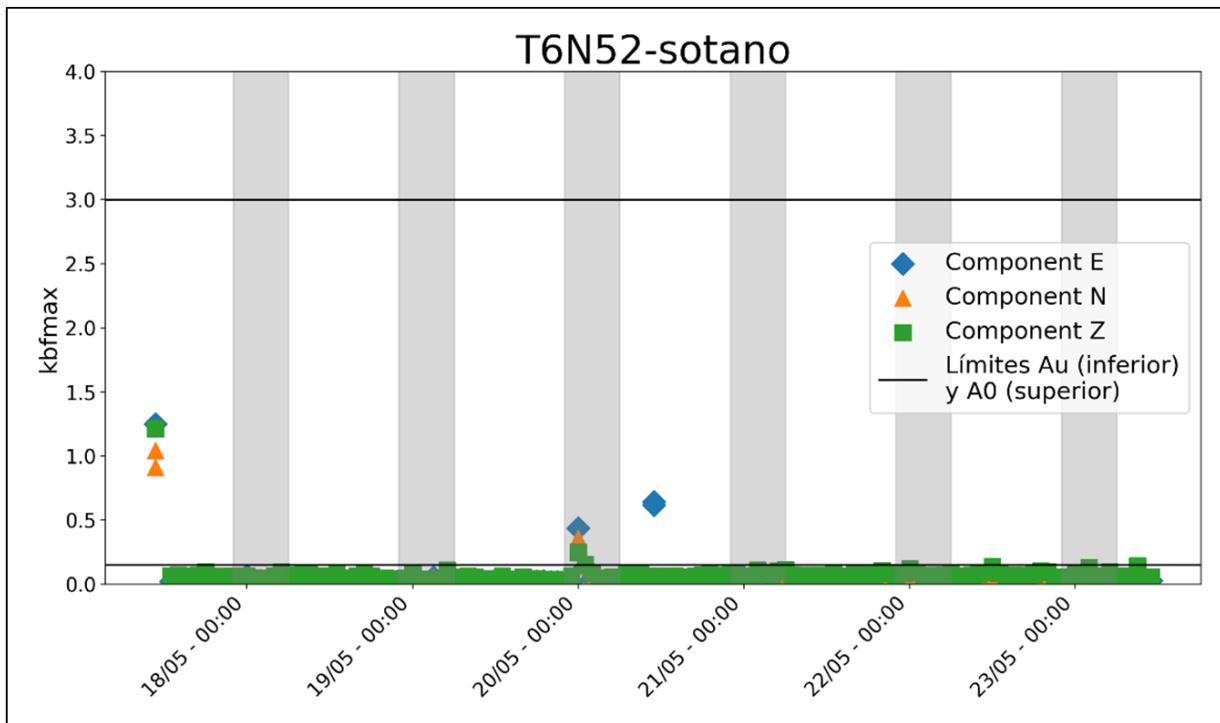


Figura 7: KBFmax para el sensor T6N52 ubicado en el sótano

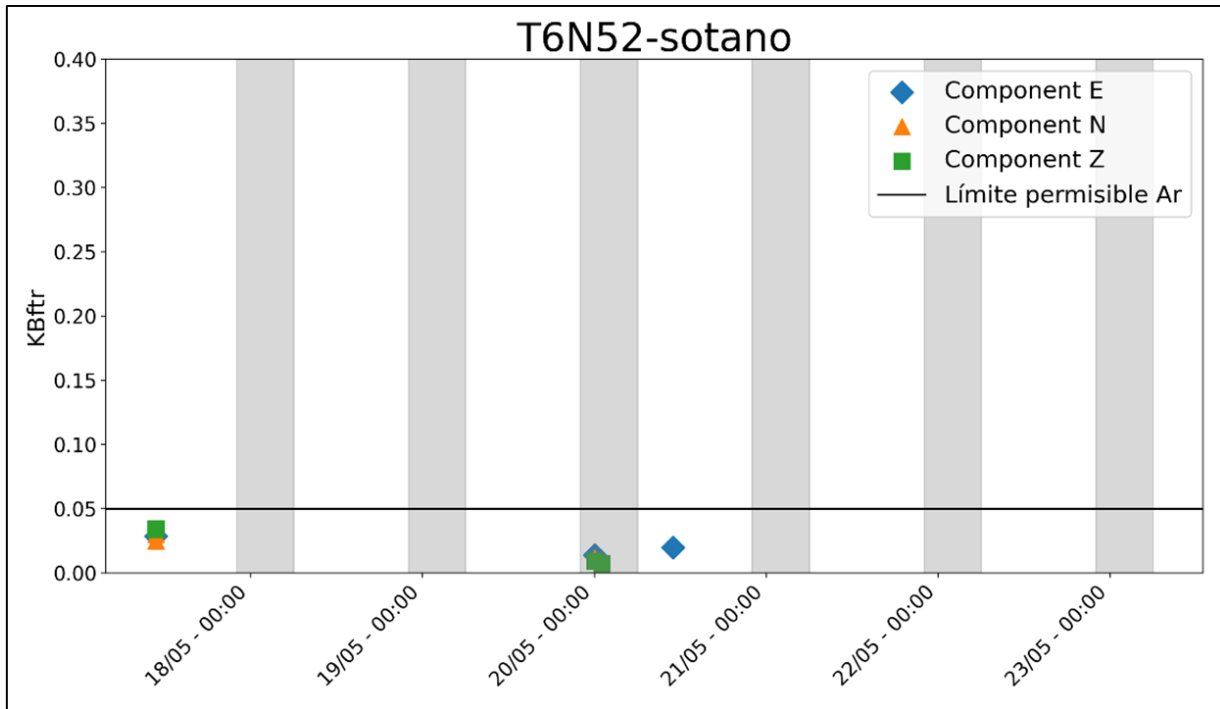


Figura 8: KBFtr para el sensor T6N52 ubicado en el sótano

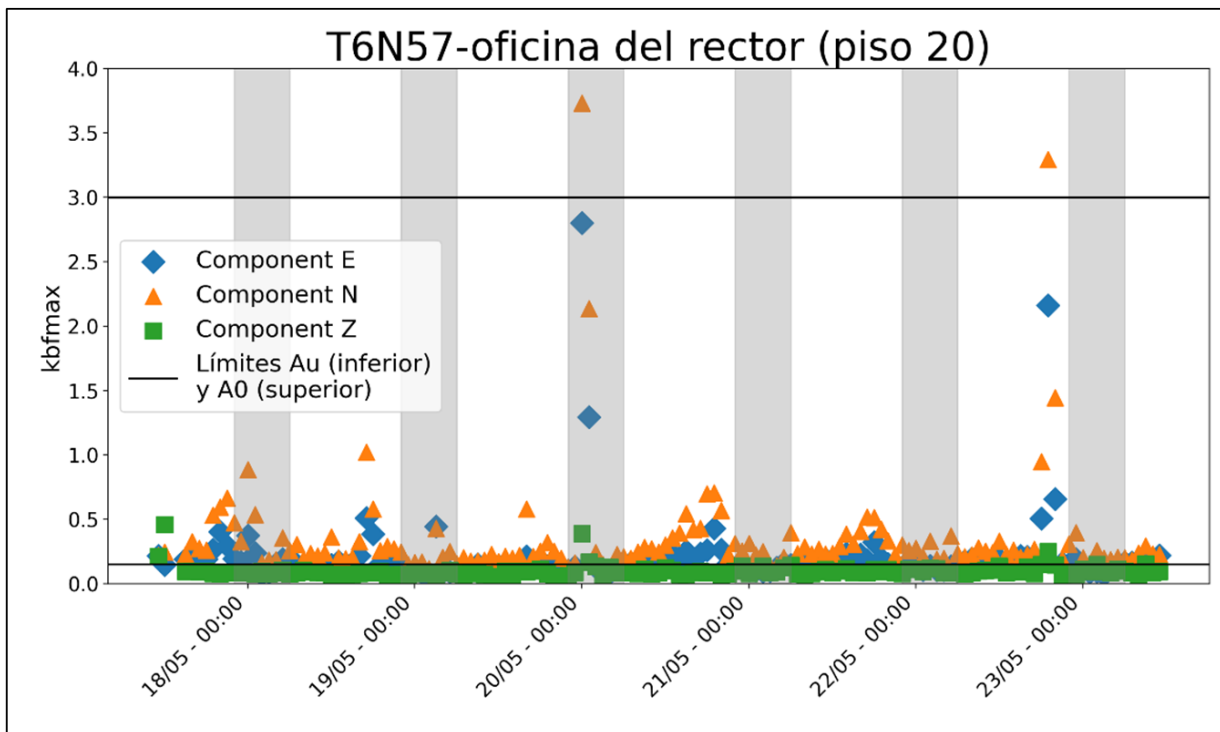


Figura 9: KBFmax para el sensor T6N57 ubicado en la oficina del rector en el piso 20

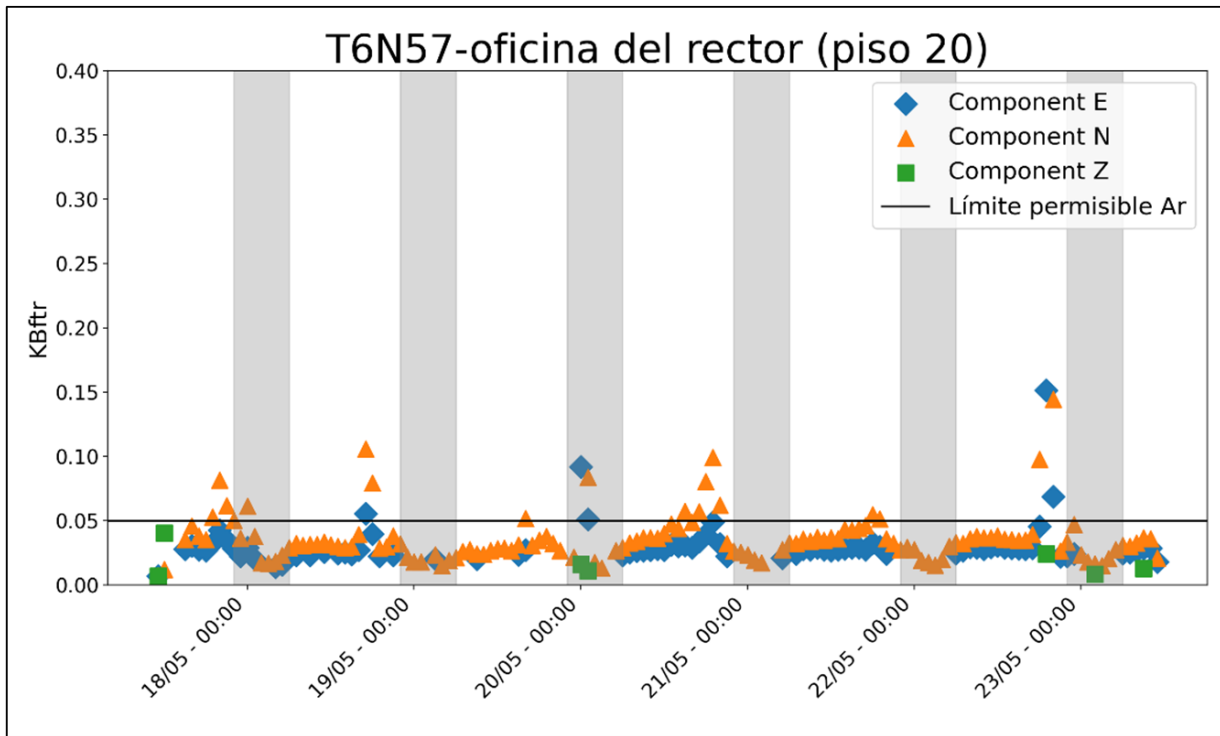


Figura 10: KBFtr para el sensor T6N57 ubicado en la oficina del rector en el piso 20

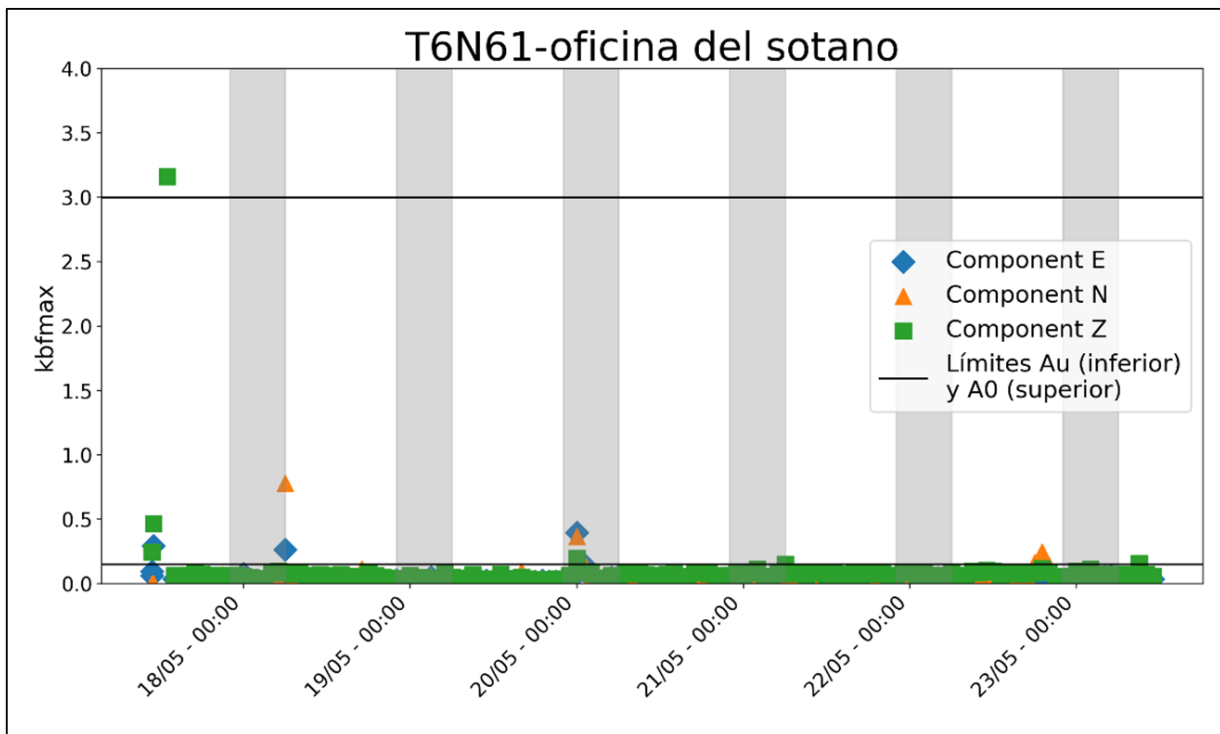


Figura 11: KBFmax para el sensor T6N61 ubicado en la oficina del sótano

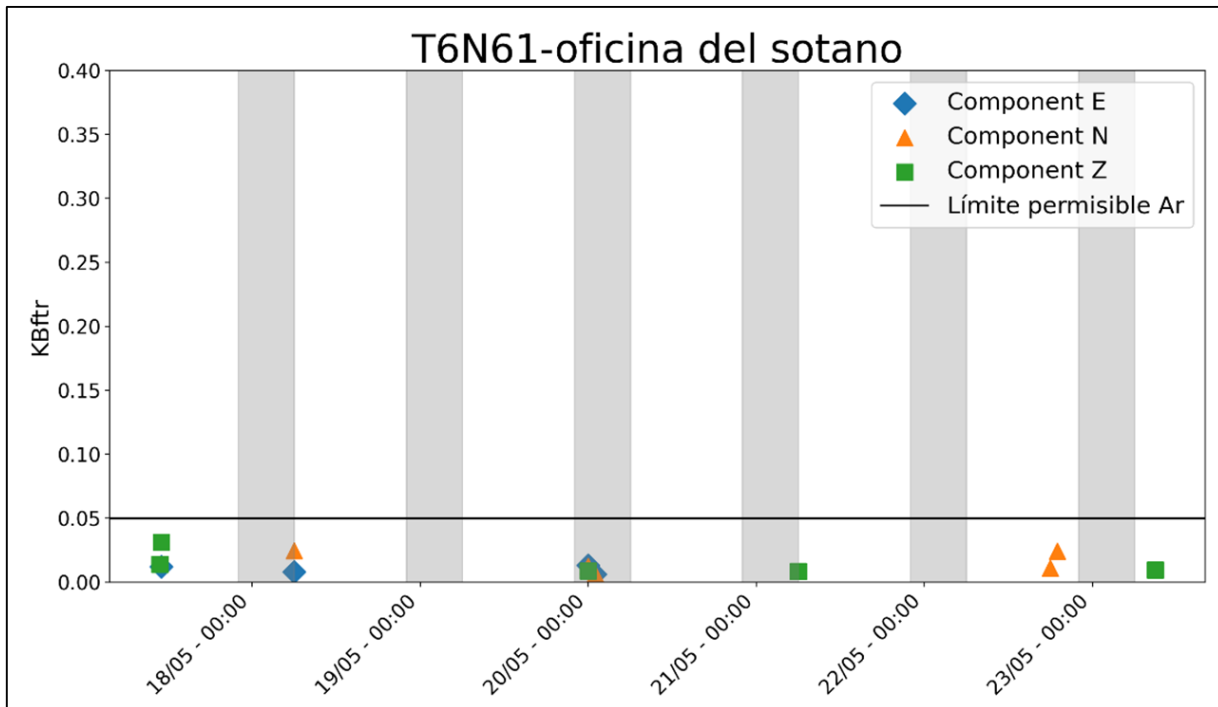


Figura 12: KBFtr para el sensor T6N61 ubicado en la oficina del sótano

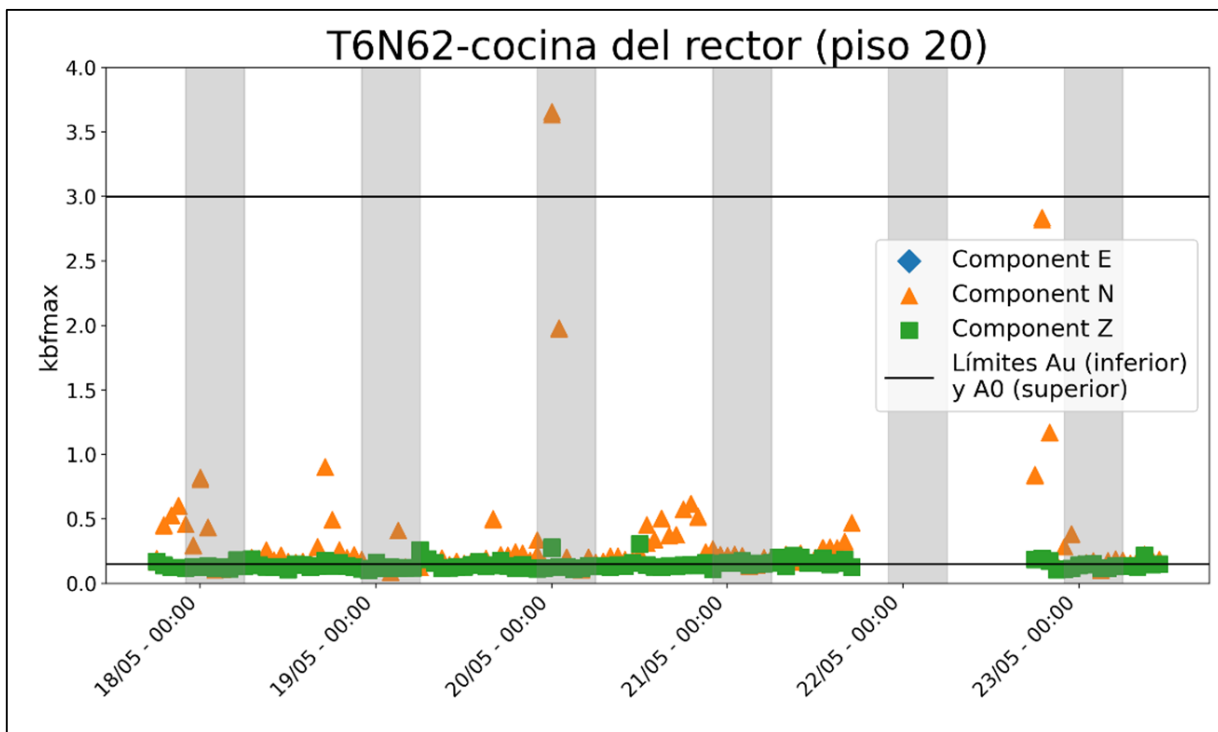


Figura 13: KBFmax para el sensor T6N62 ubicado en la cocina de la oficina en el piso 20

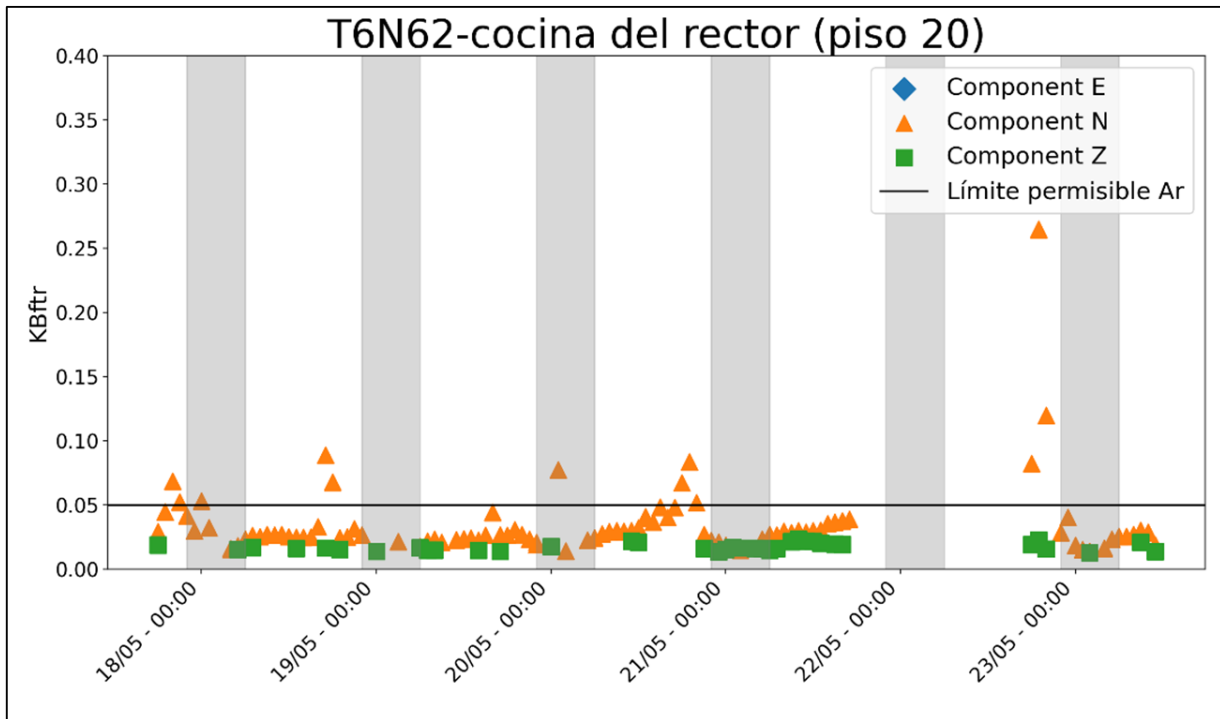


Figura 14: KBFtr para el sensor T6N62 ubicado en la cocina de la oficina en el piso 20

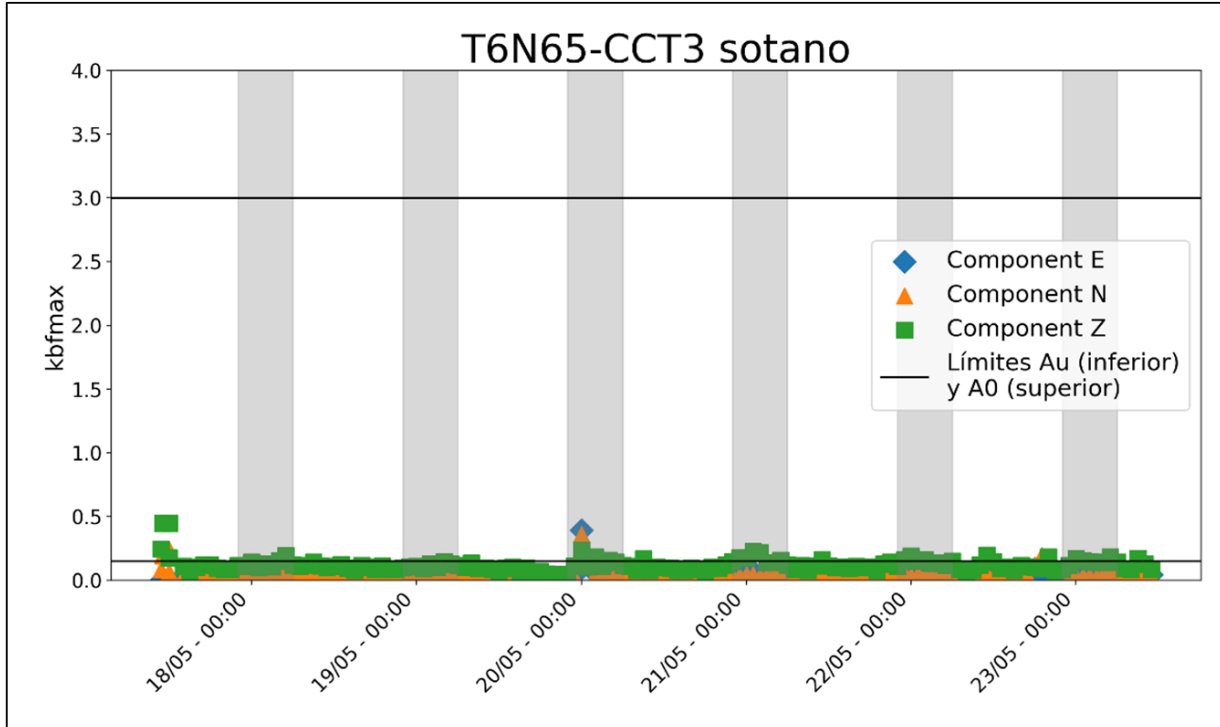


Figura 15: KBFmax para el sensor T6N65 ubicado en el sótano

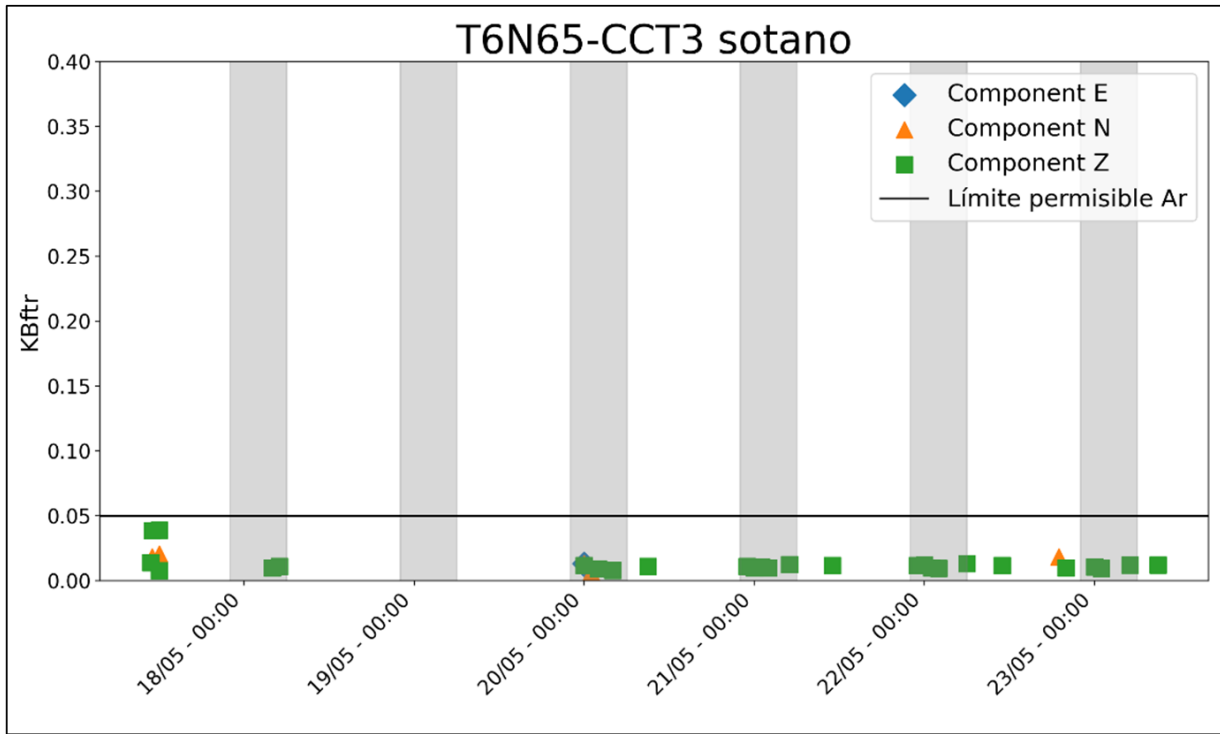


Figura 16: KBFtr para el sensor T6N65 ubicado en el sótano

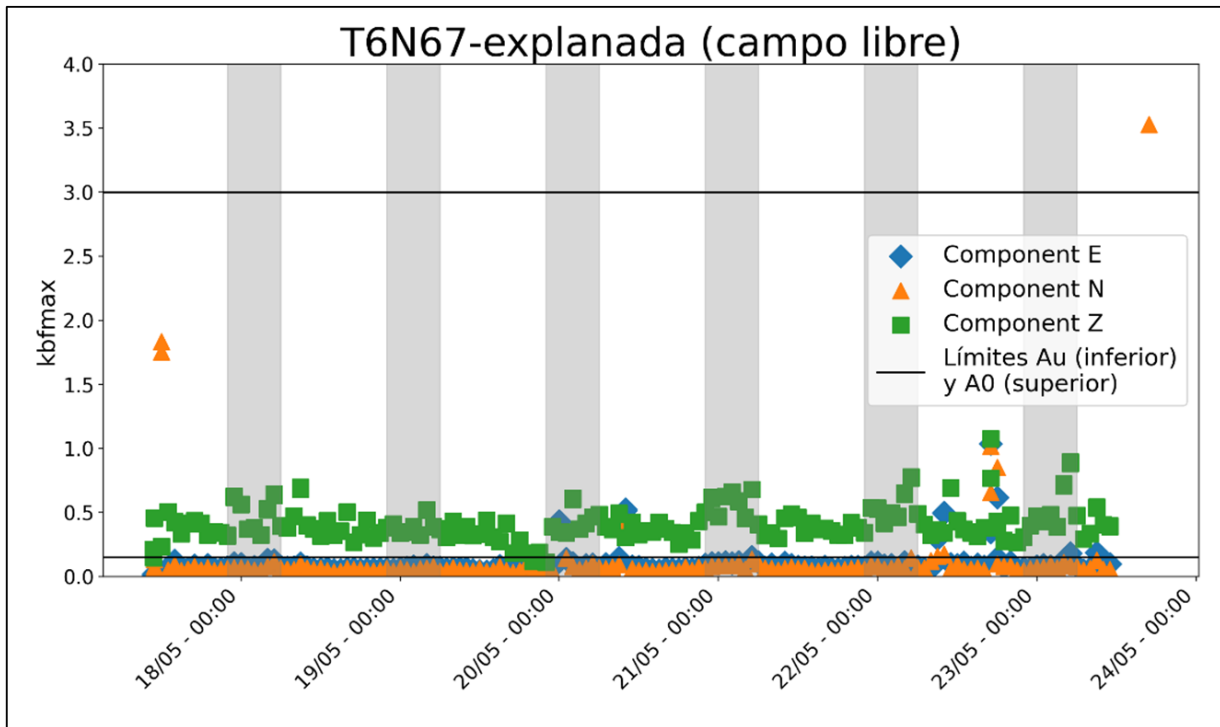


Figura 17: KBFmax para el sensor T6N67 ubicado como campo libre

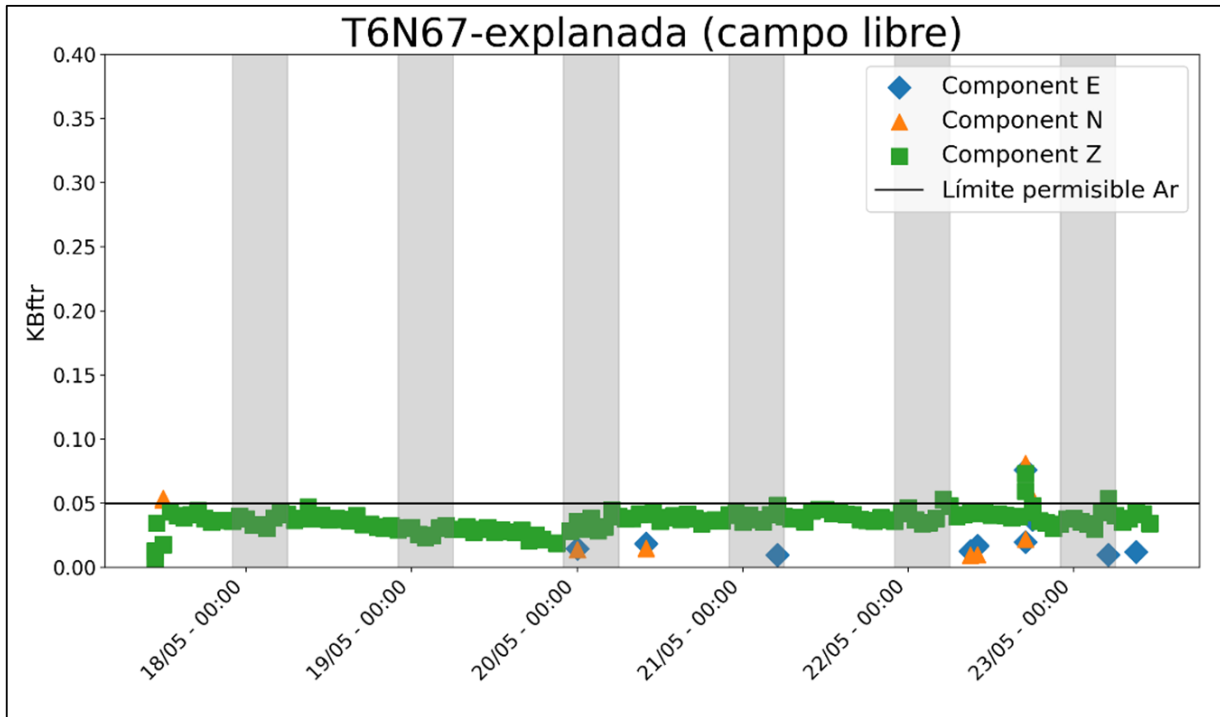


Figura 18: KBFtr para el sensor T6N67 ubicado como campo libre

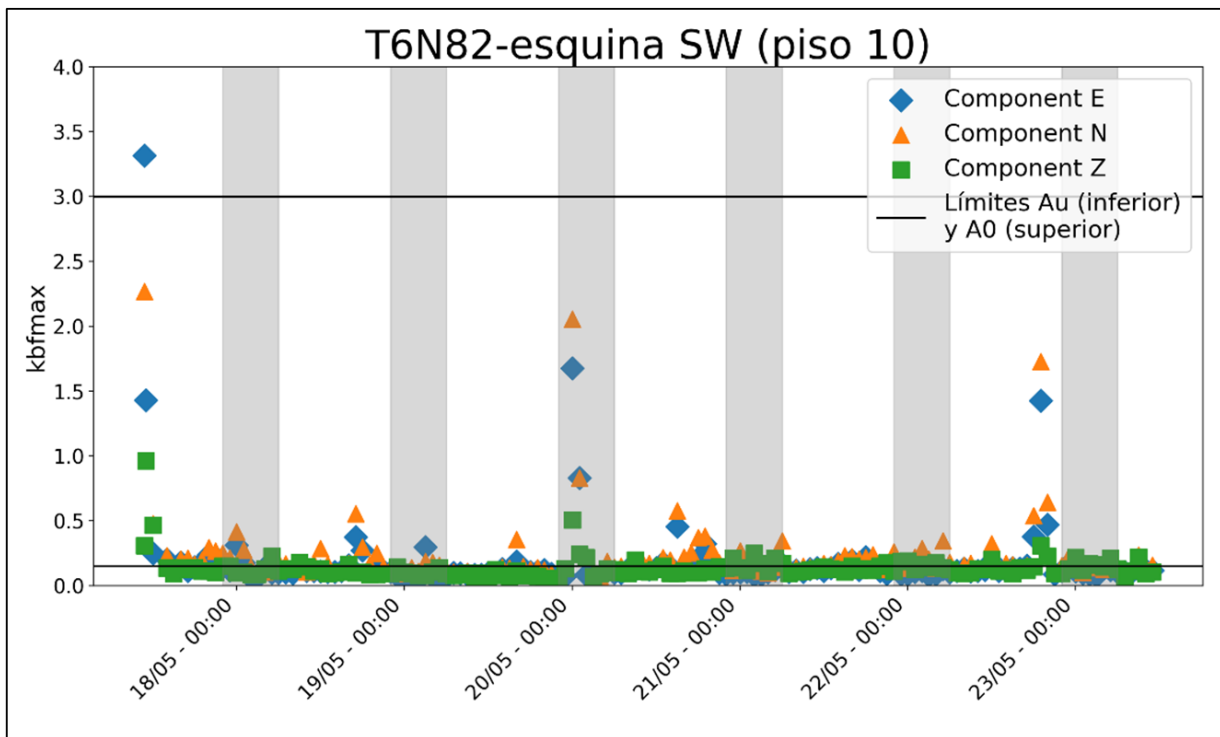


Figura 19: KBFmax para el sensor T6N82 ubicado las escaleras del piso 10

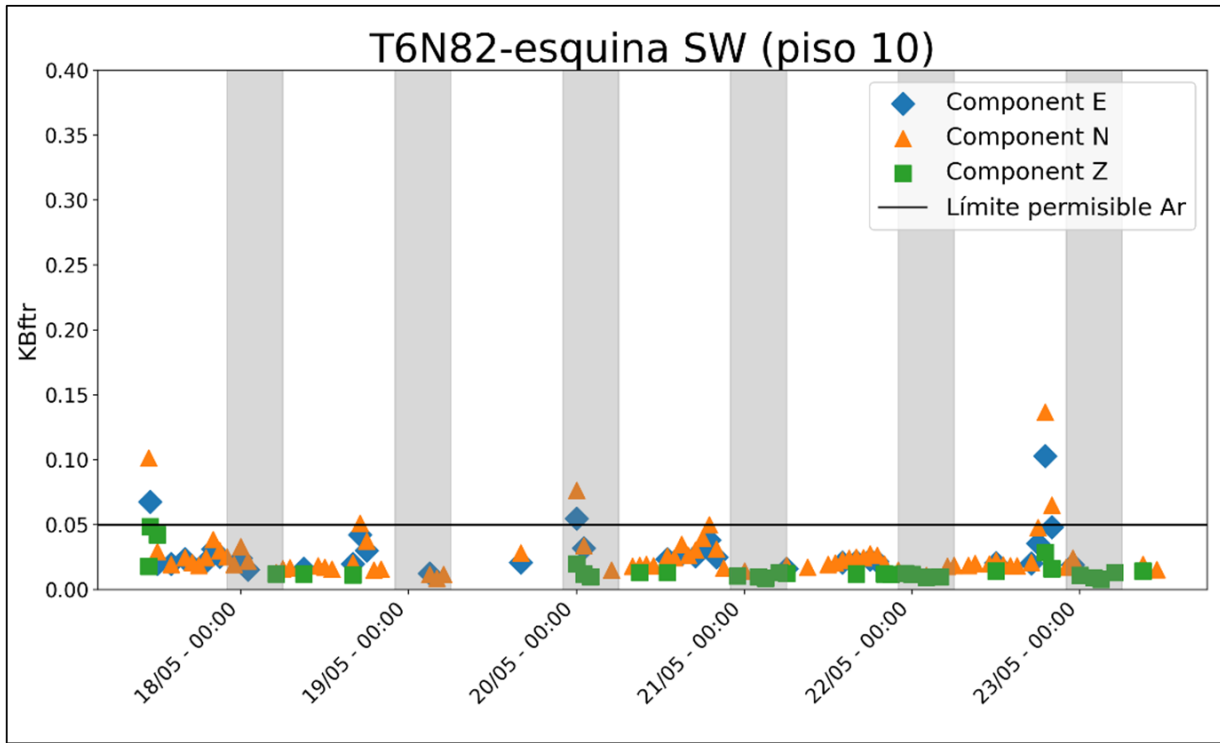


Figura 20: KBFtr para el sensor T6N82 ubicado las escaleras del piso 10

Apéndices

A. Vibración de cuerpo entero

A.1. Respuesta humana a la vibración.

En este apartado se explica la manera de cómo determinar la respuesta humana ante las vibraciones. Para valorarla se requiere considerar que las vibraciones se presentan en diferentes anchos de banda en frecuencia, con magnitudes en un rango amplio y que las personas están expuestas a la vibración en lapsos de tiempo diferentes (fig.21) Inicialmente se comenta la percepción e interferencia que la vibración genera en las personas y en sus actividades. Enseguida se presenta un resumen de las consecuencias fisiológicas, biodinámicas y psicológicas que el cuerpo humano experimenta cuando se le expone a la vibración. Para lograr lo anterior se requieren considerar factores como la fatiga, el malestar, el riesgo de lesiones musculoesqueléticas y la calidad del trabajo de las personas que experimentarán las vibraciones.

La duración de la exposición a la vibración es un factor crítico a tener en cuenta en diversos contextos, desde la seguridad laboral hasta la salud en general. La vibración prolongada puede tener efectos adversos significativos en el cuerpo humano, especialmente en áreas como las manos y los brazos cuando se trata de herramientas vibrantes o en el cuerpo entero en entornos donde la vibración es constante, como en vehículos pesados o maquinaria industrial. Es esencial limitar la exposición a la vibración a través de medidas preventivas adecuadas, como la rotación de tareas, el uso de equipos de protección y la implementación de controles de ingeniería a través de normas y regulaciones internacionales. En animales, Roman (1958) estudió la influencia a la vibración vertical de $\pm 15g$ en un

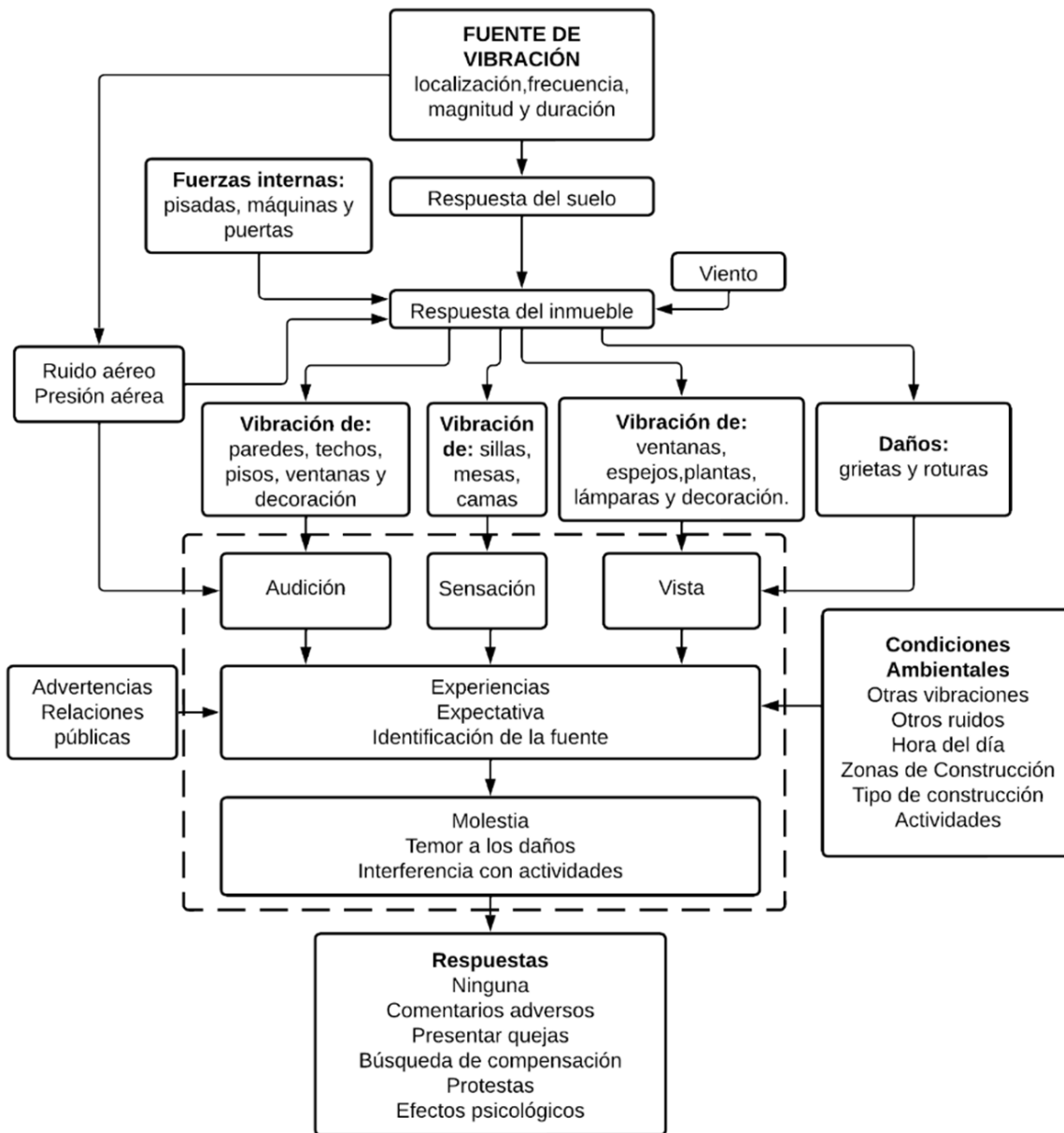


Figura 21: Factores que afectan la aceptabilidad de la vibración en edificios.
Tomado de Griffin,1990

rango de 5-50 Hz en la mortalidad de ratones; el tiempo promedio de exposición fue de 5 a 10 min dependiendo el eje de acción en el rango de frecuencia de 10-25 Hz. Los daños principales se presentaron en los pulmones y sangrado gastrointestinal. La tolerancia a la vibración se determinó sujetando con cinta a los animales a un molde del esternón al pubis, aumentando gradualmente la intensidad de la vibración. Un estudio similar se hizo

sometiendo a una persona a $\pm 8g$ a 25 Hz por 15 minutos en donde no se reportaron lesiones.

Schaefer (1959) determinó que las hemorragias en corazón y pulmones que provocaron la muerte entre ratas fueron causadas por su exposición a la vibración de cuerpo entero en un rango de 10-45 Hz. La mortalidad se incrementó con el aumento de la frecuencia de vibración y las hembras, los machos castrados y las ratas jóvenes tardaron más en morir. Riopelle et. al(1958) reportó efectos letales en siete monos expuestos a una frecuencia de vibración de 10 Hz entre $\pm 1.28g$ y $\pm 2.56g$ durante 8 horas. En la magnitud más baja un mono murió después de 1 h y otros 2 sobrevivieron 8 horas. En la magnitud más alta un mono murió después de 7 h, otro murió al día siguiente y solo dos sobrevivieron. Todos sufrieron hemorragias internas así como daños en los canales semicirculares del sistema vestibular. Nickerson y Paradijeff (1964) realizaron análisis post-mortem en perros expuestos a vibración sinusoidal severa. Con 4 Hz se encontró evidencia de hemorragia en riñones, tronco encefálico, corazón, pulmones e hígado; en frecuencias altas hubo cambios en la pituitaria, estómago, duodeno, páncreas y encéfalo.

Para los humanos, Roman (1958) condujo un experimento en donde se expuso una persona voluntariamente a vibración vertical entre 10-25 Hz y magnitudes de $\pm 3g$ a $\pm 10g$. El movimiento a 10 Hz produjo dolor severo del pecho por 15 minutos posterior a la duración del experimento y a 25 Hz causó sangrado gastrointestinal que persistió por varios días. Estas afecciones pueden no estar representadas adecuadamente en la literatura científica ya que se les considera casos individuales en vez de afectaciones grupales. La naturaleza y extensión de las afecciones dependen de la postura, la susceptibilidad individual y el tipo de estímulo (vibración continua o sacudida) (Griffin,1990).

A.2. Mareo

El transporte de personas a través de medios terrestres, aéreos y marítimos ha suscitado un fenómeno recurrente: el mareo. Este trastorno se caracteriza por una secuencia de síntomas que van desde la palidez y la sudoración inicial hasta las náuseas y los vómitos posteriores. La sensación de desequilibrio y malestar puede ser desencadenada por diversos

factores, como los movimientos bruscos, la falta de ventilación adecuada o la exposición a condiciones climáticas adversas. Esta reacción fisiológica, aunque incómoda, es una respuesta natural del organismo ante la percepción de un conflicto sensorial entre los sistemas de equilibrio y orientación como se explica en la figura 22.

Sintomatología. El vómito es el inconveniente mayor del mareo, pero no es el primer efecto, ni el más común de los síntomas y tampoco es necesariamente el más importante. Cuando los síntomas empiezan, aparece el bostezo, irregularidad respiratoria, bochornos, mareos, somnolencia, palidez, piloerección, sudoración, dolor de cabeza, etc.

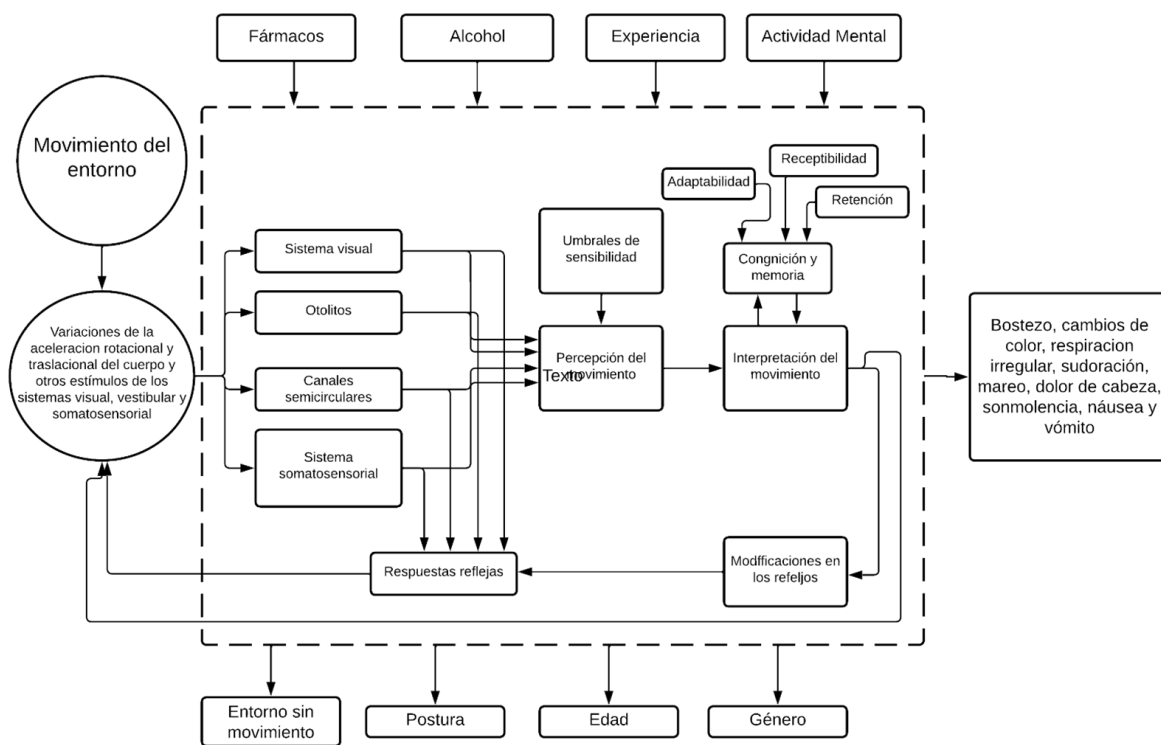


Figura 22: Modelo conceptual de los factores involucrados en causar mareo. Tomado de Griffin,1990

Algunos ejemplos de ambientes, actividades o dispositivos que pueden causar mareo son: botes, barcos, submarinos, nadar, montura de animales, simuladores, helicópteros, aviones, carros, autobuses, trenes, tanques, rotaciones sobre el eje vertical, estimulación Coriolis, oscilación traslacional de baja frecuencia.

Sistema vestibular. El sistema vestibular consiste en dos órganos vestibulares: uno loca-

lizado dentro del oído interno en pequeñas cavidades llamadas laberintos óseos, las cuales consisten en tres partes : cóclea (el órgano de la audición), los canales semicirculares (involucrados en la percepción de los movimientos rotacionales de la cabeza) y un vestíbulo central (que contiene el utrículo y el sáculo que perciben las fuerzas de traslación de la cabeza). Hay un laberinto membranoso dentro del laberinto óseo en el cual hay un fluido llamado perilinf. Hay tres canales semicirculares dentro de cada oído, los canales anterior y posterior son ortogonales entre sí, el canal lateral es ortogonal a los otros 2. Cualquier desviación en la posición de los canales causa una disfuncionalidad que causa mareo. (fig.23)

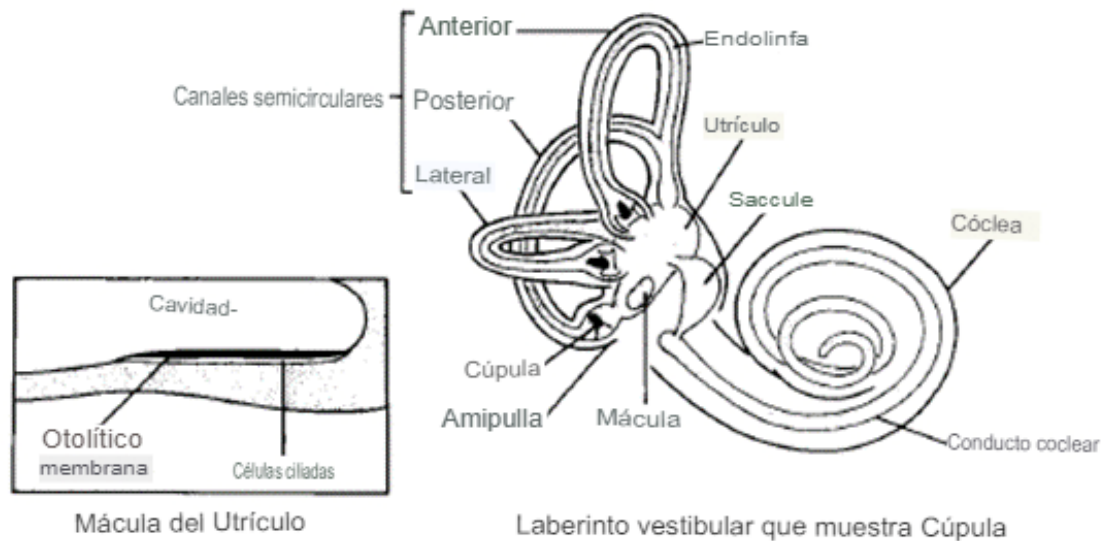


Figura 23: Sistema vestibular.
Tomado de Griffin,1990

B. Ejes de medición

Los sistemas basicéntricos son más convenientes para mediciones prácticas puesto que, son conjuntos de ejes ortogonales que se utilizan como referencia para describir la posición y orientación de objetos en el espacio tridimensional. Estos sistemas se definen mediante tres ejes perpendiculares entre sí, denominados comúnmente como X, Y, Z. En este contexto:

- El eje X se extiende horizontalmente de izquierda a derecha.

- El eje Y se extiende horizontalmente de adelante hacia atrás.
- El eje Z se extiende verticalmente hacia arriba y hacia abajo.

La figura ilustra cómo el sistema basicéntrico es útil para medir la exposición a la vibración en personas sentadas por la simetría de los planos sagital y frontal del cuerpo humano. En este ejemplo de la figura 24 y tabla 3 hay seis ejes ortogonales en el asiento (tres traslacionales y tres rotacionales), tres ejes de traslación en el respaldo y tres ejes de traslación en los pies.

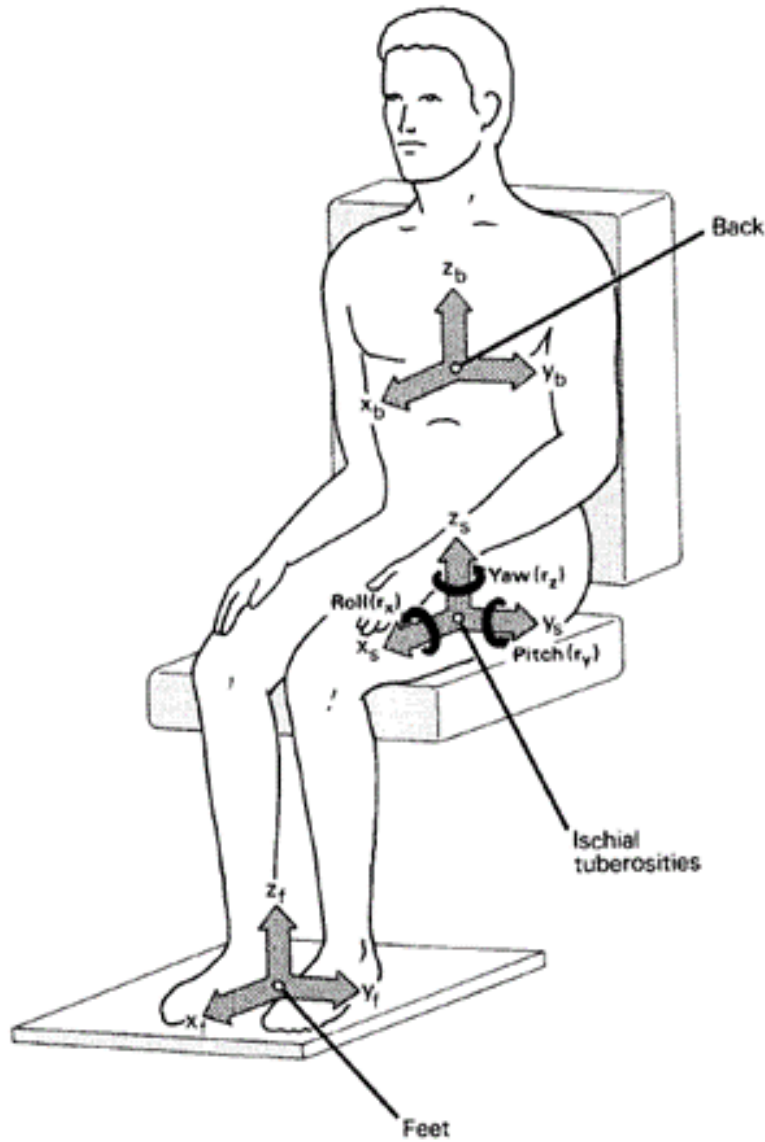


Figura 24: Sistema basicéntrico de 12 ejes.

Tabla 1: Notación usado para referirse a los ejes de vibración con respecto al cuerpo.

Notación	Descripción	Otro término en uso	Para personas sentadas
Traslación			
Eje X	De adelante hacia atrás atrás y adelante	(Transversal) (Longitudinal) (Hacia la columna vertebral/pecho)	Adelante y hacia atrás
Eje Y	Derecha a izquierda	Lado a lado (transversal) (Hombro a hombro) (derecha a izquierda)	Lateral
Eje Z	Pies a cabeza	Sobreaceleración (longitudinal) (Vertical) (Hacia la cabeza/coxis)	Vertical
Rotacional			
rx	Rotación en el eje x	Girar	El movimiento rotacional siempre produce algún desplazamiento en todos los puntos más que en el centro. En un cuerpo rígido la rotación es la misma en todos los puntos
ry	Rotación en el eje y	Inclinación	
rz	Rotación en el eje z	Quijada	

C. Ponderaciones

C.1. Resumen de filtro RC

Antes de presentar las curvas de ponderación y funciones de peso es necesario retomar algunos conceptos básicos para poder entender estos conceptos. Se puede tomar el siguiente ejemplo de un sistema RC. Un filtro muy simple es aquel que consta de una resistencia y un capacitor como se muestra en la siguiente figura:

Y se puede entender de la siguiente manera:

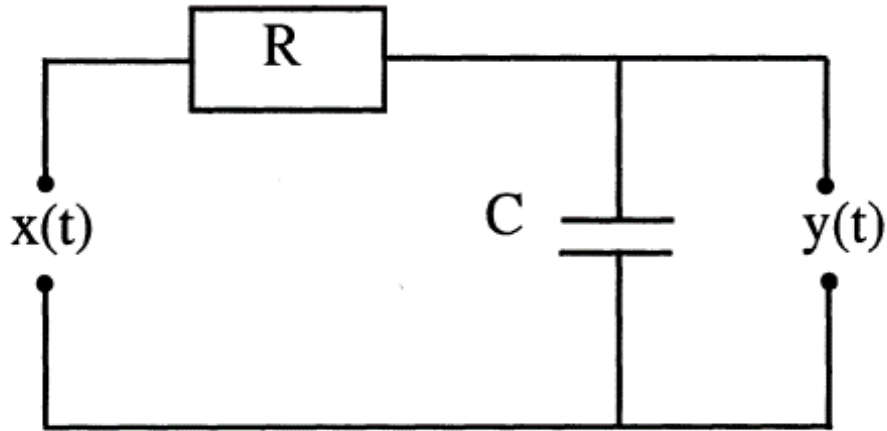


Figura 25: Diagrama de un circuito RC.



Figura 26: Función de transferencia de un filtro RC.

Esto es, si aplicamos una diferencia de potencial en la terminal izquierda del circuito, una corriente I recorrerá el circuito a través del resistor R y del capacitor C . El voltaje medido en el resistor será RI y si medimos la diferencia de potencial en el extremo derecho, el balance total estará descrito por la siguiente ecuación:

$$RI(t) + y(t) = x(t) \quad (1)$$

Donde la corriente es modulada por la capacitancia de la siguiente manera:

$$I(t) = C\dot{y}(t) \quad (2)$$

Y si juntamos las dos ecuaciones queda la siguiente ecuación:

$$RC\dot{y}(t) + y(t) = x(t) \quad (3)$$

Esta ecuación diferencial lineal describe el sistema antes mencionado. Y si obtenemos una solución cuando $x(t) = 0$ tenemos que:

$$y(t) = -\frac{1}{RC}e^{-t/RC} \quad (4)$$

Pero qué pasa cuando no nos encontramos en el tiempo igual a cero. Para resolver esta incógnita debemos recurrir a la transformada de Fourier que nos permite reconstruir una función mediante sus armónicos en condiciones generales. Si realizamos la transformada de Fourier para resolver esta incógnita podemos tomar las soluciones siguientes en el dominio de la frecuencia:

$$y(t) = A_0e^{j\omega t} \quad (5)$$

$$\dot{y}(t) = j\omega A_0e^{j\omega t} \quad (6)$$

Y si combinamos estas soluciones en la tercera ecuación obtenemos:

$$A_0e^{j\omega t}(RCj\omega + 1) = A_i e^{j\omega t} \quad (7)$$

$$\frac{A_0}{A_i} = \frac{1}{RCj\omega + 1} = T(j\omega) \quad (8)$$

Este último resultado es la respuesta en frecuencia. Esta ecuación también puede ser resuelta en el dominio de Laplace, teniendo así su función de transferencia y la posibilidad de poder representar el sistema definido en el dominio de la frecuencia mediante sus polos y ceros. Por lo que, pese a cambiar de dominio o representación, es el mismo sistema con el que se está tratando.

C.2. Ponderación Wb

Wb (fig. 27) es una curva de ponderación de frecuencia utilizada en la norma británica BS6841 para evaluar la exposición humana a la vibración en edificios. La curva Wb se basa en la sensibilidad del cuerpo humano a la vibración en diferentes frecuencias en dirección vertical.

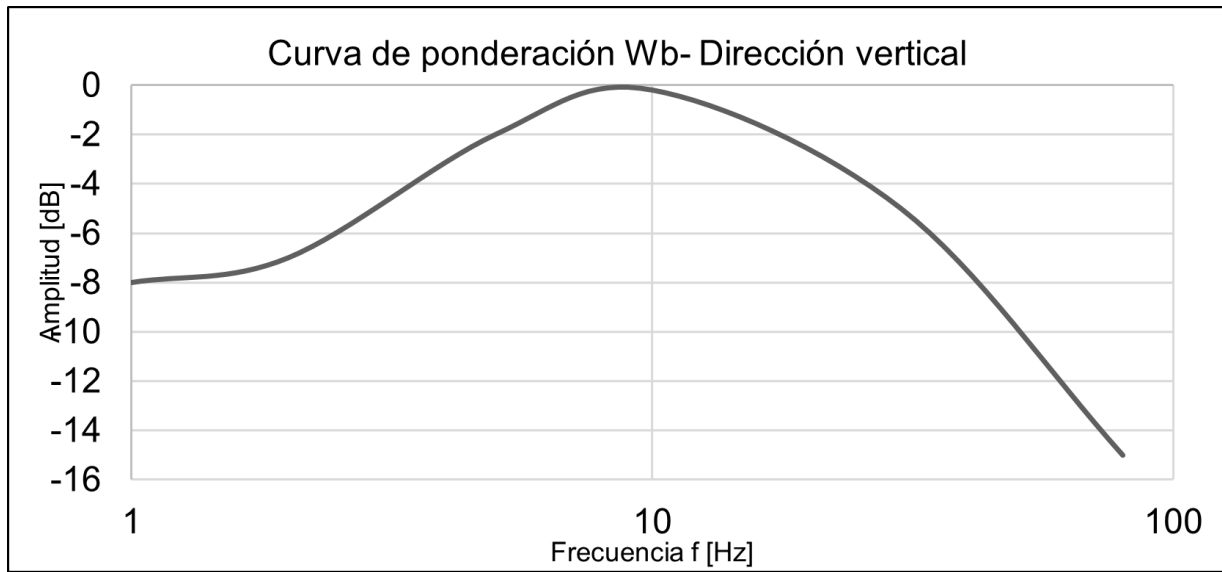


Figura 27: Curva de ponderación Wb.

La función total de transferencia $H_T(s)$ está definida por:

$$H_T(s) = H_B(s)H_{w_1}(s) \tag{9}$$

Las funciones de transferencia $H_b(s)$ y $H_{w_1}(s)$ toman los coeficientes de la siguiente tabla:

Tabla 2: Coeficientes de la ponderación Wb definidos en la BS 6841

Ponderación	Ancho de banda			Pesado							
	f_1	f_2	Q_1	f_3	f_4	f_5	f_6	Q_2	Q_3	Q_4	K
Wb	0.4	100	0.71	16	16	2.5	4	0.55	0.9	0.95	0.4

C.3. Ponderación Wc

Wc (fig.28) es la curva de ponderación de frecuencia utilizada en la norma británica BS6841 y la ISO 2631-1 para evaluar la exposición humana a la vibración en edificios en dirección horizontal.

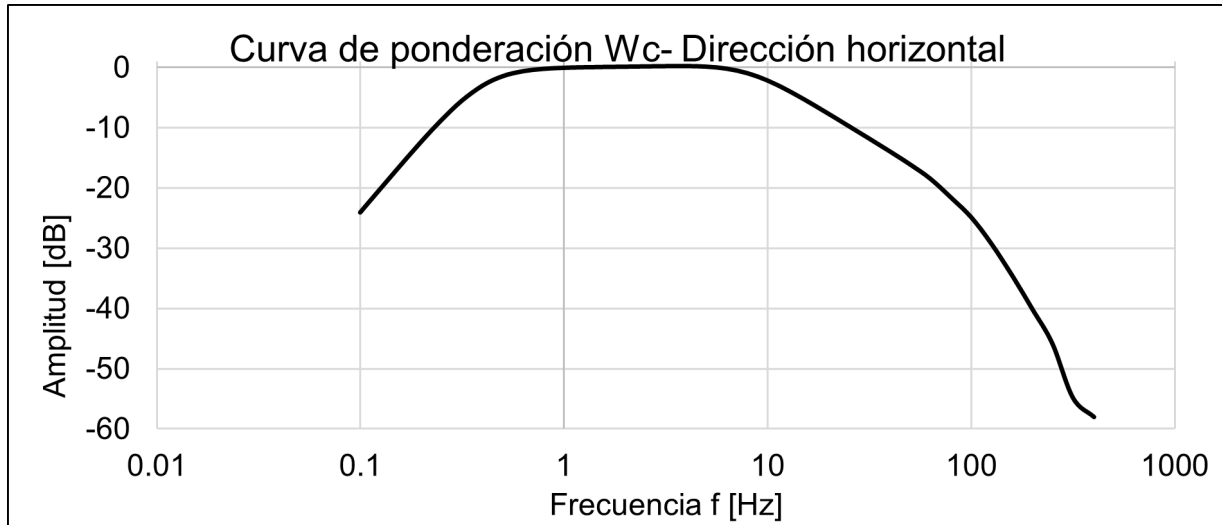


Figura 28: Curva de ponderación Wc.

La función total de transferencia $H_T(s)$ está definida por:

$$H_T(s) = H_b(s)H_{w_1}(s)H_h(s)H_l(s)H_t(s) \tag{10}$$

Las funciones de transferencia toman los coeficientes de las siguientes tablas:

Tabla 3: Coeficientes de la ponderación Wc definidos en la ISO 2631

Ponderación	Ancho de banda		Trans. a-v		Continuación ascendente				
	f_1	f_2	f_3	f_4	Q_4	f_5	Q_5	f_6	Q_6
Wc	0.4	100	8	8	0.63	∞	-	∞	-

Tabla 4: Coeficientes de la ponderación W_c definidos en la BS 6841

Ponderación	Ancho de banda			Pesado							
	f_1	f_2	Q_1	f_3	f_4	f_5	f_6	Q_2	Q_3	Q_4	K
W_c	0.4	100	0.71	8	8	-	-	0.63	-	-	1

C.4. Ponderación W_d

W_d (fig. 29) es la curva de ponderación de frecuencia utilizada en la norma británica BS6841 y la ISO 2631-1 para evaluar la exposición humana a la vibración en edificios en dirección vertical.

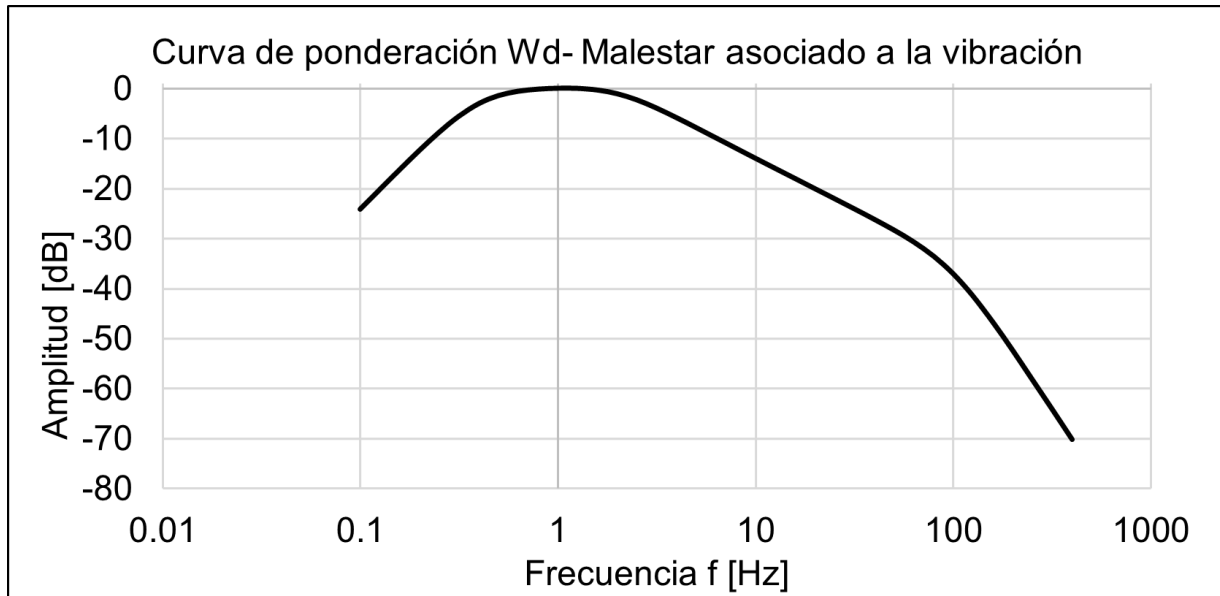


Figura 29: Curva de ponderación W_d .

La función total de transferencia $H_T(s)$ está definida por:

$$H_T(s) = H_b(s)H_{w_1}(s)H_h(s)H_l(s)H_t(s) \tag{11}$$

Las funciones de transferencia toman los coeficientes de las siguientes tablas:

Tabla 5: Coeficientes de la ponderación Wd definidos en la ISO 2631

Ponderación	Ancho de banda		Trans. a-v		Continuación ascendente				
	f_1	f_2	f_3	f_4	Q_4	f_5	Q_5	f_6	Q_6
Wd	0.4	100	2	2	0.63	∞	-	∞	-

Tabla 6: Coeficientes de la ponderación Wd definidos en la BS 6841

Ponderación	Ancho de banda			Pesado							
	f_1	f_2	Q_1	f_3	f_4	f_5	f_6	Q_2	Q_3	Q_4	K
Wd	0.4	100	0.71	2	2	-	-	0.63	-	-	1

C.5. Ponderación We

We (fig. 30) es la curva de ponderación de frecuencia utilizada en la norma británica BS6841 y la ISO 2631-1 para evaluar la exposición humana a la vibración en edificios, en superficies de asientos en dirección r_x, r_y, r_z rotaciones en personas sentadas.

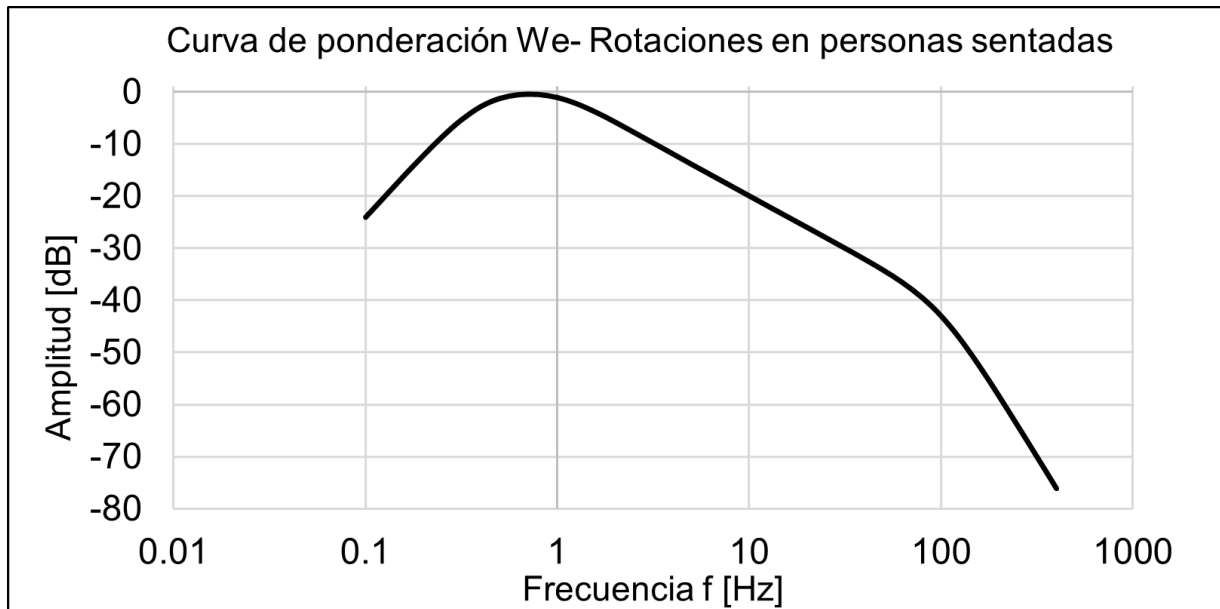


Figura 30: Curva de ponderación We.

La función total de transferencia $H_T(s)$ está definida por:

$$H_T(s) = H_b(s)H_{w_1}(s)H_h(s)H_l(s)H_t(s) \tag{12}$$

Las funciones de transferencia toman los coeficientes de las siguientes tablas:

Tabla 7: Coeficientes de la ponderación We definidos en la ISO 2631

Ponderación	Ancho de banda		Trans. a-v		Continuación ascendente				
	f_1	f_2	f_3	f_4	Q_4	f_5	Q_5	f_6	Q_6
We	0.4	100	1	1	0.63	∞	-	∞	-

Tabla 8: Coeficientes de la ponderación We definidos en la BS 6841

Ponderación	Ancho de banda			Pesado							
	f_1	f_2	Q_1	f_3	f_4	f_5	f_6	Q_2	Q_3	Q_4	K
We	0.4	100	0.71	1	1	-	-	0.63	-	-	1

C.6. Ponderación Wf

Wf (fig. 31) es la curva de ponderación de frecuencia utilizada en la norma británica BS6841 y la ISO 2631-1 para evaluar la exposición humana a la vibración en edificios en dirección vertical.

La función total de transferencia $H_T(s)$ está definida por:

$$H_T(s) = H_b(s)H_{w_1}(s)H_h(s)H_l(s)H_t(s) \tag{13}$$

Las funciones de transferencia toman los coeficientes de las siguientes tablas:

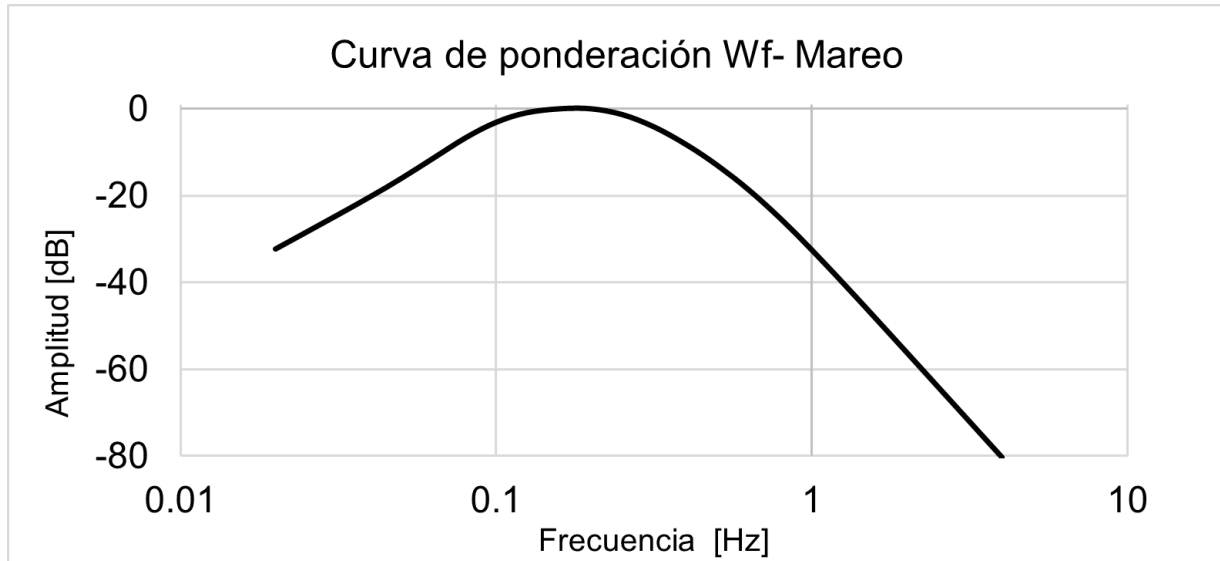


Figura 31: Curva de ponderación Wf.

Tabla 9: Coeficientes de la ponderación Wf definidos en la ISO 2631

Ponderación	Ancho de banda		Trans. a-v		Continuación ascendente				
	f_1	f_2	f_3	f_4	Q_4	f_5	Q_5	f_6	Q_6
Wf	0.08	0.63	∞	0.25	0.86	0.0625	0.8	0.1	0.8

Tabla 10: Coeficientes de la ponderación Wf definidos en la BS 6841

Ponderación	Ancho de banda			Pesado							
	f_1	f_2	Q_1	f_3	f_4	f_5	f_6	Q_2	Q_3	Q_4	K
Wf	0.08	0.063	0.71	Z	0.25	0.0062	0.1	0.86	0.8	0.8	0.4

C.7. Ponderación Wg

Wg (fig. 32) es la curva de ponderación de frecuencia utilizada en la norma británica BS6841 para evaluar la exposición humana a la vibración en edificios. La curva Wg se basa en la sensibilidad del cuerpo humano y a la interferencia en actividades: comer, leer, escribir, beber, etc.

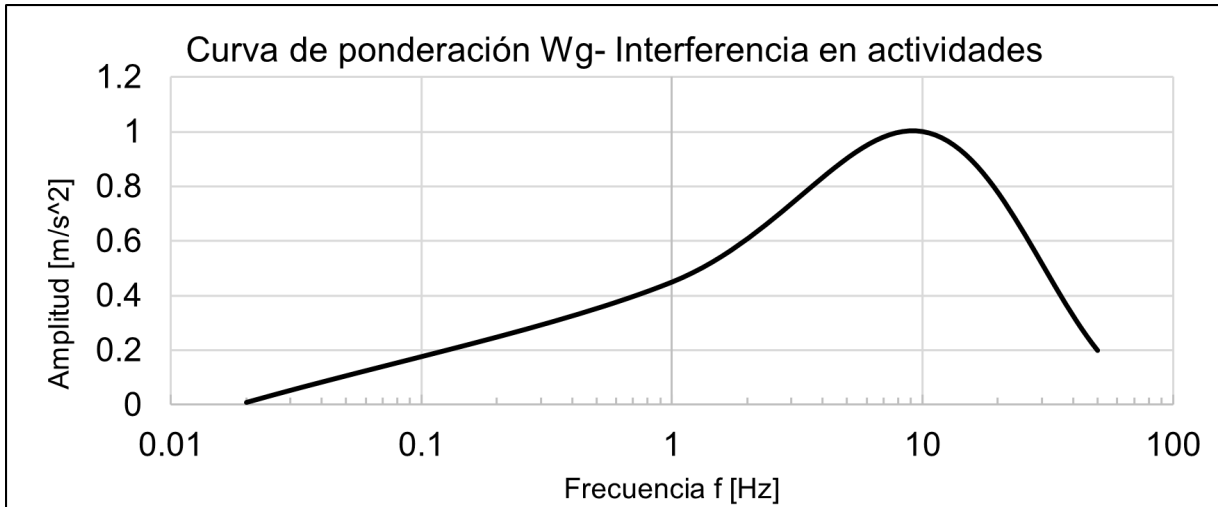


Figura 32: Curva de ponderación Wg.

La función total de transferencia $H_T(s)$ está definida por:

$$H_T(s) = H_b(s)H_{w_1}(s) \tag{14}$$

Las funciones de transferencia toman los coeficientes de la siguiente tabla:

Tabla 11: Coeficientes de la ponderación Wg definidos en la BS 6841

Ponderación	Ancho de banda			Pesado							
	f_1	f_2	Q_1	f_3	f_4	f_5	f_6	Q_2	Q_3	Q_4	K
Wg	0.08	100	0.71	1.5	5.3	0	-	0.86	-	-	0.42

C.8. Ponderación Wh

Wh (fig. 33) es la curva de ponderación de frecuencia utilizada en la norma ISO 5349 para evaluar la exposición a la vibración mano-brazo asociados con la vibración transmitida a través de herramientas manuales o mangos de maquinaria. Se centra en las frecuencias que pueden causar molestias, entumecimiento y posibles lesiones en el sistema mano-brazo.

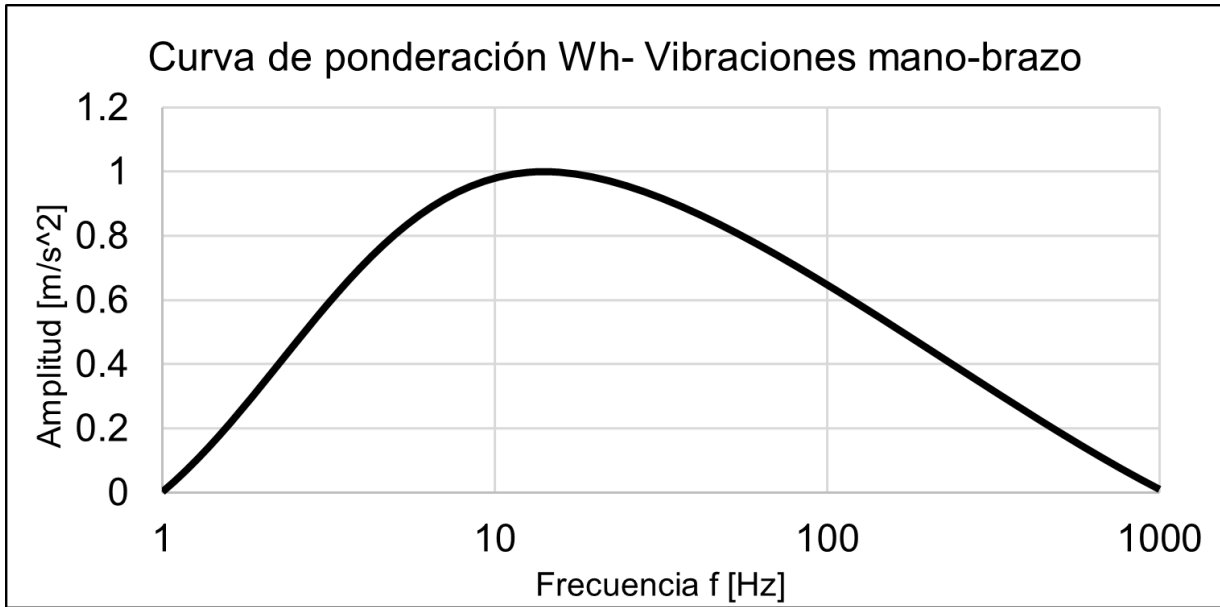


Figura 33: Curva de ponderación Wh.

La función total de transferencia $H_T(s)$ está definida por:

$$H_T(s) = H_b(s)H_{w_1}(s) \tag{15}$$

Las funciones de transferencia toman los coeficientes de la siguiente tabla:

Tabla 12: Coeficientes de la ponderación Wh definidos en la BS 6841

Ponderación	Ancho de banda			Pesado							
	f_1	f_2	Q_1	f_3	f_4	f_5	f_6	Q_2	Q_3	Q_4	K
Wh	6.31	1258	0.71	15.91	15.91	0	-	0.64	-	-	1

C.9. Ponderación Wj

Wj (fig. 34) es la curva de ponderación de frecuencia utilizada en la norma ISO 2631 para evaluar la exposición a las vibraciones en la cabeza.

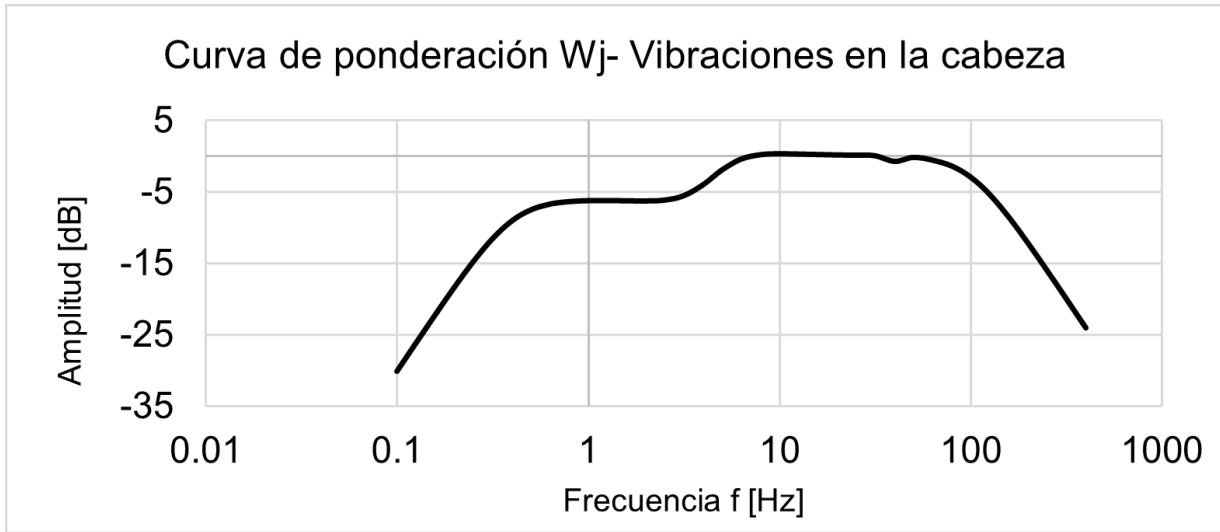


Figura 34: Curva de ponderación Wj.

La función total de transferencia $H_T(s)$ está definida por:

$$H_T(s) = H_h(s)H_l(s)H_s(s) \tag{16}$$

Las funciones de transferencia toman los coeficientes de las siguientes tablas:

Tabla 13: Coeficientes de la ponderación Wj definidos en la ISO 2631

Ponderación	Ancho de banda		Trans. a-v		Continuación ascendente				
	f_1	f_2	f_3	f_4	Q_4	f_5	Q_5	f_6	Q_6
Wj	0.4	100	∞	∞	-	3.75	0.91	5.32	0.91

C.10. Ponderación Wk

Wk (fig. 35) es otra curva de ponderación de frecuencia utilizada en la norma ISO 2631-1 para evaluar la exposición humana a la vibración en edificios. La curva Wk se basa en la sensibilidad del cuerpo humano a la vibración en superficies de asientos en dirección vertical-z.

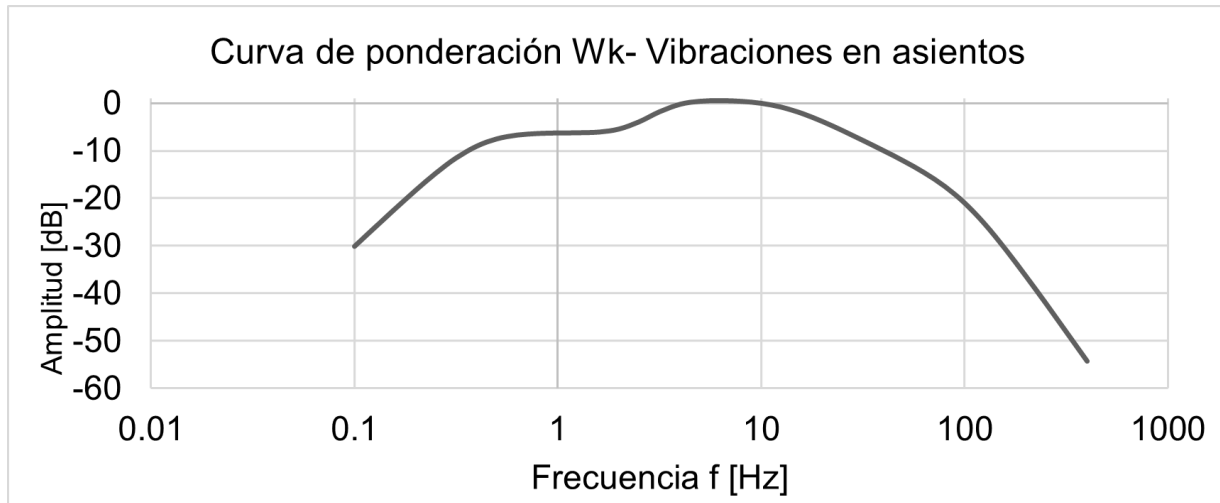


Figura 35: Curva de ponderación Wk.

La función total de transferencia $H_T(s)$ está definida por:

$$H_T(s) = H_h(s)H_l(s)H_t(s)H_s(s) \tag{17}$$

Las funciones de transferencia toman los coeficientes de la siguiente tabla:

Tabla 14: Coeficientes de la ponderación Wk definidos en la ISO 2631

Ponderación	Ancho de banda		Trans. a-v		Continuación ascendente				
	f_1	f_2	f_3	f_4	Q_4	f_5	Q_5	f_6	Q_6
Wk	0.4	100	12.5	12.5	0.63	2.37	0.91	3.35	0.91

C.11. Ponderación Wm

Wm (fig. 36) es la curva de ponderación de frecuencia utilizada en la norma británica 6841 para evaluar los riesgos para la salud asociados con la vibración vertical en edificios, especialmente aquellos que afectan al cuerpo humano sentado, de pie o recostado.

La función total de transferencia $H_T(s)$ está definida por:

$$H_T(s) = H_h(s)H_l(s)H_t(s)H_s(s) \tag{18}$$

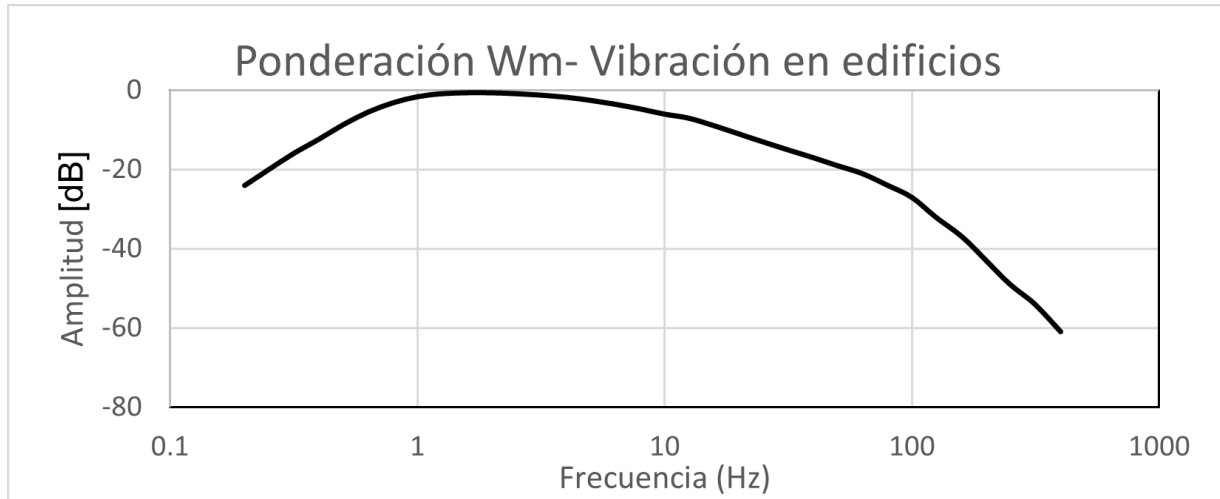


Figura 36: Curva de ponderación Wm.

Las funciones de transferencia toman los coeficientes de la siguiente tabla:

Tabla 15: Coeficientes de la ponderación Wm definidos en la ISO 2631

Ponderación	Ancho de banda		Trans. a-v		Continuación ascendente				
	f_1	f_2	f_3	f_4	Q_4	f_5	Q_5	f_6	Q_6
Wm	0.7943	100	5.68	6.684	0.5	-	-	-	-

C.12. Función de transferencia $H_{Bnom}(f)$ para registros de velocidad

Para el caso de la norma DIN 4150, se tiene la siguiente ponderación (fig.37) descrita en la norma DIN 45669-1. Esta función de transferencia se distingue por ser una combinación de un filtro de características pasa altas y pasa bajas de dos polos Butterworth, teniendo como frecuencias de corte .8(-3 dB) y 100(-3 dB) Hz para el filtro pasa altas y pasa bajas, respectivamente. Este filtro está descrito en el dominio de la frecuencia de la siguiente manera:

$$H_{Bnom}(jf) = \frac{1}{1 - j\frac{5.6}{f}} \frac{1}{\left[1 - j\sqrt{2}\left(\frac{0.8}{f}\right) - \left(\frac{0.8}{f}\right)^2\right] \left[1 + j\sqrt{2}\left(\frac{0.8f}{f_{max}}\right) - \left(\frac{0.8f}{f_{max}}\right)^2\right]} \quad (19)$$

Y su representación gráfica es la siguiente:

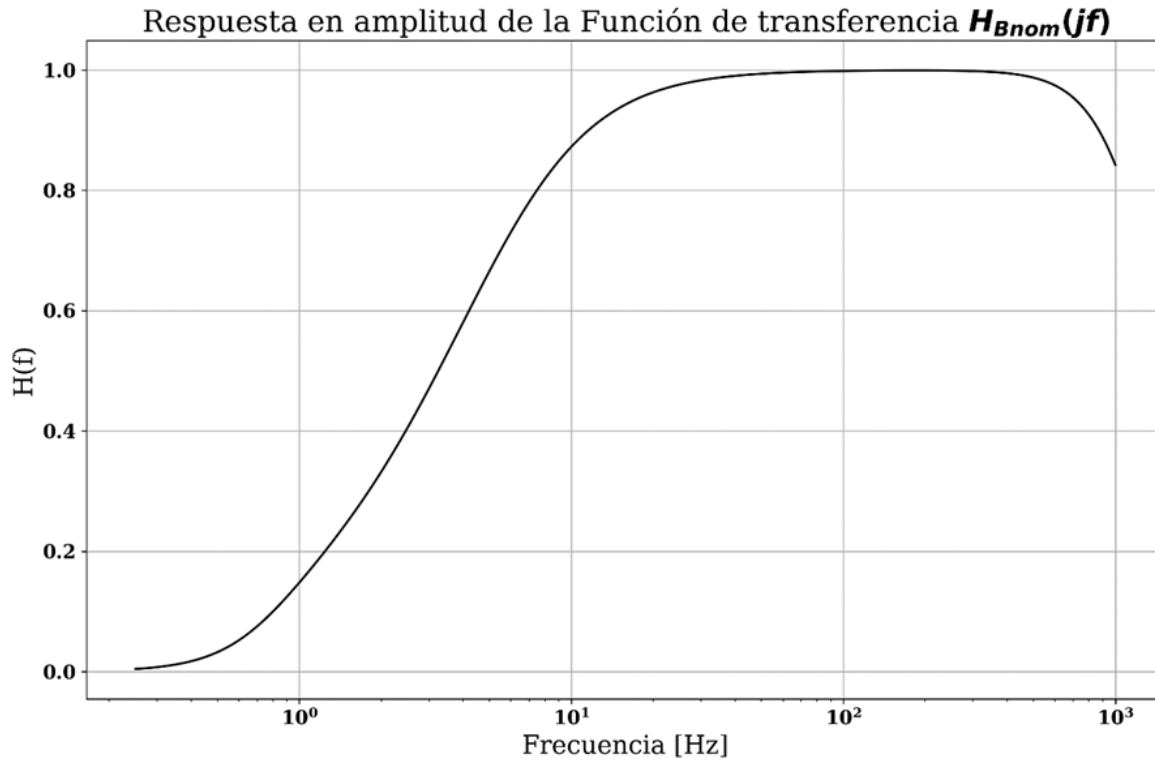


Figura 37: Amplitud nominal para el filtro HBnom

D. Filtros

Las funciones de peso son factores que se utilizan para ajustar la medida de la vibración en función de la frecuencia y la duración de la exposición, que forman las curvas de ponderación W 's(tabla 3.8). Se usan en la evaluación de la vibración de cuerpo entero como para las manos y brazos. Las funciones de frecuencia se utilizan para tener en cuenta la sensibilidad variable del cuerpo humano. Las funciones de peso se explican con detalle

en el apéndice C.

Las funciones de peso se utilizan en la evaluación de la vibración para:

- Ajustar la medida de la vibración de acuerdo con la frecuencia y la duración de la exposición.
- Determinar si la vibración es aceptable o no para un entorno específico.
- Comparar la severidad de la vibración con diferentes niveles de referencia.
- Evaluar la necesidad de medidas de control para reducir la vibración.

Se utilizó la transformada bilineal para implementar las funciones de peso. La transformada bilineal es una técnica matemática utilizada para transformar sistemas continuos en tiempo (como filtros analógicos) a su equivalente discreto en el tiempo (filtros digitales). La transformada bilineal mapea la variable compleja s del dominio continuo (dominio de Laplace) a la variable z del dominio discreto (dominio Z).

$$Y(z) = H(z)X(z) \quad (20)$$

$H(z)$ puede ser expresada como:

$$H(z) = \frac{\sum_{i=0}^M b_i z^{-i}}{1 + \sum_{i=1}^N a_i z^{-i}} \quad (21)$$

Donde a_i y b_i son coeficientes; M y N es el número de polos y ceros respectivamente.

Su expresión equivalente en el dominio del tiempo es:

$$y(t_i) = \sum_{k=0}^M b_k x(t_{i-k}) - \sum_{j=1}^N a_j y(t_{i-j}) \quad (22)$$

Donde $x(t_i)$, $y(t_i)$ son la señal de entrada y salida, respectivamente, muestreada a un tiempo t_i .

Esta transformación se realiza mediante una función matemática específica. La función de

transformación bilineal más común se define como:

$$z = \frac{1 + \frac{sT}{2}}{1 - \frac{sT}{2}} \quad (23)$$

Donde:

z es la variable del dominio Z (frecuencia digital)

s es la variable del dominio continuo (frecuencia analógica)

T es el periodo de muestreo del sistema digital (tiempo entre muestras)

En la evaluación de registros de aceleración, se combinan las funciones de peso de la norma británica BS 6841 y la ISO 2631-1 de acuerdo con la tabla 16:

Tabla 16: Combinación de filtros de la norma británica BS 6841 y la norma internacional ISO 2631 para las ponderaciones.

Filtro	Tipo	Función	Función de transferencia
$H_b(s)$	Pasa banda	Permite el paso en un rango específico de frecuencias	$\frac{s^2 4\pi^2 f_2^2}{(s^2 + \frac{2\pi f_1}{Q_1} s + 4\pi^2 f_1^2)(s^2 + \frac{2\pi f_2}{Q_1} s + 4\pi^2 f_2^2)} \quad (24)$
$H_{w1}(s)$	Pesado	Ajusta la sensibilidad relativa de una señal a diferentes frecuencias	$\frac{(s + 2\pi f_3)}{(s^2 + \frac{2\pi f_4}{Q_2} s + 4\pi^2 f_4^2)} \cdot \frac{2\pi K f_4^2}{f_3} \quad (25)$
$H_{w2}(s)$	Pesado	Ajusta la sensibilidad relativa de una señal a diferentes frecuencias	$\frac{(s + 2\pi f_3)(s^2 + \frac{2\pi f_5}{Q_3} s + 4\pi^2 f_5^2)}{(s^2 + \frac{2\pi f_4}{Q_2} s + 4\pi^2 f_4^2)(s^2 + \frac{2\pi f_6}{Q_4} s + 4\pi^2 f_6^2)} \cdot \frac{2\pi K f_4^2 f_6^2}{f_3 f_5^2} \quad (26)$
$H_h(s)$	Butterworth pasa altas	Permite el paso de frecuencias por encima de un punto de corte	$\frac{1}{1 + \frac{\omega_1}{Q_1 s} + \left(\frac{\omega_1}{s}\right)^2} \quad (27)$
$H_l(s)$	Butterworth pasa bajas	Permite el paso de frecuencias por debajo de un punto de corte	$\frac{1}{1 + \frac{s}{Q_2 \omega_2} + \left(\frac{s}{\omega_2}\right)^2} \quad (28)$
$H_t(s)$	Transición aceleración-velocidad	Utilizado para convertir la señal de aceleración registrada por un acelerómetro en una señal de velocidad	$\frac{(1 + s/\omega_3)K}{1 + s/(Q_4 \omega_4) + (s/\omega_4)^2} \quad (29)$
$H_s(s)$	Continuación ascendente	Resalta componentes de alta frecuencia	$\frac{1 + s/(Q_5 \omega_5) + (s/\omega_5)^2}{1 + s/(Q_6 \omega_6) + (s/\omega_6)^2} \cdot \left(\frac{\omega_5}{\omega_6}\right)^2 = \frac{Q_6}{Q_5} \quad (30)$

E. Descriptores

E.1. Factor de Cresta (FC)

El Factor de Cresta (FC) es una medida que nos permite entender la relación entre los valores pico y los valores de aceleración r.m.s. (a_w) en una forma de onda. Esto nos brinda información sobre la presencia de picos o transitorios en la señal en comparación con su amplitud general. El cálculo del Factor de Cresta se realiza dividiendo el valor pico (V_p) entre el valor de aceleración r.m.s. (a_w) de la forma de onda, esto se expresa como:

$$CF = \frac{V_p}{a_w} \quad (31)$$

Donde:

V_p es el valor máximo de la señal dentro de una ventana de tiempo dada.

A_w es el valor de aceleración r.m.s. de la señal

E.2. Aceleración r.m.s. (a_w)

La aceleración r.m.s. ponderada ofrece una manera de expresar la magnitud general de la aceleración en una señal, considerando tanto los valores positivos como los negativos. La aceleración media cuadrática ponderada r.m.s se calcula mediante la siguiente ecuación integral:

$$a_w = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt} \quad (32)$$

Donde: $a_w(t)$ es la aceleración ponderada en tiempo en metros por segundo al cuadrado $[\frac{m}{s^2}]$.

T es la duración de la medición en segundos.

Esta ecuación integra los cuadrados de los valores de aceleración r.m.s. en el tiempo y luego toma la raíz cuadrada del promedio de estos valores cuadráticos. Al hacerlo, ob-

tenemos una medida que representa la magnitud promedio de la aceleración en la señal, considerando tanto los valores positivos como los negativos.

E.3. Aceleración operante lenta ($A_w(t_0)$)

La aceleración operante lenta ponderada se utiliza para capturar eventos transitorios y choques ocasionales en la señal de vibración, empleando una constante de tiempo de integración corta para ponderar adecuadamente los valores de la señal en función del tiempo. Se define como lenta porque se considera un $\tau = 1$ segundo; pero ésta también puede tomar valores de 0.125, 0.3, 0.5 y 3 segundos. La expresión matemática que describe el cálculo de la aceleración operante lenta ponderada se define en la norma ISO 8041 y se expresa de la siguiente manera:

$$a_{w,\tau}(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{\xi}^t a^2(\xi) e^{\frac{t-\xi}{\tau}} d\xi} \quad (33)$$

Donde:

$a_w(t)$ es la aceleración de frecuencia ponderada instantánea

τ es el tiempo de integración para el promedio operante

ξ es el tiempo (variable de integración)

t_0 es el tiempo de observación (instantáneo)

El argumento dentro de la función exponencial $e^{\frac{t-\xi}{\tau}}$ en la ecuación $a(w, \tau)(t)$ representa el factor de atenuación exponencial que se aplica a cada punto de la señal de aceleración $a_w(\xi)$ en función del tiempo t y del tiempo anterior ξ , en relación con una constante de tiempo de integración τ .

- $(t - \xi)$: Esta parte de la expresión representa la diferencia de tiempo entre el tiempo actual t y el tiempo anterior ξ . Mide cuánto tiempo ha pasado desde el punto en el que se está evaluando la integral hasta el punto en el que se tomó la medición anterior.

- τ : Es la constante de tiempo de integración. Esta constante determina la rapidez con la que disminuye la influencia de las mediciones anteriores a medida que pasa el tiempo.

En resumen, el argumento del exp dentro de la integral exponencial en la ecuación $a(w, \tau)(t)$ controla cómo se ponderan y combinan las mediciones anteriores de aceleración en función del tiempo transcurrido y de la constante de tiempo de integración. Esto ayuda a capturar la evolución temporal de la señal de vibración y a calcular una medida adecuada de la aceleración operante lenta.

E.4. MTVV

El valor de vibración transitoria máxima (MTVV) se utiliza para definir la magnitud de la vibración en una señal de forma transitoria. Se obtiene encontrando el máximo valor de la aceleración operante lenta ponderada durante el período de medición. En otras palabras, el MTVV representa el punto máximo de la magnitud de la vibración en la señal durante el intervalo de tiempo observado de $a_w(t_0)$ definida por:

$$MTVV = \max(a_w(t_0)) \quad (34)$$

E.5. EMA- Evaluating Moving Average

El "evaluating moving average" (EMA, por sus siglas en inglés) es un tipo de promedio móvil utilizado en el análisis técnico de datos financieros. El EMA asigna pesos decrecientes a los puntos de datos más antiguos en el período, lo que le permite responder más rápidamente a los cambios recientes en los datos. Esta técnica se usó para calcular el máximo en cada ventana de 1 segundo de la aceleración operante lenta, promediando los MTVV de cada evaluación de severidad en cada ventana. El cálculo del EMA implica los siguientes pasos:

1. Calcular el factor de suavizado (Smoothing Factor, SF), que es un número que determina cuánto peso se le da a los datos más recientes. El SF se calcula utilizando

la fórmula:

$$SF = \frac{2}{N + 1} \quad (35)$$

Donde N es el número de períodos para los cuales se está calculando el EMA. Calcular el EMA inicial (EMA0), utilizando el primer valor de aceleración registrado en la serie temporal.

2. Para calcular el EMA actual (EMAt), aplicar la fórmula

$$EMAt = (Aceleracinactual - EMAt - 1) * SF + EMAt - 1, \quad (36)$$

Donde .Aceleración actual.^{es} el valor de aceleración más reciente registrado en el tiempo t, .^{EMAt-1}.^{es} el EMA calculado en el período anterior y SF es el factor de suavizado calculado en el paso 1.

E.6. Nivel de Aceleración (Lw)

Este es el nivel de potencia acústica ponderada en frecuencia, expresado en decibeles (dB). Representa la medida del nivel de intensidad de la vibración de la aceleración experimentada por un objeto o sistema en una escala logarítmica. El nivel de potencia acústica proporciona una medida de la energía total radiada por la vibración está dado por:

$$L_w = 20 \log\left(\frac{a_w(t)}{a_0}\right) [dB] \quad (37)$$

Donde:

$a_w(t)$ es la aceleración ponderada en tiempo en metros por segundo al cuadrado $[\frac{m}{s^2}]$.

$a_0(t)$ es una aceleración de referencia donde es igual a 10 $[\frac{m}{s^2}]$.

E.7. Valor de Dosis de Vibración (VDV)

Los métodos de cuarta potencia, o "Fourth-power methods" (r.m.q.) en inglés, fue desarrollado por Griffin y Whitham (1980a,b) como una alternativa para evaluar movimientos con un alto factor de cresta. Algunos estudios han encontrado que el valor de dosis de vibra-

ción (VDV) proporciona la mejor predicción de la severidad de los choques, especialmente cuando estos tienen diversas duraciones y magnitudes ya que proporciona la probabilidad de comentarios adversos a la vibración durante un período de tiempo específico. El valor de dosis de vibración se calcula considerando la magnitud de las vibraciones y la duración de la exposición en metros por segundo al cuadrado $[\frac{m}{s^2}]$.

$$VDV_{day/night} = \sqrt[4]{\int_0^T a^4(t) dt} \tag{38}$$

Donde T es el tiempo de exposición

$a(t)$ es la aceleración ponderada

VDV no proporciona una medida directa de los efectos sobre la salud, pero se utiliza como una herramienta para comparar y evaluar diferentes niveles de exposición a la vibración y tomar decisiones sobre medidas de control y prevención.

La norma sugiere una tabla con parámetros de referencia dependiendo de si se realizaron mediciones durante el día (período de 16 hrs) o durante la noche (período de 8 hrs).

Tabla 17: Valores de Valor de Dosis de Vibración(VDV).

Lugar y periodo	Baja probabilidad de comentario adverso $[\frac{m}{s^{1.75}}]$	Posibles comentarios adversos $[\frac{m}{s^{1.75}}]$	Probables comentarios adversos $[\frac{m}{s^{1.75}}]$
Residencial 16 hrs diurnas	0.2-0.4	0.4-0.8	0.8-1.6
Residencial 8 hrs nocturnas	0.1-0.2	0.2-0.4	0.4-0.8

E.8. Severidad de vibración KB_F y evaluación de la severidad de vibración KB_{FTR}

La severidad de vibración KBF está definida como:

$$KB_F = \sqrt{\frac{1}{.125} \int_{\xi}^t e^{-\frac{t-\xi}{.125}} KB^2 d\xi} \quad (39)$$

Permite evaluar un registro de velocidad -en mm/s- pesada (ponderada en el dominio espectral) KB al cuadrado en ventanas rápidas (de aquí el subíndice F de la palabra en inglés fast y su traducción al español rápido) de .125 segundos, moduladas por una exponencial decreciente en cada ventana, esta forma de calcular el promedio de una señal en ventanas también es conocida como RMS ponderada en tiempo real o deslizante. Esto otorga un promedio de la señal en esa ventana de tiempo con énfasis en los nuevos datos que se tienen a la hora de realizar el promedio sin dejar de tomar en cuenta información pasada.

Por otro lado la evaluación de la severidad de vibración KBFTR definida como:

$$KB_{FTr} = KB_{FTm} \sqrt{\frac{T_e}{T_d}} \quad (40)$$

Donde T_e y T_d son el tiempo de exposición (tiempo total de registro) y el tiempo de exposición del día contemplado por la norma DIN 4150-2 es decir 16 hrs respectivamente. Este último descriptor depende de otro parámetro. KBFTm es el promedio de los máximos al cuadrado de KBF obtenidos en ventanas de 30 segundos. Y está definida de la siguiente manera:

$$KB_{FTm} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N KB_{FTi}^2} \quad (41)$$

Donde KBFTi son los máximos en ventanas de 30 segundos.

F. Filtro de Tercio de Octava

El filtro de tercia de octava es una herramienta en la análisis de señales, especialmente en el estudio de vibraciones y ruido. Su principal objetivo es dividir el espectro de frecuencias en bandas más estrechas, conocidas como bandas de tercia de octava, lo que permite una evaluación más detallada de la energía contenida en una banda.

Un filtro de tercia de octava separa el espectro de frecuencias en segmentos cuyos anchos son una fracción específica de una octava. Una octava representa un intervalo de frecuencias en el que la frecuencia superior es el doble de la frecuencia inferior. La partición en tercios de octava se caracteriza porque cada banda tiene un ancho proporcional a su frecuencia central, lo que se puede expresar matemáticamente mediante la relación:

$$f_{c,n} = f_{c,0} \times 2^{\frac{n}{3}} \quad (42)$$

Donde: $f_{c,n}$ es la frecuencia central de la n-ésima banda de tercia de octava

$f_{c,0}$ es la frecuencia central de una banda de referencia

n es un número entero que indica la posición de la banda. El uso de filtros de tercia de octava tiene varias ventajas en el análisis de señales:

- Resolución de Frecuencia: Proporciona una alta resolución en las frecuencias bajas, lo que es crucial para analizar fenómenos que ocurren en estos rangos, como el ruido de baja frecuencia y las vibraciones estructurales.
- Uniformidad Perceptual: La percepción humana del sonido y las vibraciones es aproximadamente logarítmica. Por lo tanto, la escala de tercios de octava se alinea más estrechamente con la percepción humana, facilitando la interpretación de los resultados.
- Reducción de Datos: Al condensar el espectro en bandas específicas, se logra una reducción significativa de la cantidad de datos, facilitando el análisis y la visualización de estos.

Para implementar un filtro de tercia de octava, es necesario utilizar una serie de filtros pasabanda, cada uno diseñado para permitir el paso de frecuencias dentro de una banda

de tercia de octava específica y atenuar las frecuencias fuera de esta banda. La salida de cada filtro se utiliza para calcular la energía o potencia contenida en esa banda, que luego puede ser representada en forma de gráfico o analizada para evaluar el nivel de vibración o ruido.

En el contexto de la evaluación de vibraciones en edificaciones, los filtros de tercia de octava son esenciales para identificar las frecuencias dominantes y evaluar su impacto en la estructura y en los ocupantes. Esto es particularmente relevante para cumplir con las normativas internacionales que especifican los niveles máximos permisibles de vibración en función de las bandas de tercia de octava.

G. Corrección instrumental

La corrección instrumental que se lleva a cabo dentro del programa EViiCON, aunado al método convencional (división espectral), se realiza mediante una rutina que usa el sistema definido por polos, ceros, ganancia en el dominio del tiempo. Para lograrlo se utiliza la transformada bilineal descrita más abajo. Algunos conceptos básicos para realizar una corrección instrumental para registros de velocidad se puntualizan a continuación. Un registro de velocidad está compuesto por la convolución de varios factores espectrales diferentes, en Scherbaum (1996) se ofrece la siguiente expresión:

$$S(f) = A(f)I(f)R(f)B(f) \quad (43)$$

Donde $S(f)$ representa el espectro de velocidad observado, $A(f)$ representa los efectos de campo lejano, $I(f)$ la respuesta instrumental, $R(f)$ los efectos de sitio y finalmente $B(f)$ el espectro de atenuación. Para realizar un análisis es prioritario extraer $I(f)$; por lo que la ecuación anterior puede reescribirse de la siguiente manera.

$$S(f) = V(f)I(f) \quad (44)$$

Esta ecuación es semejante a la establecida en Havskov (2010), donde $V(f)$ es la velocidad real del terreno. La extracción de la respuesta instrumental del registro medido comúnmen-

te se calcula mediante una división espectral como ya se ha mencionado. En el dominio de la frecuencia bastaría realizar la operación deconvolución y regresar al dominio del tiempo para tener un registro sin efecto del sensor y además en las unidades correspondientes a velocidad.

$$V(f) = S(f)/I(f) \quad (45)$$

$I(f)$ es un sistema complejo (por tener valores reales e imaginarios) que usualmente viene definido mediante polos, ceros y ganancia que es una representación en términos de los valores que el sistema se hace infinitos (valores de los polos),cero (valores de los ceros) y la ganancia. Estos valores vienen dados en la mayoría de las veces en [Hz] en Transformada de Laplace. Ahora bien, para el cálculo de la ganancia se debe multiplicar:

$$G_{total} = G_{sensor}[V/(m/s)]G_{Cte.Norm}[V/V]G_{Conversor\ A/D}[Cuenta/V] \quad (46)$$

G.1. Corrección instrumental en el dominio del tiempo

Una vez que ya hemos sentado las bases de lo que es la corrección instrumental, y como se lleva a cabo de forma tradicional, plantearemos un camino alterna para conseguir el mismo objetivo sin necesidad de realizar un cambio de dominio. Para lograr este objetivo se hará uso de la transformada bilineal la cual consiste en una aproximar un función de transferencia $T(s)$ como $T(z)$, mediante:

$$T(z) = T(s) \Big|_{s=(\frac{2}{T})\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} \quad (47)$$

Donde T es el periodo de muestreo.

Programando esta ecuación tenemos que:

```
for n in range(len(S)):
    for m in range(len(a)):
        if n - m >= 0:
            filtered_signal[n] += a[m] * S[n - m]
for k in range(1, len(b)):
```

```

if n - k >= 0:
    filtered_signal[n] -= b[k]/b[0] * V[n - k]

```

G.2. Factor de corrección

Entre estos parámetros, la ganancia, la sensibilidad, el voltaje pico a pico y las cuentas/volt son fundamentales para poder escalar los datos a las unidades correspondientes de velocidad o aceleración.

Para los 6TD Se tomaron los valores de las hojas de calibración proporcionadas por la compañía Guralp con los números de serie. FACTOR DE SENSIBILIDAD: 2x1195 V/(m/s)

VALOR DEL CONVERTOR: $20/2^{23}$ (V/cuentas) a $2.3842 \cdot 10^{-6}$

Valor diferencial pico a pico de voltaje: ± 20

Bits N=23 y el bit no.24 es el signo de la señal (+-)

Corrección total por factor

$$(cuentas)(2.3842E-6) \left[\frac{Volt}{cuenta} \right] \frac{1}{2(1195)} \left[\frac{m/s}{Volt} \right] = 9.9421E-10 \left[\frac{m/s}{cuenta} \right] \quad (48)$$

El sismograma debe multiplicarse por el factor $9.9421E-10 \left[\frac{m/s}{cuenta} \right]$ para que se encuentre en unidades de velocidad.