



UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

Facultad de Ciencias de la Ingeniería

Escuela de Ingeniería Acústica

Tesis de Grado Presentada Como
Parte de los Requisitos Para Optar al Grado de
Licenciado en Acústica

**Comprobación de curvas de aceptabilidad por vibraciones
según norma ISO 2631:2-1989 en oficinas adyacentes a salas de
máquinas de edificio Millennium y edificio Bosque Norte**

Profesor Patrocinante:
José Luis Barros
Doctor en Acústica
Universidad Austral de Chile

Miguel Angel Obando Pérez

Valdivia Chile 2002

ÍNDICE

1. RESUMEN	1
2. ABSTRACT	2
3. INTRODUCCIÓN	3
4. OBJETIVOS	5
4.1. Objetivo General	5
4.2. Objetivos Específicos	5
5. ANTECEDENTES	6
5.1 Exposición del hombre a vibraciones	6
5.1.1 Introducción	6
5.1.2 Vibraciones Mano-brazo	6
5.1.3 Vibración globalizada	7
5.1.4 Respuesta humana	7
5.2 Norma ISO 2631-2:1989. Evaluación de exposición humana a vibraciones de cuerpo completo – Parte 2: Vibración continua e inducida por impactos en edificios (1 a 80 Hz).	10
5.2.1. Introducción	10
5.2.2. Alcance y campo de aplicación	10
5.2.3. Características de vibraciones en edificios	11
5.2.3.1 Dirección de la vibración	11
5.2.3.2 Vibración multifrecuencia	11

5.2.3.3	Caracterización de vibración transiente, intermitente y continua con respecto a la respuesta humana.	11
5.2.3.4	Clasificación de edificios y áreas de edificación	12
5.2.3.5	Medición de vibraciones	12
5.2.4.	Caracterización de vibración en edificios en relación a la respuesta humana a vibraciones	13
5.2.4.1	Criterio de magnitud satisfactoria en relación a la respuesta humana	13
5.2.4.2	Curvas base	13
5.2.5.	Anexo A. Información sobre los criterios de Evaluación usados Corrientemente	18
5.3.	Medición de las vibraciones	19
5.3.1.	Principio de funcionamiento	19
5.3.2.	Montajes	20
5.4.	Aislamiento de vibraciones	21
5.4.1.	Conceptos Importantes	21
5.4.2.	Control de Vibración según ASHRAE	23
5.4.3.	Bases de Inercia	29
6.	METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN	31
6.1	Instrumentación	31
6.2	Metodología	31
7.	RESULTADOS	35
7.1	Edificio Millenium	35
7.1.1	Descripción del entorno	35

7.1.2	Especificación de máquinas y aisladores de vibración	38
7.1.2.1	Torres de Enfriamiento	38
7.1.2.2	Chiller	40
7.1.2.3	Bombas	42
7.1.2.4	Ventiladores	43
7.1.2.5	Unidad Manejadora de Aire	44
7.1.3	Resultados Medición Edificio Millenium	45
7.2	Edificio Bosque Norte	47
7.2.1	Descripción del entorno	47
7.2.2	Especificación de máquinas y aisladores de vibración	49
7.2.2.1	Torres de Enfriamiento	49
7.2.2.2	Chiller	52
7.2.2.3	Bombas	54
7.2.2.4	Ventiladores	56
7.2.2.5	Aislación de Vibración de cañerías	57
7.2.3	Resultados Medición Edificio Bosque Norte	59
8	CONCLUSIONES	64
9	REFERENCIAS	66

1. RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo general determinar si los niveles de vibraciones en las oficinas contiguas a las salas de máquinas serán perceptibles o no, según los procedimientos de medición y de recolección de datos descritos en la Norma ISO 2631:2-1989. Por otra parte, constituye un objetivo específico la presentación del control de vibraciones, mirado desde un punto de vista práctico.

En el análisis del presente trabajo nos damos cuenta de la falta de información acerca de la percepción humana sobre vibraciones en ambientes tales como oficinas, los cuales son evaluados generalmente en forma subjetiva. Por otra parte, percibimos un desconocimiento acerca del control de vibraciones, ya que ellos son llevados a cabo más por intuición, o por el legado de trabajos que “*funcionaron*” y se siguió repitiendo la fórmula, mas que de un procedimiento de ingeniería.

Con el fin de recolectar datos y medir perceptibilidad humana por vibraciones según un método normalizado, se llevaron a cabo mediciones en dos edificios que poseen salas de máquinas contiguas a oficinas. De estas mediciones se obtuvo como resultado la comprobación de perceptibilidad en dichas oficinas según la Norma ISO 2631:2-1989. No representando un objetivo específico el análisis de la efectividad o no de la norma.

2. ABSTRACT

Main objective of this thesis is to determine if the levels of vibrations in the contiguous offices to the rooms of machines will be perceived or not, according to the measurements procedures, described in the ISO 2631:2-1989 Standard. On the other hand, a review of the fundamentals of vibration control is presented.

In the references search for this thesis we observe that there is a relative scarcity of information in the literature for human perception of vibrations in environments such as offices, which are generally evaluated in subjective form. In addition, we perceive an ignorance about the control of vibrations, since they are carried out more by a matter of intuition, or of the legacy of works that “*they worked*” and it continued repeating formulae more than an engineering procedure.

To carry out a more objective evaluation, measurements were carry out in two buildings having offices contiguous to machines. The measurements were analized according to the ISO 2631:2-1989 Standard, in order to confirm if the vibration levels are perceived in the offices. However, it is not an study of the effectiveness of the Standard.

3. INTRODUCCIÓN

Las vibraciones en un edificio pueden interferir y afectar las ocupaciones de las personas en muchas formas. El o los efectos dependerán de las características de la vibración y el contexto en el cual las personas las perciban.

Las vibraciones son definidas en términos de su nivel y contenido de frecuencia. Las vibraciones pueden ocurrir simultáneamente en tres ejes, ingresar por varios puntos al cuerpo, y pueden ser de distinta duración.

La Higiene industrial requiere un método para reducir este ambiente complejo y entregar un valor relacionado con los efectos sobre los ocupantes de los edificios.

Entregar predicciones precisas de molestia para individuos es extremadamente difícil de hacer, debido a que estas son altamente dependientes del contexto y se pueden basar en factores tales como: temor, percepción de la fuente, etc., por lo que es más recomendable proporcionar guías generales para conjuntos de habitantes. De esta forma, las predicciones de perturbaciones por vibraciones en edificios se pueden relacionar a “umbrales de percepciones absolutas”.

Es así como se han resumido estudios de respuesta humana a vibración y una aproximación práctica de ellos corresponde a la Norma ISO 2631-2:1989. Dicha norma entrega una guía general sobre respuesta humana a vibraciones en edificios y curvas de ponderación de respuesta de frecuencia en seres humanos, además de entregar los métodos de medición.

La mencionada norma ISO entrega una guía tentativa en su Anexo A, sobre las magnitudes de vibración a las cuales se pueden presentar comentarios adversos, y se definen ajustes y variaciones en función de los usos que se les den a los edificios tales como: oficinas, salas de operaciones, residencias, etc. Se debe aclarar que dicha norma sólo se refiere a percepción táctil y no toma en cuenta percepción auditiva de sonido radiado.

Este trabajo de Tesis entrega informaciones generales acerca de la respuesta humana a vibraciones, el montaje y funcionamiento de acelerómetros, y una breve aproximación al control de vibraciones en un sentido práctico. En el capítulo N° 5 se realiza una exposición de la norma ISO 2631-2:1989. Para poseer una visión precisa del estudio, se detalla en forma clara y objetiva tanto las mediciones como el ambiente en donde se realizaron, cantidad de máquinas, características, montajes antivibratorios utilizados, etc. Finalmente verifico si las vibraciones percibidas en las oficinas son capaces de producir molestia, según ISO 2631-2:1989, en las personas que utilicen las oficinas.

La importancia de los resultados del presente trabajo, radica entre otras cosas, en que se posee un punto de referencia, en relación a las magnitudes de vibración percibidas en oficinas que tienen similares condiciones, y si las magnitudes de las vibraciones se encuentran por debajo de los niveles mínimos de percepción según la Norma ISO 2631-2:1989. Ambos edificios son de reciente construcción y corresponden a la actual línea de diseño de grandes edificios en el país. Además, el trabajo entrega nociones para el control de vibraciones.

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General

Determinar si las vibraciones percibidas en las salas destinadas a oficinas, adyacentes a la sala de máquinas de los edificios Millenium y Bosque Norte, se encuentran por debajo de la curva de aceptabilidad para vibraciones en oficinas, según Norma ISO 2631:2-1989, anexo A.

4.2. Objetivos Específicos

4.2.1. Describir la Norma ISO 2631:2-1989, y su anexo A.

4.2.2. Describir el control de vibraciones realizado en ambos edificios.

4.2.3. Realizar mediciones de vibraciones según Norma ISO 2631:2-1989, en las oficinas adyacentes a la sala de máquinas del edificio Millenium y edificio El Bosque Norte.

4.2.4. Determinar si las magnitudes de vibración medidas en el edificio Millenium y edificio El Bosque Norte son consideradas satisfactorios en relación a la respuesta humana a vibraciones para oficinas, según Norma ISO 2631:2-1989.

5. ANTECEDENTES

5.1. Exposición del hombre a vibraciones.

5.1.1. Introducción.

La exposición a vibraciones se produce cuando se transmite a alguna parte del cuerpo el movimiento oscilante de una estructura, ya sea el suelo, una empuñadura o un asiento. Dependiendo de la frecuencia del movimiento oscilatorio y de su intensidad, la vibración puede causar sensaciones muy diversas que van desde la simple incomodidad hasta alteraciones graves de la salud, pasando por la interferencia con la ejecución de ciertas tareas como la lectura, la pérdida de precisión al ejecutar movimientos o la pérdida de rendimiento debido a la fatiga.

El mayor efecto que se observa en algunos órganos o sistemas del cuerpo humano cuando están expuestos a vibraciones de determinadas frecuencias está relacionado con la frecuencia de resonancia de esos órganos, lo que potencia el efecto de la vibración. Los efectos más significativos que las vibraciones producen en el cuerpo humano son de tipo vascular, osteomuscular (óseo y muscular) y neurológico.

Según el modo de contacto entre el objeto vibrante y el cuerpo, la exposición a vibraciones se divide en dos grandes grupos: vibraciones mano-brazo y vibraciones globales de todo el cuerpo.

5.1.2 Vibraciones mano-brazo.

Generalmente las vibraciones mano-brazo resultan del contacto de los dedos o la mano con algún elemento vibrante (por ejemplo, una empuñadura de herramienta portátil, un objeto que se mantenga contra una superficie móvil o un mando de una máquina). Los efectos adversos se manifiestan normalmente en la zona de contacto con la fuente de vibración, pero también puede existir una transmisión importante al resto del cuerpo. El efecto más frecuente y

estudiado es el Síndrome de Reynaud o “dedo blanco”, de origen profesional e inducido por vibraciones, que tiene su procedencia en alteraciones vasculares.

5.1.3 Vibración globalizada

Las vibraciones globalizadas (Whole Body Vibration, WBV), son transmitidas al cuerpo como un todo, generalmente a través de la estructura soportante, pies, nalgas, espalda, etc. Por ejemplo, una persona que maneja un vehículo está expuesta a una vibración globalizada a través de sus nalgas, y si tiene un soporte para su espalda, también a través de ella. La transmisión de vibraciones globales al cuerpo y sus efectos sobre el mismo dependen de la postura y no todos los individuos presentan la misma sensibilidad. Es por esto que la exposición a vibraciones puede no tener las mismas consecuencias en todas las situaciones.

Entre los efectos que se atribuyen a las vibraciones globales se encuentran, frecuentemente, los asociados a traumatismos en la columna vertebral, aunque normalmente las vibraciones no son el único agente causal. También se atribuyen a las vibraciones efectos tales como dolores abdominales y digestivos, problemas de equilibrio, dolores de cabeza, trastornos visuales, falta de sueño y síntomas similares.

5.1.4 Respuesta humana

La percepción de vibraciones no puede, por sí misma, ser molesta. Una percepción individual de normalidad o anormalidad, puede depender de experiencias previas y expectativas.

Por ejemplo, alguien que vive o trabaje en un edificio de varios pisos, puede ser afectado en menor forma por las vibraciones que aquellas personas que estén a diario en construcciones a nivel del suelo.

Como se menciona en los párrafos anteriores, diversos factores influyen en el nivel de perceptibilidad y el grado de sensibilidad de las personas hacia las vibraciones. Entre los que se cuentan ^[1]:

- Posición del cuerpo humano: Si consideramos el sistema coordenado del cuerpo humano definido en la Figura N° 5.1. En esta figura el eje x define la dirección espalda-pecho, el eje y define la dirección del costado derecho al costado izquierdo, y el eje z define la dirección pies-cabeza o cabeza-nalgas. De acuerdo a la ISO ^[2] el rango de frecuencia de máxima sensibilidad a la aceleración para los seres humanos está entre los 8 a 80 Hz para vibraciones a lo largo del eje z y de 1 a 2 Hz para vibraciones a lo largo del eje x e y . Mientras las vibraciones en el eje z son de mayor importancia en el diseño de oficinas y otros lugares de trabajo, los tres ejes son importantes al momento de diseñar casas u hoteles, en los cuales la comodidad para dormir es algo prioritario.
- Características de la fuente: Amplitud, frecuencia, contenido, duración, etc.
- Tiempo de exposición: Así como lo muestra la Figura N° 5.2, la tolerancia humana disminuye en forma característica con el aumento del tiempo de exposición ^[3].
- Características del sistema del piso: Tales como frecuencia natural (rigidez, masa, etc.), y amortiguación.
- Nivel de atención: El mayor nivel de atención y conocimiento sobre la fuente, como una micro, explosión de dinamita, etc. provocarán menor inquietud por las vibraciones. La ansiedad y disconformidad puede ser reducida si las personas afectadas están concientes de la naturaleza de las vibraciones y están seguras que estas no las pondrán en peligro.
- El tipo de actividad comprometida: El nivel de percepción varía con la naturaleza de la actividad en la cual uno está inserto, tal como trabajo de oficina, construcción, etc.

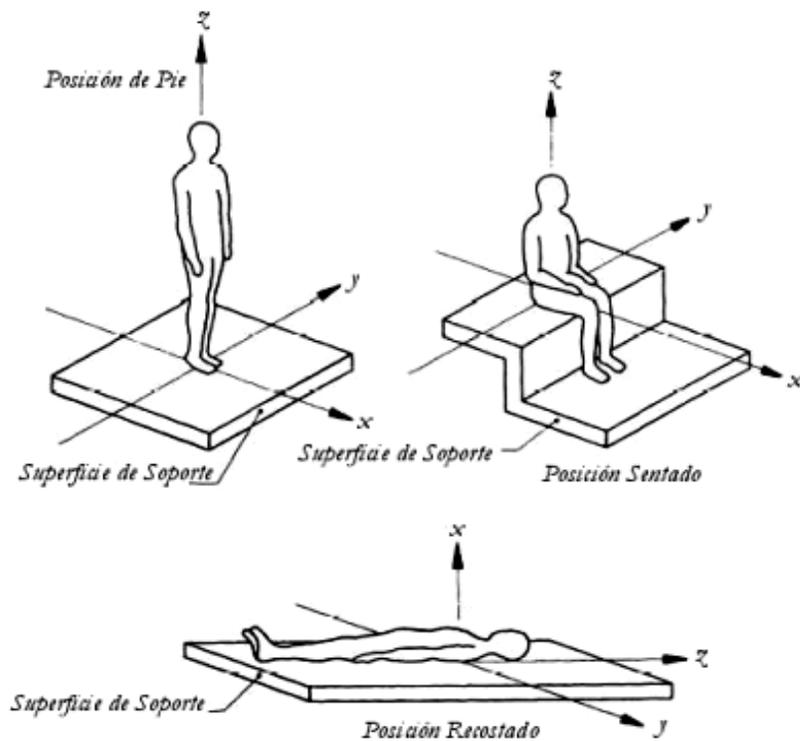


Figura N° 5.1: Sistema coordenado del cuerpo humano.

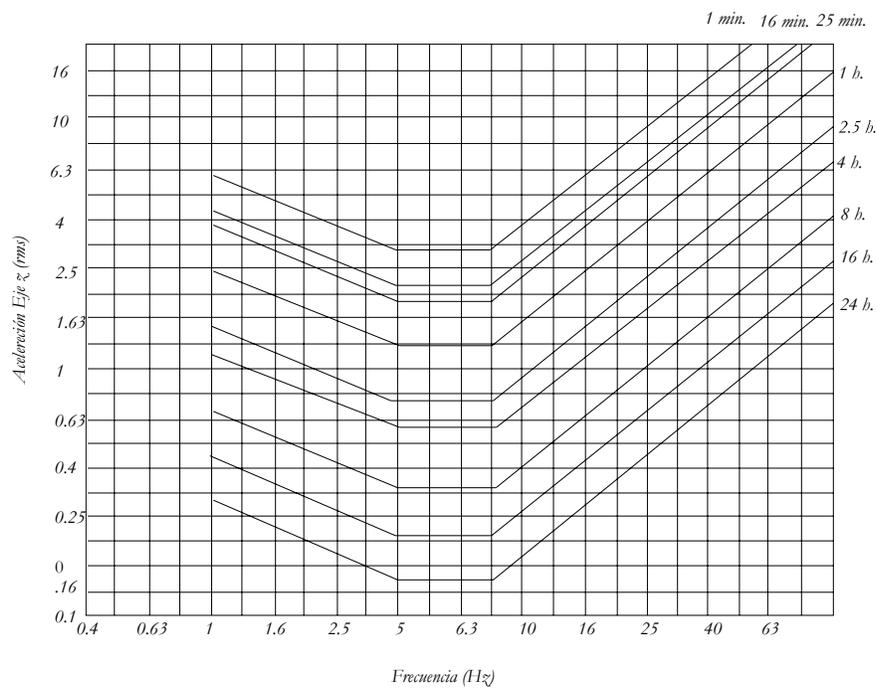


Figura N° 5.2: Límite de aceleración (eje z) longitudinal como una función de frecuencia y tiempo de exposición; Límite de la habilidad reducida por fatiga.

5.2 Norma Internacional ISO 2631-2:1989.

Evaluación de exposición humana a la vibración en cuerpo completa – Parte 2: Vibración continua e inducida por impacto en edificios (1 a 80 Hz).

Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Continuous and shock-induced vibration in buildings (1 to 80 Hz).

5.2.1 Introducción.

Esta normativa ofrece una guía para la aplicación de la Norma ISO 2631-1:1985, para la respuesta humana por vibración en edificios, e incentiva a realizar una recolección uniforme de datos sobre este tema.

No se entrega una guía de niveles de molestia de los ocupantes sujetos a vibraciones o a magnitudes aceptables o límites de vibraciones en edificios, pero contiene curvas ponderadas de respuesta humana a vibraciones.

5.2.2 Alcance y campo de aplicación.

Respecto a la molestia del ser humano a la vibración en edificios, esta norma se limita a las siguientes consideraciones:

- a) Vibración continua: Definida como la vibración que permanece sin interrupción durante el período de tiempo en consideración.
- b) Vibración intermitente: Definida como una cadena de incidentes de vibración, separada por intervalos de tiempo o por vibraciones de menor magnitud.

Se entregan guías sobre respuesta humana a vibraciones en edificios y curvas de ponderación de respuesta en frecuencia para igual molestia, junto con los métodos de medición a utilizarse.

Se hacen consideraciones de la hora del día y del uso del espacio en el edificio, ya sea oficinas, talleres, residencial, teatro o salas de operación u otras áreas críticas.

No se incluyen magnitudes aceptables de vibración en esta parte de la ISO, ya que estas no se pueden especificar categóricamente y dependen de circunstancias específicas. En su defecto, se entrega una guía tentativa en el Anexo A sobre las magnitudes de vibración en las cuales comienzan a aparecer los comentarios desfavorables.

Esta norma no fue diseñada para ser usada como guía en relación a daño estructural del edificio. Solo se refiere con la percepción táctil y no toma en cuenta la percepción auditiva de sonido radiado.

5.2.3 Características de vibraciones en edificios.

5.2.3.1 Dirección de la vibración.

Ya que el edificio puede ser usado para distintas actividades, las vibraciones verticales del edificio pueden ingresar al cuerpo por los distintos ejes (x, y, z), o una combinación de los tres.

La medición de la vibración se debe hacer en el eje apropiado. De no estar claro cual es el correcto, es más conveniente considerar la curva combinada.

5.2.3.2 Vibración multifrecuencia.

Existe evidencia de investigaciones referentes a las vibraciones en edificios para sugerir que hay un efecto de sumatoria de vibraciones de distintas frecuencias. Por lo tanto, para la evaluación de vibraciones para efectos de molestia o confort, se sugiere considerar valores de vibración ponderados, como se describe en la primera parte de esta norma.

5.2.3.3 Caracterización de vibración transiente, intermitente y continua con respecto a la respuesta humana.

La vibración transiente (a veces llamada impulsiva), para el propósito de esta norma se define como un rápido crecimiento, hasta llegar a un peak, seguido por un decaimiento amortiguado que puede o no incluir varios ciclos de vibración (dependiendo de la frecuencia y la

amortiguación). Puede consistir en varios ciclos de aproximadamente la misma amplitud, teniendo en cuenta que la duración debe ser corta (menor a 2 s).

La vibración intermitente es una cadena de sucesos de vibración, todos ellos de corta duración, separados por intervalos de magnitudes de vibración muy bajas.

En esta parte de la norma ISO, la vibración continua es la que permanece ininterrumpida sobre el período de tiempo considerado.

5.2.3.4 Clasificación de edificios y áreas de edificación.

La clasificación con respecto a la respuesta humana debe ser desarrollada solamente sobre la base de la ocupación esperada, las tareas desarrolladas por los ocupantes y de lo libres que se sientan las personas de no percibir vibraciones. Cada sala del edificio debe ser catalogada bajo esta perspectiva.

5.2.3.5 Mediciones de vibración.

El método preferido para evaluar la influencia de vibraciones continuas es determinar el valor r.m.s. de la aceleración ponderado.

Si la posición de los ocupantes con respecto al ambiente vibrante es constante y conocida, se deben usar las funciones de ponderación establecidas para las direcciones x , y , y z . En el caso que la posición del ocupante sea desconocida o variante con respecto a las vibraciones que molestan o interfieren, se debe usar la dirección más severa o una ponderación característica obtenida de la combinación de las tres direcciones. La curva de ponderación combinada viene dada por:

$$Ponderación = \sqrt{1 + (f/5.6)^2}, \quad (5.1)$$

donde f es la frecuencia en Hz.

Las mediciones de vibración deben ser realizadas sobre la estructura que soporta al cuerpo y en el punto en donde ingrese al mismo. Las mediciones deben ser a lo largo de los tres ejes ortogonales y se debe hacer referencia a la curva del eje humano apropiado. Alternativamente, la curva combinada puede ser considerada en relación al peor de los casos.

5.2.4 Caracterización de vibración en edificios en relación a la respuesta humana.

5.2.4.1 Criterio de magnitud satisfactoria en relación a la respuesta humana.

La experiencia ha mostrado en muchos países que las quejas comienzan a aparecer cuando las magnitudes de vibración son levemente superiores a los niveles de percepción. En general, una magnitud de vibración satisfactoria, se relaciona con el mínimo nivel de comentarios adversos, y no está dada por otros factores tales como peligro o eficiencia en el trabajo. En todos los casos prácticos las magnitudes son tales que no hay posibilidad de fatiga u otros síntomas inducidos por vibraciones. Existen situaciones en donde las magnitudes sobrepasan el umbral de percepción, pero pueden ser toleradas, debido a su carácter temporal ya que son eventos de corta duración, construcciones, excavación, etc.

Para situaciones en las cuales las vibraciones se extienden por un gran período, comienza a darse el fenómeno de familiarización, lo que se traduce en cambios favorables hacia las vibraciones.

5.2.4.2 Curvas base.

Las curvas base representan magnitudes de respuesta humana aproximadamente igual con respecto a molestias y/o quejas sobre las interferencias con actividades. Las curvas base para aceleración son dadas en los Gráficos N° 5.1, 5.2 y 5.3.

Las magnitudes de vibración satisfactorias en edificios deben ser especificadas en múltiplos de las magnitudes de las curvas base especificadas a continuación:

- Curva base para vibración de pie a cabeza, eje z : El Gráfico N° 5.1 muestra la curva base para las vibraciones en el eje z , así como en la Tabla N° 5.1 se entregan los valores de aceleración versus frecuencia en banda de tercios de octava. Es muy escaso encontrar quejas o molestias por magnitudes de aceleración bajo la curva.
- Curva base para vibración de lado a lado o de espalda a pecho, eje x o y : El Gráfico N° 5.2 muestra la curva base para las vibraciones en el eje x o y , así como en la Tabla N° 5.1 se entregan los valores de aceleración versus frecuencia en banda de tercios de octava.
- Curva base combinada para ejes indefinidos de exposición humana a vibraciones: En los casos en que en una misma área del edificio sea ocupada por personas en distintas posiciones, se puede aplicar una curva combinada standard, usando el peor caso de las condiciones de los ejes z y x o y . Esta se obtiene usando la respuesta del eje z de 8 a 80 Hz y la respuesta de los ejes x - y de 1 a 2 Hz. Para las frecuencias entre 2 a 8 Hz se realiza una interpolación entre las dos curvas.

Esta curva base combinada se puede utilizar para investigaciones preliminares, con el objeto de decidir si es necesaria una investigación posterior.

El Gráfico N° 5.3 muestra la curva base combinada, así como en la Tabla N° 5.1 se entregan los valores de aceleración versus frecuencia en banda de tercios de octava.

Las magnitudes de aceleración por debajo de las curvas mostradas en las anteriores figuras no se reportan como quejas o sensaciones adversas. Sin embargo, esto último no implica que las quejas o sensaciones molestas comiencen a aparecer una vez que se hayan alcanzado los niveles de magnitud de percepción. Esto va a depender de circunstancias y expectativas.

Frecuencia f Hz	Aceleración (r.m.s) m/s ²		
	Curva Base Gráfico N° 1	Curva Base Gráfico N° 2	Curva Base Gráfico N° 3
1	1×10^{-2}	3.6×10^{-3}	3.6×10^{-3}
1.25	8.9×10^{-3}	3.6×10^{-3}	3.6×10^{-3}
1.6	8×10^{-3}	3.6×10^{-3}	3.6×10^{-3}
2	7×10^{-3}	3.6×10^{-3}	3.6×10^{-3}
2.5	6.3×10^{-3}	4.51×10^{-3}	3.72×10^{-3}
3.15	5.7×10^{-3}	5.68×10^{-3}	3.87×10^{-3}
4	5×10^{-3}	7.21×10^{-3}	4.07×10^{-3}
5	5×10^{-3}	9.02×10^{-3}	4.3×10^{-3}
6.3	5×10^{-3}	1.14×10^{-2}	4.6×10^{-3}
8	5×10^{-3}	1.44×10^{-2}	5×10^{-3}
10	6.3×10^{-3}	1.8×10^{-2}	6.3×10^{-3}
12.5	7.8×10^{-3}	2.25×10^{-2}	7.8×10^{-3}
16	1×10^{-2}	2.89×10^{-2}	1×10^{-2}
20	1.25×10^{-2}	3.61×10^{-2}	1.25×10^{-2}
25	1.56×10^{-2}	4.51×10^{-2}	1.56×10^{-2}
31.5	1.97×10^{-2}	5.68×10^{-2}	1.97×10^{-2}
40	2.5×10^{-2}	7.21×10^{-2}	2.5×10^{-2}
50	3.13×10^{-2}	9.02×10^{-2}	3.13×10^{-2}
63	3.94×10^{-2}	1.14×10^{-1}	3.94×10^{-2}
80	5×10^{-2}	1.44×10^{-1}	5×10^{-2}

Tabla N° 5.1: Aceleración en frecuencias centrales de banda de tercios de octava, para las curvas base mostradas en los Gráficos N° 5.1, 5.2 y 5.3.

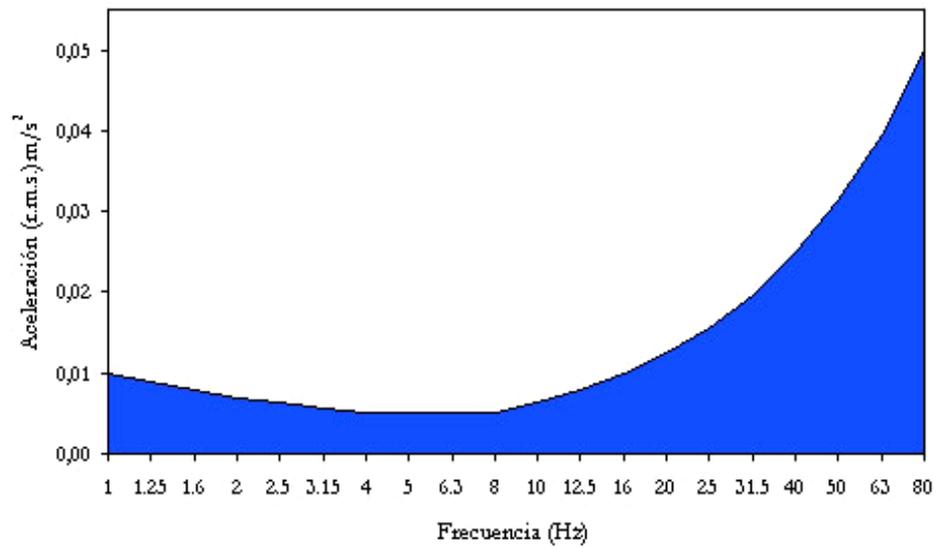


Gráfico N° 5.1: Curva base de eje z para aceleración.

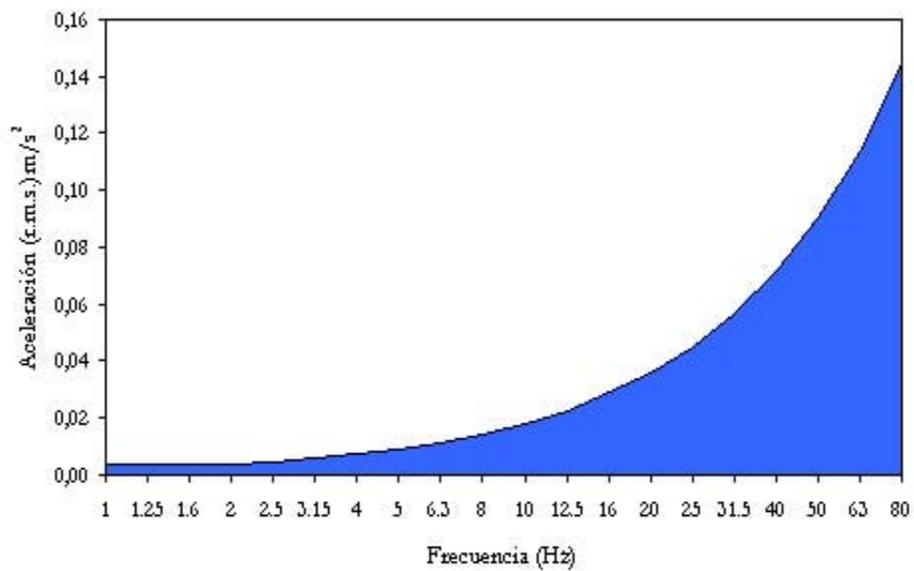


Gráfico N° 5.2: Curva base de ejes x e y para aceleración.

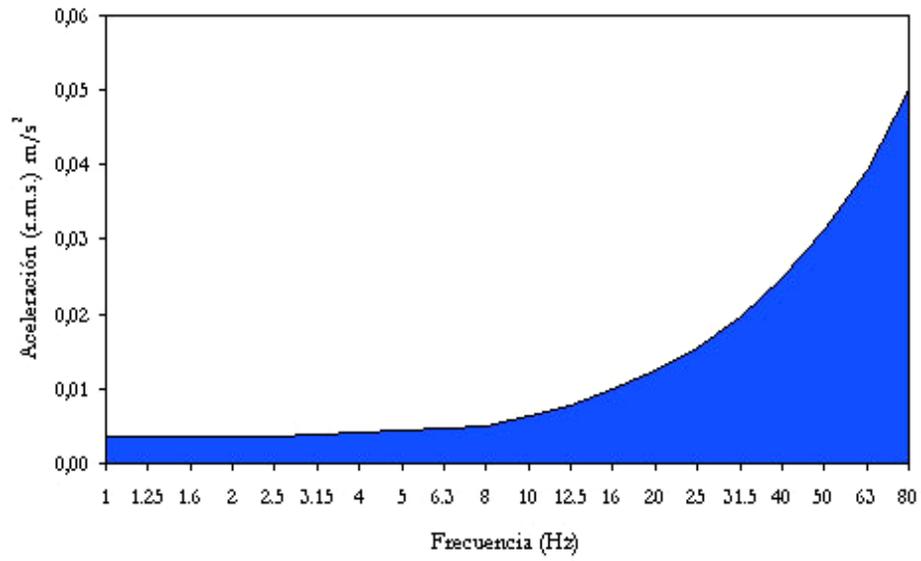


Gráfico N° 5.3: Curva base combinada para aceleración.

5.2.5 Anexo A. Información sobre los criterios de evaluación usados corrientemente.

(Este Anexo no forma parte integral de la Norma)

Los resultados sobre magnitudes de vibraciones en edificios que sean satisfactorias en relación a la respuesta humana a vibraciones se presentan en la tabla N° 5.2.

Lugar	Hora del día	Vibración Intermitente o Continua	Excitación de vibración Transiente con distintas ocurrencias por día
Áreas de trabajo críticas (algunas salas de operación, teatros, laboratorios de precisión, etc).	Día	1	1
	Noche		
Residencial	Día	2 a 4 ⁽¹⁾	30 a 90
	Noche	1,4	1,4 a 20
Oficinas	Día	4 ⁽²⁾	60 a 128
	Noche		
Talleres	Día	8	90 a 128
	Noche		

Tabla N° 5.2: Rangos de factores a multiplicar usados en distintos países para especificar magnitudes satisfactorias de vibraciones en edificios con respecto a la respuesta humana.

¹Dentro de áreas residenciales existirán variadas opiniones en relación a la tolerancia frente a vibraciones. Valores específicos dependerán de factores sociales y culturales, actitudes psicológicas y la interferencia que se prevé en la privacidad del hogar.

² Las magnitudes para vibraciones transientes en oficinas y talleres no se deben incrementar sin considerar la posibilidad de una ruptura significativa de la actividad laboral.

5.3 Medición de las vibraciones.

El instrumento más usado para determinar el movimiento vibratorio de una estructura o cuerpo es un transductor electromecánico. Un transductor es un dispositivo que convierte el movimiento de impacto o la vibración en una señal óptica, mecánica o, más comúnmente eléctrica, que es proporcional a un parámetro del movimiento experimentado.

La vibración puede ser definida en términos de desplazamiento, velocidad o aceleración. Existen transductores que pueden ser usados para medir cada uno de estos directamente. Un acelerómetro produce un voltaje de salida proporcional a la aceleración que experimenta, la cual es proporcional al desplazamiento y al cuadrado de la frecuencia.

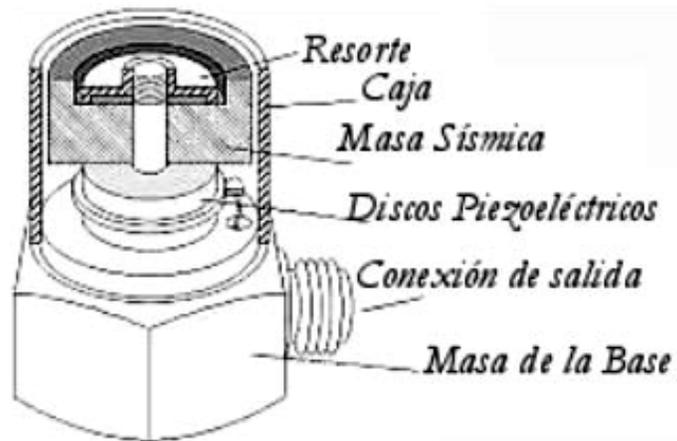


Figura N° 5.3: Acelerómetro piezoeléctrico típico.

5.3.1 Principio de funcionamiento.

La masa sísmica es sujeta a los discos piezoeléctricos, los que actúan como un resorte. El arreglo completo es montado dentro de una caja de metal con una base. Cuando el montaje entero se adhiere al objeto vibrante, el movimiento de la masa, por efecto de la vibración, ejerce una fuerza en los discos piezoeléctricos que es proporcional a la aceleración de la masa. El efecto piezoeléctrico de los discos produce un voltaje el cual es proporcional a la fuerza aplicada y a la aceleración a la cual está expuesta. Este principio de funcionamiento solo se

aplica en cierto rango de frecuencia. Sólo en este rango el efecto piezoeléctrico es proporcional a la fuerza aplicada.

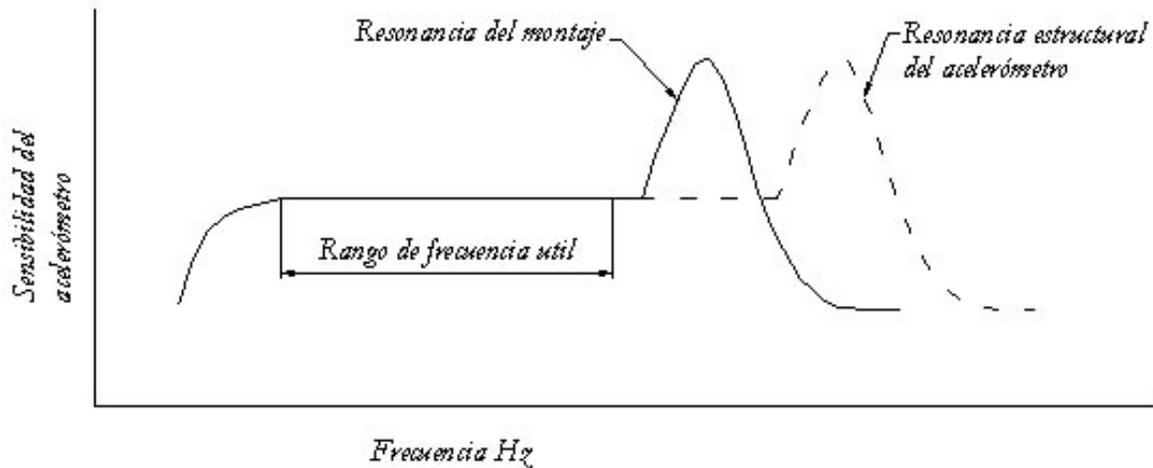


Figura N° 5.4: Respuestas de frecuencia de un transductor.

5.3.2 Montajes.

Existen tres tipos de montaje típicamente usados: montaje de tornillo, magnético y pegamento [4].

- Montaje de tornillo: Este método es el más disponible para aplicaciones de montajes permanentes. Es llevado a cabo por un tornillo o por un bloque adherido a la máquina. Este método permite al transductor medir vibraciones de acuerdo a las especificaciones del fabricante. El límite superior de frecuencia a medir no debe superar en este tipo de montaje a los 10 KHz.
- Montaje por adhesivo: Este método proporciona una sujeción segura sin preparaciones extensas. Sin embargo, este método de montaje reduce el rango la respuesta de frecuencia operacional. Esto se debe a cualidades de amortiguación que posee el pegamento. La limpieza del lugar de medición es de gran importancia por las propiedades de pegamento del adhesivo. El límite superior de frecuencia a medir no debe superar en este tipo de montaje a los 10 KHz.

- Montaje magnético: Este método es típicamente usado para mediciones temporales con un analizador o colector de datos portátil. Este método no es recomendable para monitoreo permanente, ya que el transductor puede ser movido sin advertirlo y las múltiples caras y materiales del magneto pueden interferir o incrementar las señales de alta frecuencia. Además que la superficie de adhesión, metales, restringe aún más su uso. El límite superior de frecuencia a medir no debe superar en este tipo de montaje a los 5 KHz.

5.4 Aislamiento de vibraciones .

5.4.1 Conceptos importantes.

Muchos aspectos sobre este tema se pueden comprender bajo el análisis del modelo clásico: un sistema masa-resorte ideal, el cual se asume lineal, unidimensional y forzado, como el mostrado en la Figura N° 5.5.

En la Figura N° 5.5 podemos observar un sistema de un grado de libertad sin amortiguación, cuando se le aplica una fuerza F a la masa m del sistema.

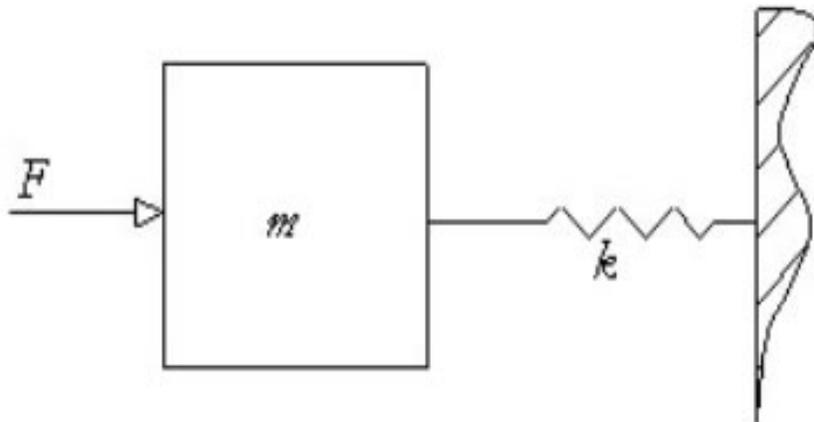


Figura N° 5.5: Sistema de un grado de libertad sin amortiguación, excitado en vibración forzada por fuerzas que actúan sobre la masa.

Si a este sistema se le realiza un control de vibraciones por medio de aisladores, la efectividad del control sobre el sistema se mide por la *Transmisibilidad* T , que se define como la razón de la amplitud en estado estacionario de la fuerza transmitida a través del amortiguador a la amplitud de la fuerza excitadora aplicada a la masa m . En el caso de un sistema de un grado de libertad sin amortiguación, la Transmisibilidad viene dada por ^[3]:

$$T = \frac{1}{1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2} \quad (5.2)$$

Donde

f : Frecuencia excitadora.

f_n : Frecuencia natural del sistema.

En la Figura N° 5.6 podemos observar la Transmisibilidad T como una función de la razón de frecuencias f/f_n (Frecuencia excitadora / Frecuencia natural del sistema).

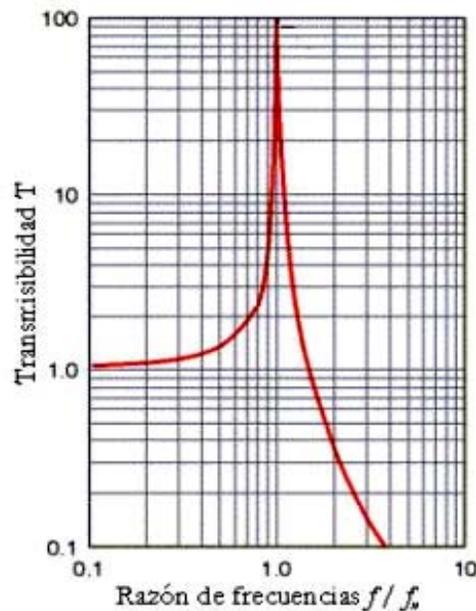


Figura N° 5.6: Transmisibilidad de un sistema amortiguado.

La frecuencia natural f_n , de un sistema de un grado de libertad [†] sin amortiguación es también la frecuencia natural de *resonancia* [‡], la cual esta dada por ^[3]:

[†] Sistema en el cual la posición de la masa puede ser descrita por una sola variable.

[‡] Frecuencia a la cual la respuesta del sistema es máxima.

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [Hz] \quad (5.3)$$

La *deflexión estática* δ_{st} del amortiguador, que representa la desviación de la masa debida a su propio peso esta dado por ^[3] :

$$\delta_{st} = mg/k \quad [m] \quad (5.4)$$

Donde

k : Rigidez del aislador. [N/m]

g : Aceleración de gravedad, 9.8. [kg m/s²]

Reemplazando (5.3) en (5.4), obtenemos la relación entre la deflexión estática y la frecuencia natural del sistema:

$$f_n = 0.5 \sqrt{\frac{1}{\delta_{st}}} \quad [Hz] \quad (5.5)$$

5.4.2 Control de vibración según ASHRAE [†].

Hasta hace muy pocos años las recomendaciones de aislación de equipos de aire acondicionado era una materia de tradición más que de ciencia. Estaba bien establecido en la industria que el corcho era el mejor material para ubicar bajo los equipos de alta velocidad como las bombas y los compresores centrífugos, las bases de goma eran ideales para ventiladores y manejadoras de aire, y los amortiguadores de resorte correspondían a la opción lógica para equipos recíprocos como los compresores.

Este método antiguo de diseño sirvió a su propósito mientras los equipos se instalaban en el sótano o sobre la tierra, o la potencia involucrada era pequeña, o el público no era exigente en materia de confort vibrátil, o que las estructuras de los edificios sigan los patrones de construcción que se mantenían por más de 119 años, en los cuales los pisos eran gruesos, los palmos [‡] eran cortos y no existían divisiones al interior del edificio.

[†] Extracto de un Boletín de Lectura de la ASHRAE.

[‡] Palmo: Ancho del piso o espacios entre las columnas.

Después de la segunda Guerra Mundial, la industria del aire acondicionado tuvo un auge, y edificios completos necesitaban de este. Además se descubrió que espacios que eran destinados a maquinarias, eran rentables, para la venta o arriendo de oficinas o estacionamientos. Ello significó que la maquinaria debió ser trasladada a menudo al penthouse por debajo de las torres de enfriamiento, y sobre las áreas ejecutivas. En muchos casos, ventiladores de presión alta o cajas de presión alta se colocaban adyacentes a oficinas o en los pisos intermedios, con el consecuente problema de vibraciones, lo que se vio aumentado por el cambio de diseño estructural. Los edificios se construyeron mas livianos y los pisos se incrementaron para proporcionar espacios sin obstrucciones (planta libre), destinados a oficinas.

Todo el control de vibraciones se basaba en un ecuación demasiado simplificada(ver ecuación 5.7). Esta ecuación expone que un porcentaje de la vibración de la máquina puede aislarse de la estructura, instalando la máquina que está vibrando a una frecuencia conocida (normalmente la r.p.m. de la máquina), sobre un sistema de montaje antivibratorio que se desea que resuene a una frecuencia mucho menor que la frecuencia excitadora. Cuando la razón de la frecuencia excitadora a la frecuencia natural del sistema está por sobre la razón de 3 a 1, el 90% de la vibración es teóricamente eliminado.

$$E = 1 - T \quad [Hz] \quad (5.6)$$

$$E = 100 * \left[1 - \frac{1}{1 - \left(\frac{f}{f_n} \right)^2} \right] \quad [Hz] \quad (5.7)$$

Donde

E : Porcentaje de vibración aislado.

T : Transmisibilidad.

f : Frecuencia excitadora.

f_n : Frecuencia natural del sistema.

La frecuencia excitadora debe ser tomada ya sea como el r.p.m. del equipo o el motor, cualquiera sea menor, y la frecuencia natural del sistema en Hz es la mostrada en la ecuación N° 5.5, donde δ_s corresponde a la deflexión de los soportes amortiguadores. Esta fórmula sólo

se puede aplicar a montajes que tienen una deflexión estática uniforme sin una amortiguación excesiva.

Debido a esto, todas las compañías publicaron un cuadro de eficiencias como el mostrado en la Figura N° 5.7. Ya que la frecuencia excitadora fue siempre conocida e invariable, uno solo debía establecer la frecuencia natural o resonante para determinar una apropiada selección del montaje.

Si se deseaba proporcionar un 90% de aislación para un compresor que corre a 600 r.p.m. (10 Hz), uno seleccionaba un montaje que tenga sobre 25.6 mm. de deflexión, lo cual debería resultar en una frecuencia natural del sistema de 3.13 Hz. La razón de 3 a 1 fue establecida y el problema solucionado.

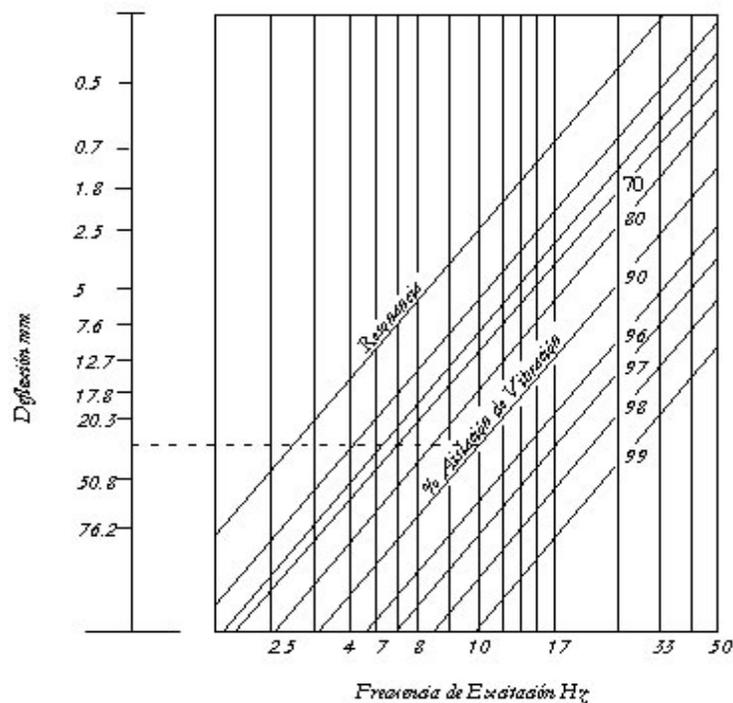


Figura N° 5.7: Cuadro de Eficiencia.

Mientras esta aproximación fue un tremendo salto desde la era oscura, representa sólo el punto de partida, debido a un gran número de razones. Una de ellas era que el requerimiento del 90% no considera la magnitud de la vibración. Mientras el considerar un 90% de eficiencia

para un ventilador pequeño puede ser una exageración, es completamente inadecuado este porcentaje para un gran ventilador que trabaja a altas revoluciones.

Sin embargo, el error más grueso se produce al asumir que la ecuación teórica (ecuación 5.2), se puede aplicar a las estructuras reales. Dicha ecuación asume que la deflexión en el aislador de vibración es extremadamente grande en comparación a la deflexión del suelo, y que el movimiento de la masa del equipo aislado es extremadamente pequeña en comparación a la del piso. Mientras estas suposiciones están cercanas a ser reales en edificios antiguos con equipos pequeños, ellos rara vez son válidos hoy en día. Generalmente, tratamos con sistemas más complicados que el sencillo sistema masa-resorte (ver Figura N° 5.5), en los cuales el piso posee una masa y una deflexión mostrados esquemáticamente en la Figura N° 5.8. Este sistema no puede ser fácilmente analizado en términos de la ecuación N° 5.7.

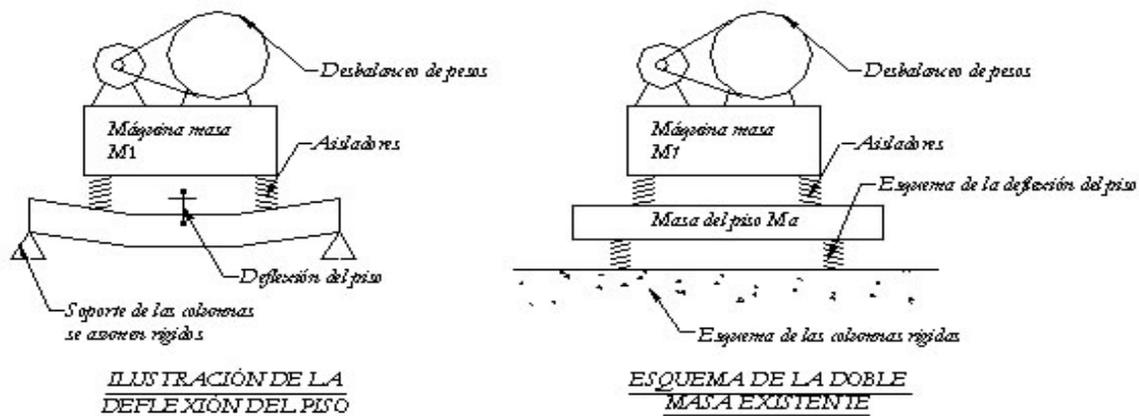


Figura N° 5.8: Sistemas máquina piso.

Figura N° 5.8: Sistemas máquina piso.

Existen ecuaciones más complicadas que se pueden usar para solucionar cualquier problema, y que son útiles cuando se está trabajando en la dirección apropiada o cuando se está desarrollando un nuevo sistema de aislación. En la actualidad no se utiliza esta fórmula, y las proyecciones se realizan en base a experiencias de campo que se han recopilado en tablas, como la que se muestra en la Tabla N° 5.3, en la cual solo debemos conocer un par de datos, como tipo de máquina, ubicación, peso, etc. para especificar los aisladores más adecuados.

Tipo de Equipo	Potencia kw	r.p.m.	Ubicación del equipo											
			Sobre la Tierra			Palmo del piso inferior a 6m.			Palmo del piso entre 6 a 9m.			Palmo del piso entre 9 a 12m.		
			Tipo de base	Tipo de aislador	Mín. Def. mm.	Tipo de base	Tipo de aislador	Mín. Def. mm.	Tipo de base	Tipo de aislador	Mín. Def. mm.	Tipo de base	Tipo de aislador	Mín. Def. mm.
Ventilador de propulsión														
Montado sobre el muro	Todas	Todas	A	1	6.35	A	1	6.35	A	1	6.35	A	1	6.35
Montado sobre el piso	Todas	Todas	A	1	6.35	A	1	6.35	B	4	44.45	D	4	44.45

Donde:

Tipo de Base A: Sin base. El aislante acoplado directamente al equipo.

Tipo de Base B: Estructura en base a rieles de Acero.

Tipo de Base D: Base montada sobre borde.

Tipo de Aisladores 1: Son del tipo cojincillo (Pad), Goma (Rubber) o Fibra de vidrio.

Tipo de Aisladores 4: Aislador de Resorte contenido.

Mín. Def. mm. : Corresponde a la mínima deflexión que debe poseer el aislador, en mm.

Tabla N° 5.3: Extracto de Guía de selección para aisladores de vibración de ASHRAE [5].

En la tabla N° 5.4 se muestra a modo de ejemplo las características del modelo, SL, de un amortiguador marca KINETICS ^[6].

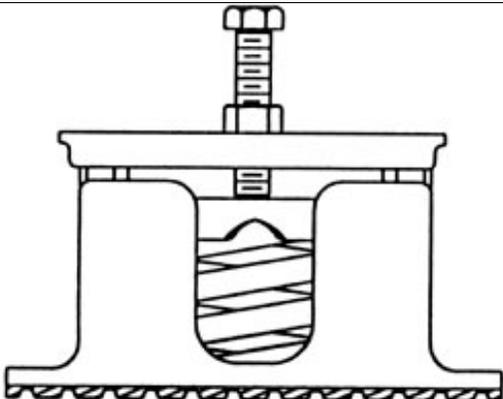
Tipo	Color	Carga kg	Defl. mm †	Amortiguador Modelo SL
SL-35A	Azul	16	39	
SL-70A	Verde	32	35	
SL-120A	Gris	55	30	
SL-220A	Café	100	27	
SL-370A	Naranja	165	25	
SL-500A	Beige	225	25	
SL-600A	Cromo	275	25	
SL-700A	Beige/Blanco	315	25	

Tabla N° 5.4: Tabla de selección de amortiguadores modelo SL 35A/700A.

† Def. mm. : Corresponde a la máxima deflexión del aislador, en mm.

5.4.3 Bases de Inercia.

Una de las formas de montar un equipo es sobre una base de inercia. Estas bases son hechas usualmente de concreto, vaciado dentro de una estructura de acero, con barras de refuerzo. El propósito al instalar una base es:

- i. *Dar mayor estabilidad al sistema.* Muchas veces las ubicaciones posibles para instalar los aisladores de vibraciones se encuentran demasiado cerca una de otra con lo que no se podría conseguir una adecuada estabilidad para el equipo. Una base de inercia amplía el espacio disponible y proporciona una geometría más estable.
- ii. *Bajar el centro de gravedad del sistema.* Montando el equipo sobre una base de concreto se baja substancialmente el centro de gravedad del grupo completo. Esto proporciona mayor estabilidad ampliando el ancho de la base, y también tiene el efecto de reducir la probabilidad de movimientos oscilantes.
- iii. *Dar una mejor distribución del peso de la máquina.* En muchos casos, los elementos de los equipos son más pesados en un extremo que en otro, con lo que se produce una mala distribución de fuerzas estáticas. Instalando un bloque de concreto lo suficientemente pesado, la distribución es más equitativa e incluso se pueden instalar aisladores con una misma característica de peso máximo.
- iv. *Minimizar el efecto de fuerzas externas.* Si bien un bloque de inercia no mejora la Transmisibilidad para una deflexión dada, al aplicar un bloque, los aisladores deberán ser necesariamente más rígidos para cumplir con la misma deflexión y poder soportar el sobre peso de la base. Ello significa que el equipo es menos susceptible a efectos de fuerzas externas.
- v. *Sumar rigidez al equipo.* Una base de inercia puede proporcionar rigidez al equipo, tal como lo hace una base de acero.
- vi. *Reducir problemas debido a modos acoplados.* Sumar una base de inercia tiene el efecto de disminuir la frecuencia natural oscilante lo cual ayuda a evitar el problema.
- vii. *Minimizar los efectos de errores en la posición del centro de gravedad estimado de la máquina.* Cuando se seleccionan los aisladores es necesario calcular la carga total en cada

aislador para seleccionar el aislador adecuado. Esto normalmente se realiza antes de que el equipo este disponible y se deben estimar las posiciones de los distintos centros de gravedad de cada elemento del equipo. Si esta información es imprecisa, las cargas estimadas pueden ser considerablemente distintas de la realidad. Esto provoca aisladores sub- o sobre-cargados, y es mucho mayor el problema en equipos que se instalen con una inclinación notable. Si se usa una base de inercia, el centro de gravedad será conocido, y si la masa del bloque es similar a la del equipo, aún sin una información precisa, las posibles imprecisiones en la estimación final del centro de gravedad son pequeñas. †

viii. *Actuar como una barrera acústica.* Cuando equipos muy ruidosos son instalados directamente sobre el palmo, (piso), las salas ubicadas bajo la máquina pueden presentar altos niveles de ruido. La inserción de un bloque actúa como barrera acústica debido a que posee una densidad de masa mayor a 1 Kg/m^2 .

No se lista disminuir las vibraciones como una razón para instalar bases de inercia, ya que la Transmisibilidad, término proporcional a la eficiencia en la aislación, está determinada por la deflexión estática de los amortiguadores, sin tener en cuenta la presencia o ausencia de una base de inercia [7].

† Existe un método rápido para calcular la distribución de carga, en el cual mediante una plantilla y la ubicación de los centros de gravedad del equipo, se puede calcular la distribución de cargas. [7]

6. METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN

6.1 INSTRUMENTACIÓN.

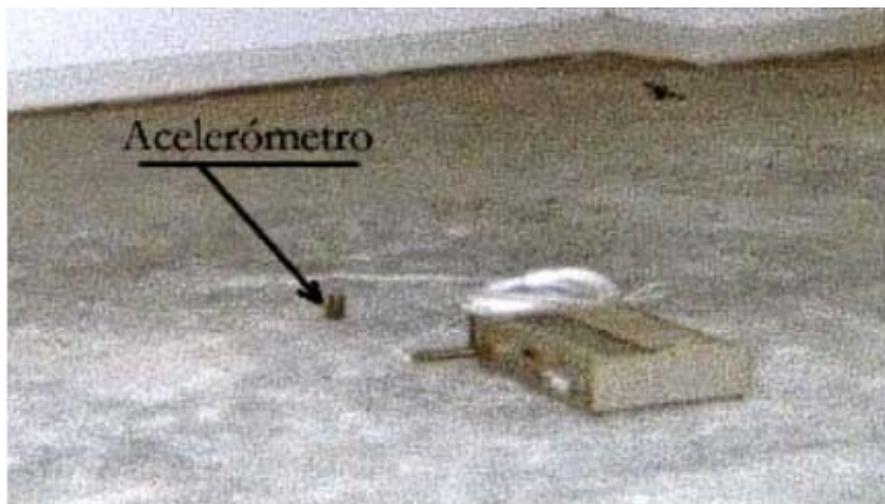
Las mediciones se realizaron con un analizador de ruido y vibraciones en tiempo real marca Larson Davis, modelo 2900B y número de serie 0982.

La señal se capta a través de un acelerómetro marca PCB Piezotronics, modelo 353MI98, y serie P57754. El acelerómetro tiene una sensibilidad de voltaje de 102.00 mv/g. y un rango de frecuencia de 1 a 4 kHz.

6.2 METODOLOGÍA.

La metodología adoptada corresponde a la descrita por la norma ISO 2631:2-1989.

- Tipo de Montaje: El tipo utilizado para realizar las mediciones fue el *adhesivo*, como se muestra en la Fotografía N° 6.1.



Fotografía N° 6.1: Fotografía del tipo montaje utilizado en las mediciones.

- Tiempo de medición: El tiempo abarcó aproximadamente 40 segundos, tiempo en el cual el analizador registró vibraciones en el rango de 0.8 Hz a 20 kHz.

- Lugar de medición: En el edificio Millenium se estableció como lugar de medición al sector más cercano al tabique separador entre la sala de máquinas y el de las oficinas. Por otro lado en el edificio Bosque Norte se escogió como lugar de medición a las oficinas que se encuentra por debajo de la sala de máquinas, en una ubicación más bien central dentro de las mismas. Los lugares exactos de todos los puntos de medición se detallan en el Capítulo Resultados.
- Comprobación de curvas de aceptabilidad por vibraciones: Una vez registrados los niveles por el analizador, estos se deben comparar con los datos respectivos de la Tabla N° 5.1, ponderados en un factor de 4, ya que el sitio de medición corresponde a oficinas.

Ya que los datos proporcionados por el analizador corresponden al Nivel Continuo Equivalente, L_{eq} , los datos de la Tabla 5.1 deben ser traspasados desde r.m.s. a Nivel Continuo Equivalente, dB. Este traspaso se realiza mediante la siguiente formula ^[8]:

$$L = 20 * \log \left[\frac{a}{a_0} \right] \quad [dB] \quad (6.1)$$

Donde:

L : Nivel de aceleración en dB.

a : aceleración r.m.s. medida en m/s^2 .

a_0 : nivel de referencia = $10^{-6} m/s^2$.

Con lo que la curva de aceptabilidad por vibraciones en oficinas a Nivel Continuo Equivalente , dB, corresponde a los datos que se observan en la Tabla N° 6.1 y en los Gráficos N° 6.1 y 6.2.

Frecuencia f (Hz)	Nivel de Aceleración dB	
	Eje z	Combinada
1	92	71
1.25	91	71
1.6	90	71
2	89	71
2.5	88	71
3.15	87	72
4	86	72
5	86	73
6.3	86	73
8	86	74
10	90	76
12.5	90	78
16	92	80
20	94	82
25	96	84
31.5	98	86
40	100	88
50	102	90
63	104	92
80	106	94

Tabla N° 6.1: Nivel de Aceleración en frecuencias centrales de banda de tercios de octava, para las curvas base del Eje z y la curva base combinada.

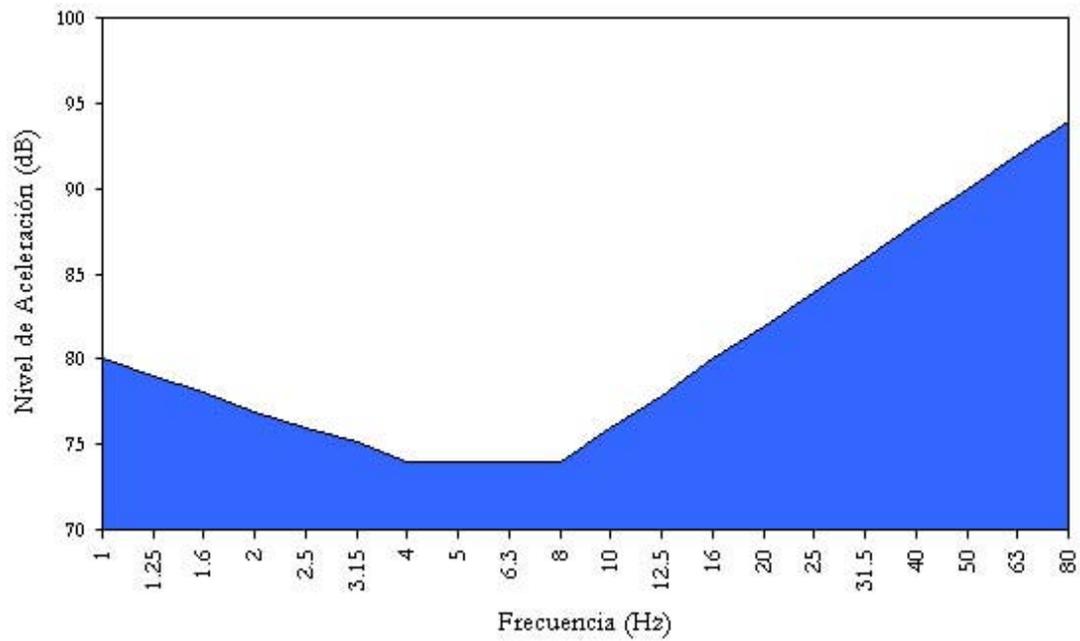


Gráfico N° 6.1: Curva Base para el eje z.

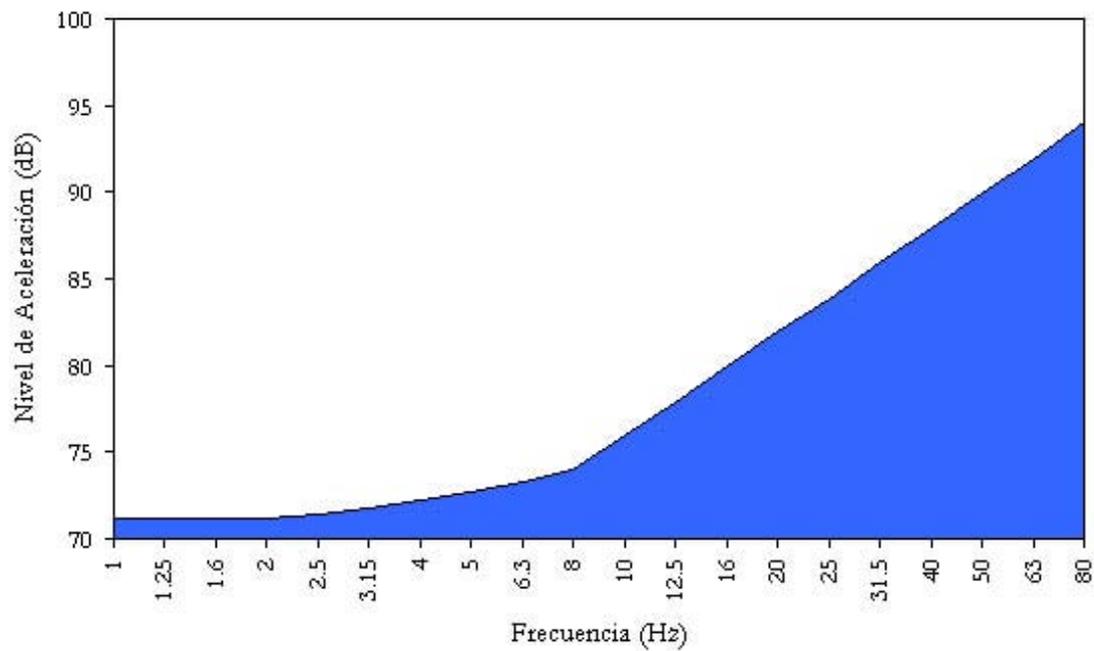


Gráfico N° 6.2: Curva Base Combinada.

7. RESULTADOS

Se realizaron mediciones en dos edificios, Edificio Millenium y Edificio El Bosque Norte, en salas contiguas a sus salas de máquinas, con el objeto de comprobar si los niveles existentes de vibraciones son o no aceptables, de acuerdo a las curvas de aceptabilidad entregadas por la Norma ISO 2631-2:1989.

A continuación y con el objetivo de interiorizar al lector en el entorno del ambiente donde se realizaron las mediciones, se muestran planos de los lugares, cantidad de máquinas, controles de vibraciones efectuados, etc., y los resultados de las mediciones. De tal forma, se presentan las características de las máquinas que se debiesen conocer para realizar un control de vibraciones según los procedimientos descritos en el presente trabajo.

7.1 Edificio Millenium.

7.1.1 Descripción del entorno

Ubicación: Avda. Vitacura #2939,
comuna de Las
Condes, Santiago.

Propietario: Inmobiliaria Islas del
Nuevo Extremo S.A.

Arquitecto: Sr. Abraham
Senerman Lamas.

Pisos: 30 pisos.



El edificio Millenium, consta de 30 pisos, más 4 pisos en el subterráneo. Desde el piso N° 29 hasta el N° 30 se ubica la sala de máquinas. En las Figuras N° 7.1 y 7.2, se muestran respectivamente los pisos N° 29 y 30, con sus máquinas. Al momento de las mediciones se encontraban en funcionamiento las dos Torres de Enfriamiento y un Chiller.

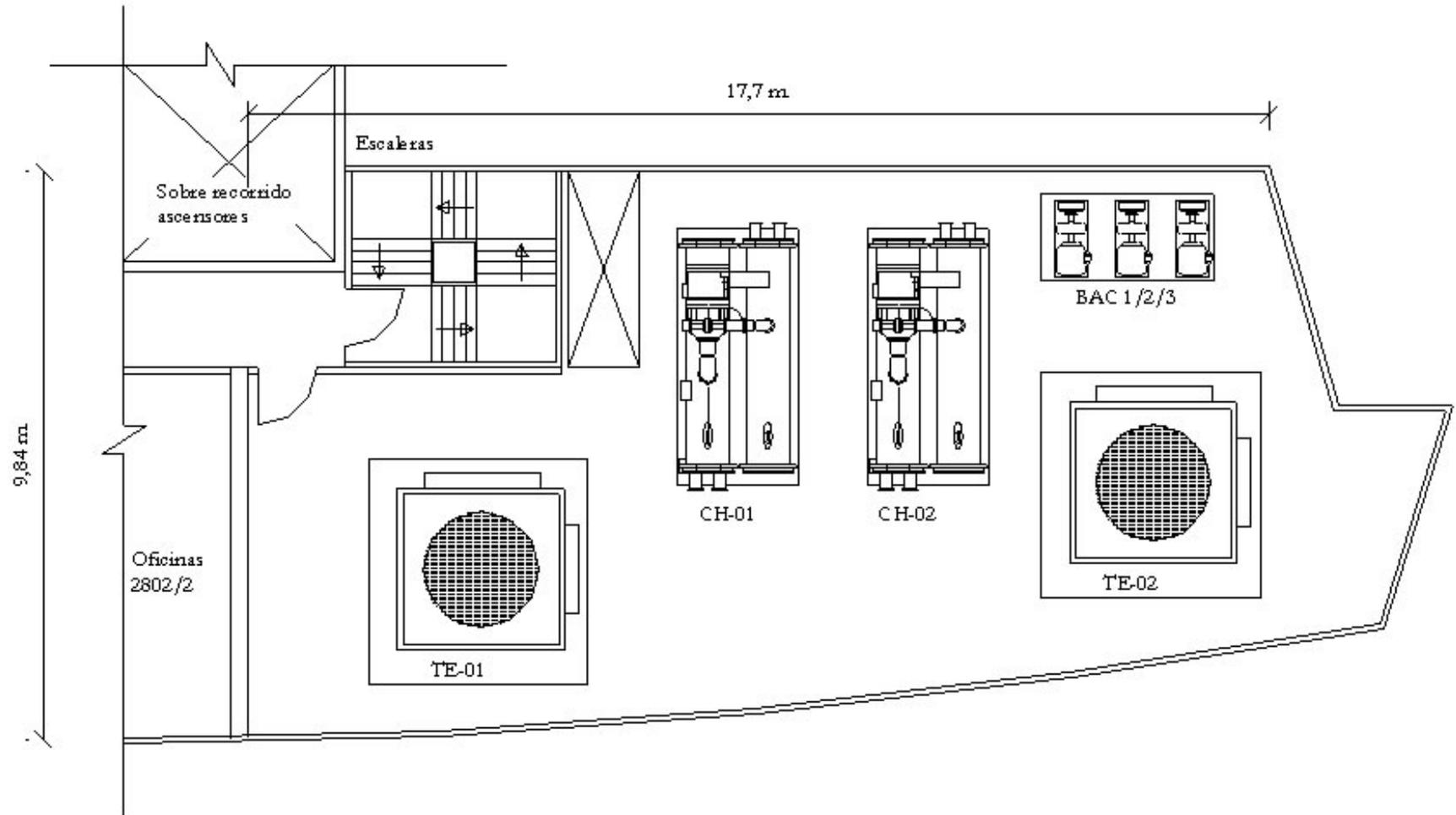


Figura N° 7.1: Sala de máquinas piso N° 29. Edificio Millenium.

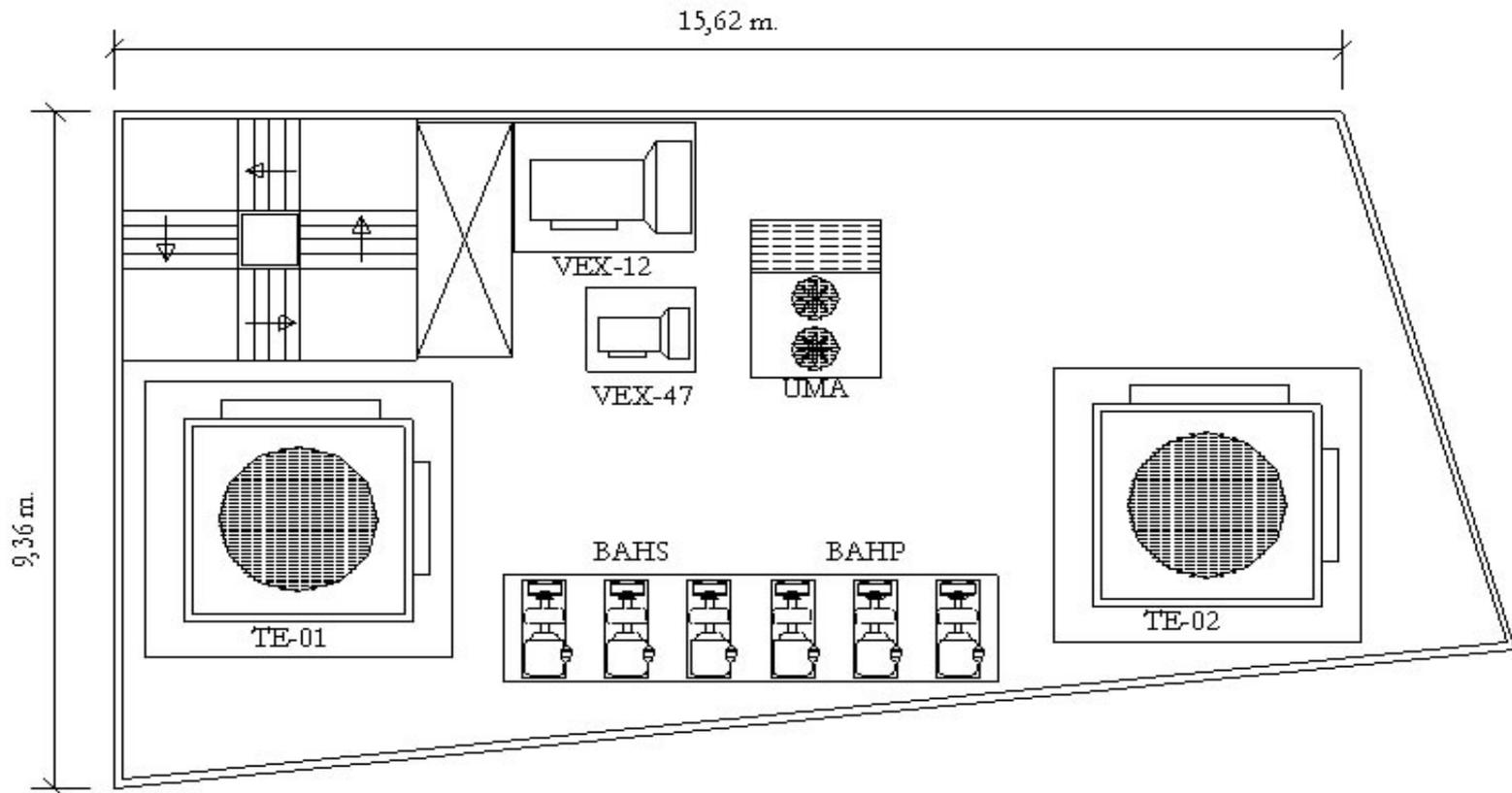


Figura N° 7.2: Sala de máquinas Piso N° 30. Edificio Millenium

Entre las características que se deben destacar cabe mencionar que la losa estructural tanto del piso N° 29 como el del piso N° 30 son de hormigón con un espesor aproximado de 0.25 m.

7.1.2 Especificación de máquinas y aisladores de vibraciones respectivos.

Debido a la carencia de información en algunos detalles y con el objeto de poder representar con la mayor claridad posible el entorno, así como el control de vibraciones utilizado, se entregará mediante fotografías y dibujos detallados la información faltante, en la medida que ello sea posible. En aquellos casos donde no exista información se detallará con las iniciales S.I., y se procederá a explicar más adelante mediante las *Especificaciones*. El trabajo de Control de Vibraciones fue realizado por SONOFLEX, empresa Acústica de Santiago.

7.1.2.1 Torres de Enfriamiento.

Listado de T. E.				Aislación de Vibraciones	
Modelo	Cantidad	r.p.m.	Peso kg.	Especie	Deflexión estática mínima
VT1-307-O	2	S.I.	7500	S. I.	S. I.

Tabla N° 7.1: Especificaciones de Torres de enfriamiento.

Especificaciones:

El control de vibraciones se realiza con una base de Inercia unida a rieles de acero y amortiguadores del tipo resortes a la Torre de enfriamiento. La Base de Inercia es construida de Hormigón de dimensiones de 5790x3910 mm, con un peso de 22600 kg. Las bases son similares para ambos equipos.

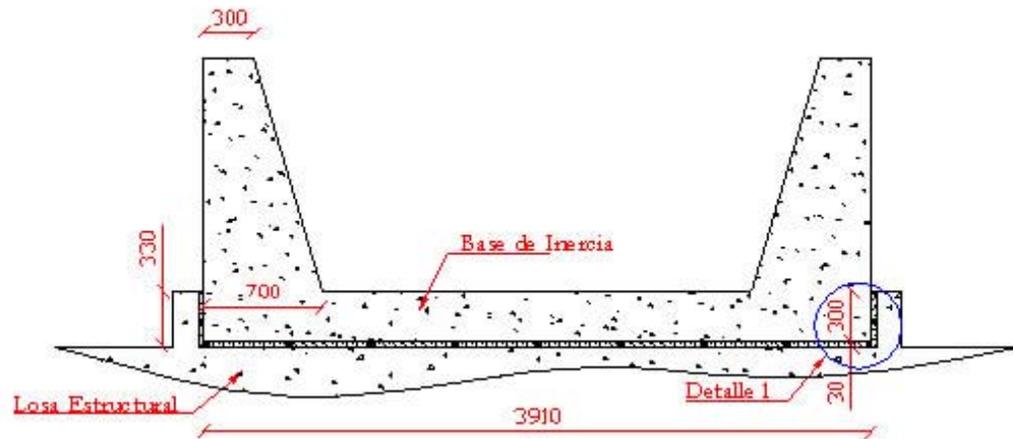


Figura N° 7.3 Base de Inercia de Torres de Enfriamiento. Unidades en mm.

En la Figura N° 7.4 se muestra el Detalle 1, en el cual se observa la unión existente entre la base de inercia de la Torre y la losa estructural. El bloque de neopreno es de marca “Vulco” tipo 674 y de dimensiones 100x100x30 mm.

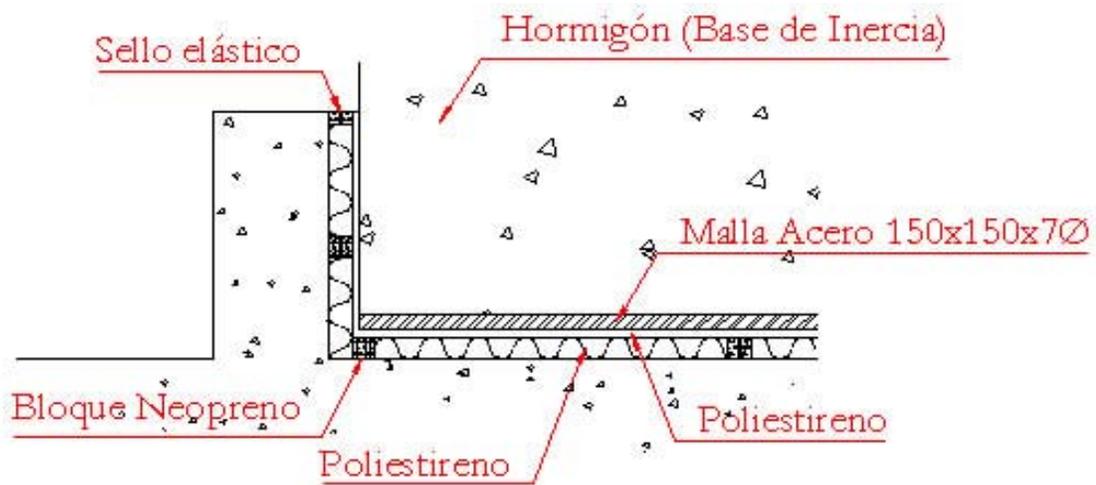
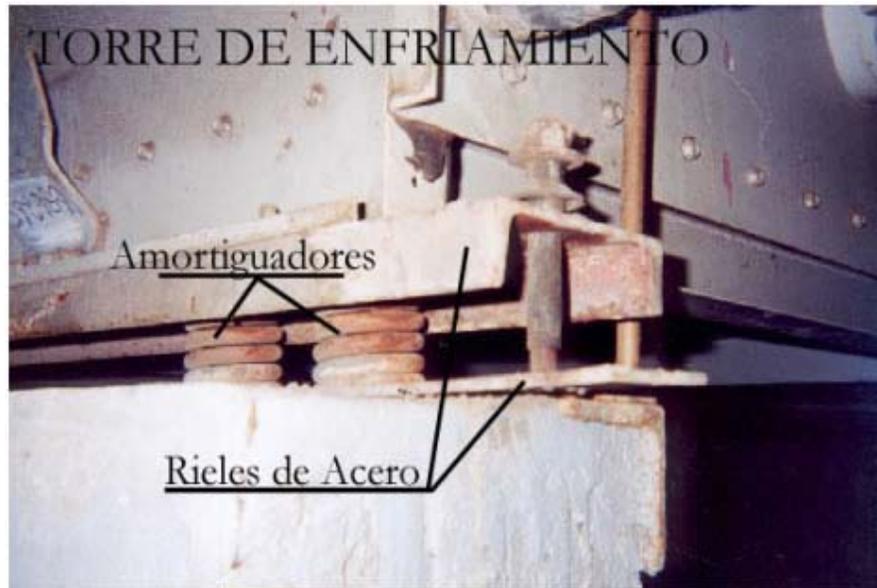


Figura N° 7.4: Detalle (Detalle 1) de la unión entre Base de inercia y losa estructural. Unidades en mm.

En la Fotografía N° 7.1 se observa uno de los cuatro pares de amortiguadores tipo resorte que se unen con la base de inercia y la torre mediante rieles de acero.



Fotografía N° 7.1 Amortiguadores y rieles de Torres de Enfriamiento

7.1.2.2 Chillers.

Listado de Chillers			Aislación de Vibraciones	
N° Modelo	Cantidad	Peso kg.	Especie	Deflexión estática mínima
19XR3232 CM S 52	2	7100	S. I.	S. I.

Tabla N° 7.2: Especificaciones de Chillers.

Especificaciones:

El control de vibraciones se realiza con una base de Inercia unida por medio de amortiguadores del tipo resortes al Chiller. La Base de Inercia es construida de Hormigón y de dimensiones 4500x2100 mm., con un peso de 7500 kg. La base es similar en ambos equipos.

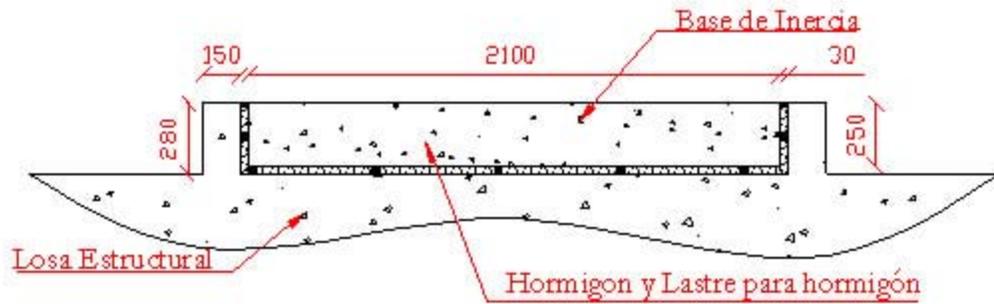
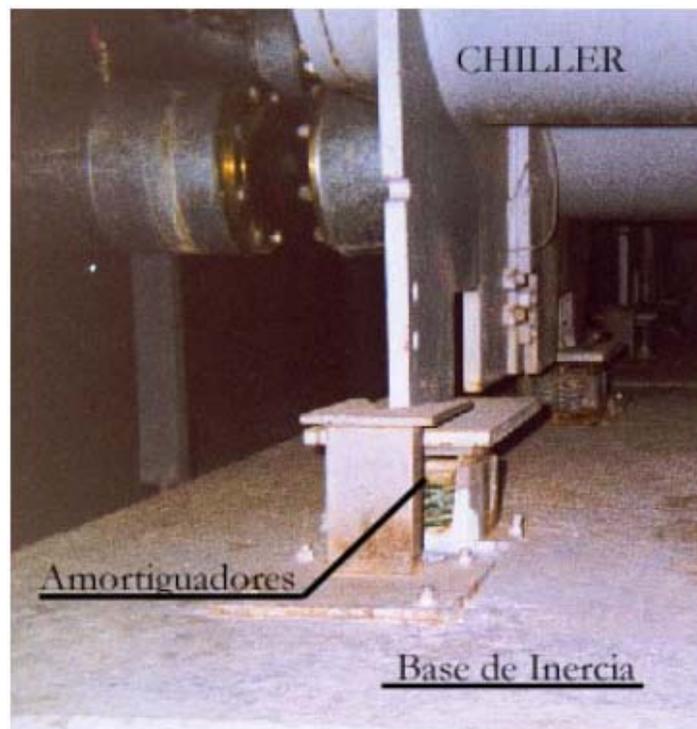


Figura N° 7.5 Base de Inercia de Chillers. Unidades en mm.

La unión entre la Base de Inercia y la losa estructural es similar a la mostrada en la Figura N° 7.4. En la Fotografía N° 7.2 se pueden observar los amortiguadores utilizados, los cuales son del tipo resorte.



Fotografía N° 7.2 Amortiguadores de Chillers

7.1.2.3 Bombas.

Listado de Bombas			Aislación de Vibraciones	
Nº Bomba	Potencia hp	Peso kg.	Especie	Deflexión estática mínima
BAC 1/2/3	40	S.I.	S. I.	S. I.
BAHS 1/2/3	20	S.I.	S. I.	S. I.
BAHP 1/2/3	30	S.I.	S. I.	S. I.

Tabla N° 7.3: Especificaciones de Bombas.

Especificaciones:

El control de vibraciones se realiza por medio de bases de inercia. En una se instalaron las bombas BAC 1/2/3 y en otra se instalaron las BAHS y las BAHP. En la Figura N° 7.6 y 7.7, se muestran las bases. Cada bomba se une al bloque de concreto por medio de una base metálica de acero.

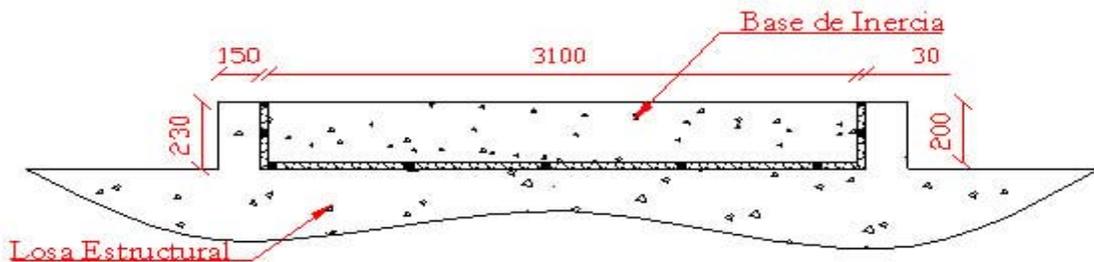


Figura N° 7.6 Base de Inercia de Bombas BAC. Unidades en mm.

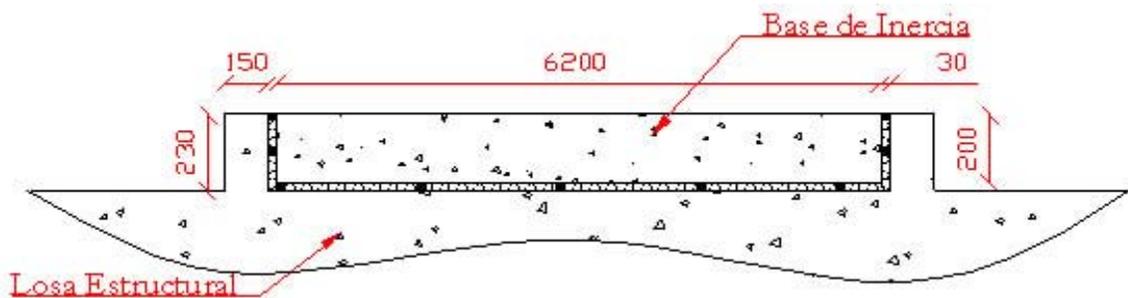


Figura N° 7.7 Base de Inercia de Bombas BAHS y BAHP. Unidades en mm.

Las Bases de Inercia son construidas de Hormigón y de dimensiones 1500x6200 mm., en el caso de las Bombas BAC, y de dimensiones 1500x6200 mm. para el caso de las Bombas BAHS y BAHP, con un peso de 2600 kg. Y 5200 kg. La unión entre la Base de Inercia y losa estructural es similar a la mostrada en la Figura N° 7.4.

7.1.2.4 Ventiladores.

Listado de Ventiladores				Aislación de Vibraciones	
N° Ventilador	Velocidad r.p.m.	Potencia hp	Peso kg.	Especie	Deflexión estática mínima
VEX 12	S. I.	S. I.	S. I.	S. I.	S. I.
VEX 47	S. I.	S. I.	S. I.	S. I.	S. I.

Tabla N° 7.4: Especificaciones de Ventiladores.

Especificaciones:

Según datos proporcionados por la Inmobiliaria a cargo de las obras, el control de vibraciones se realiza también mediante una base de inercia de concreto, para ambos ventiladores, mayores datos no existen. La base de inercia de los ventiladores VEX 12 y VEX 47 son de 2300x1800 mm. y de 1370x1150 mm. respectivamente.

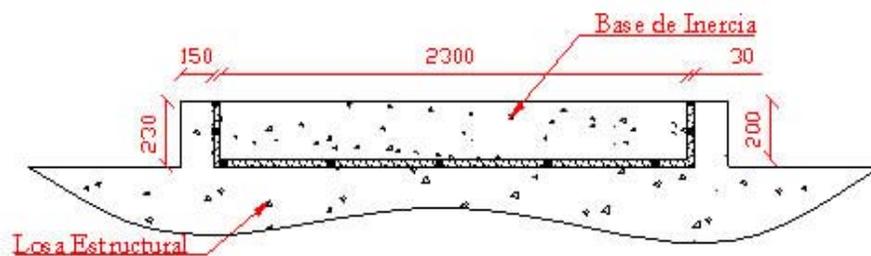


Figura N° 7.8 Base de Inercia de Ventilador VEX 12. Unidades en mm.

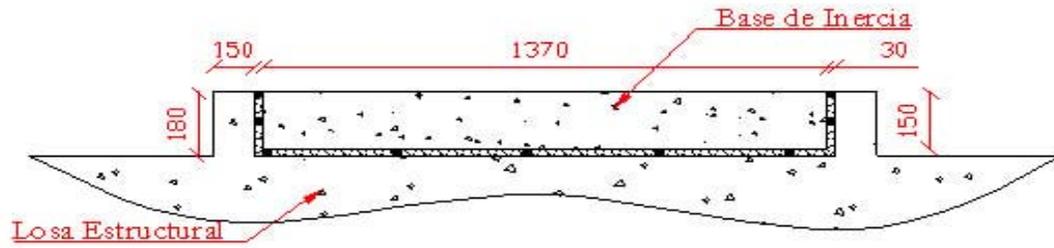


Figura N° 7.9: Base de Inercia de Ventilador VEX 47. Unidades en mm.

7.1.2.5 Unidad manejadora de aire.

Listado de manejadoras				Aislación de Vibraciones	
Modelo	Flujo c.f.m.	Potencia hp	Peso kg.	Especie	Deflexión estática mínima
39L018	S. I.	S. I.	S. I.	S. I.	S. I.

Tabla N° 7.5: Especificación de Unidad manejadora de Arte.

Especificaciones:

La unidad manejadora de aire es montada sobre una losa estructural de dimensiones 1500x1700 mm. construida de hormigón. No fue posible recolectar mayores datos.

7.1.3 Resultados Edificio Millenium.

En la Figura N° 7.10 se muestra el punto de medición en el piso N° 29 del edificio Millenium.

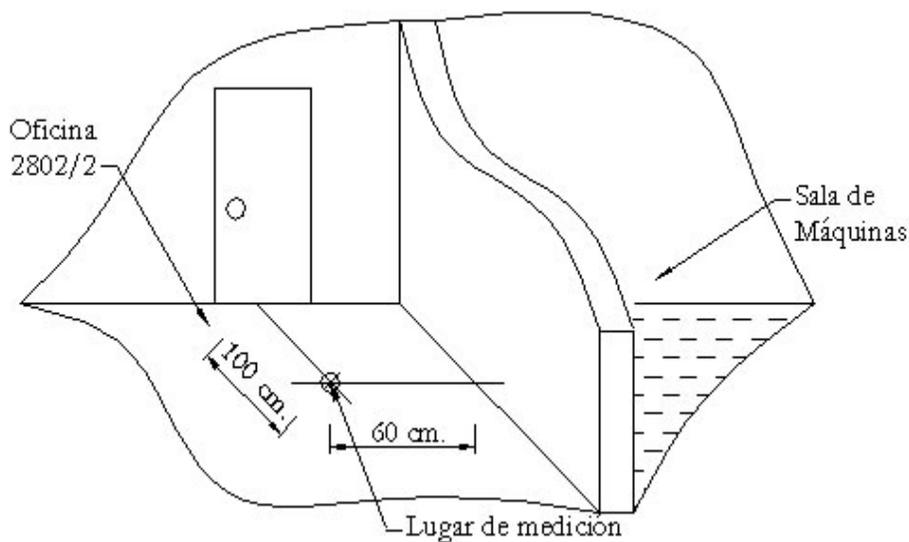


Figura N° 7.10: Punto de medición en el piso N° 29 del edificio Millenium..

Tanto los valores registrados como la comparación se muestran en los siguientes gráficos.

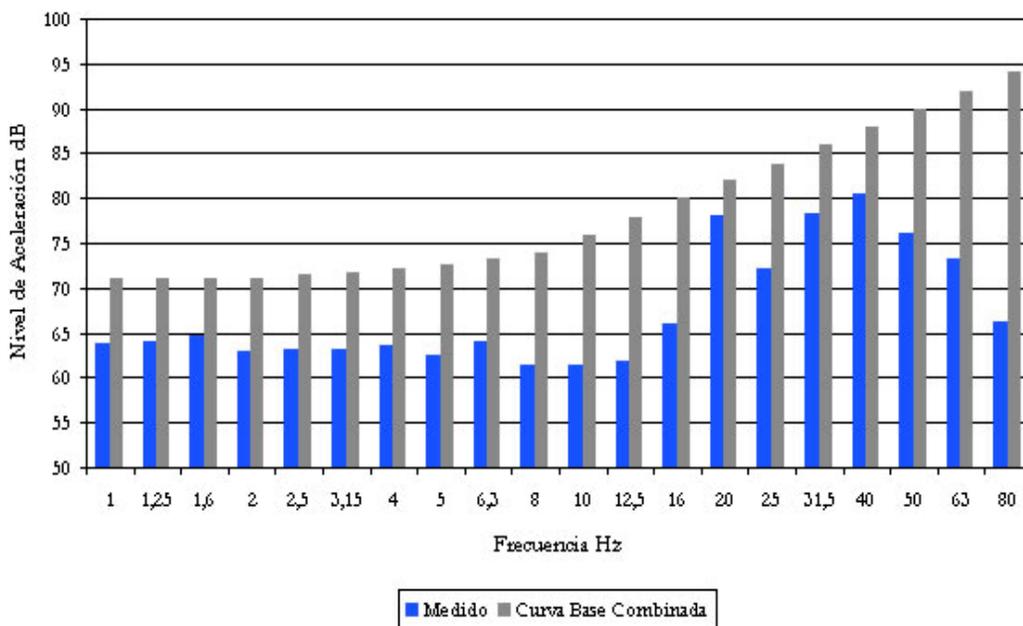


Gráfico N° 7.1: Comparación entre curva base combinada y los niveles obtenidos en la losa estructural del Piso N° 29 del edificio Millenium.

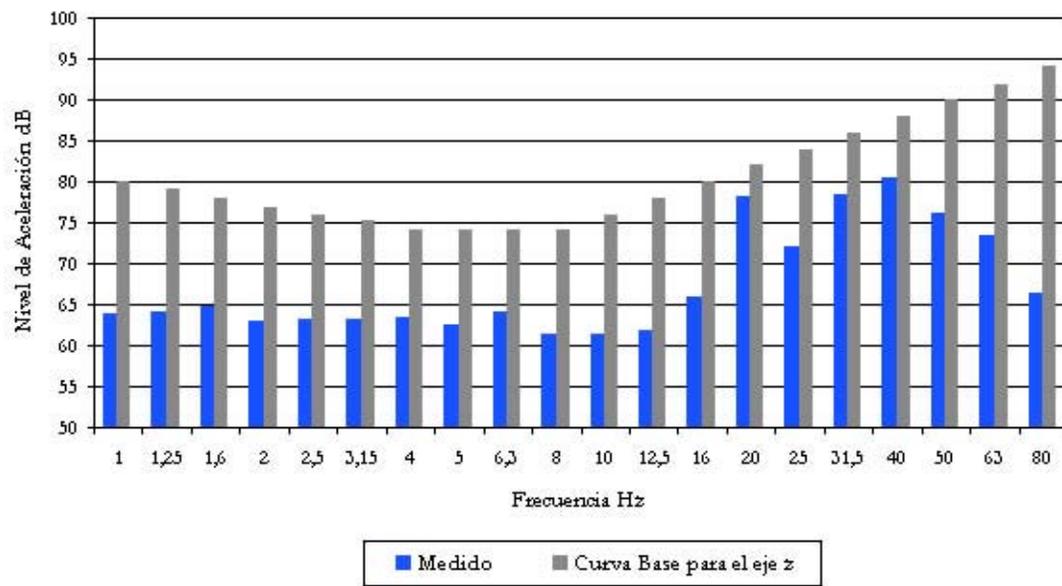


Gráfico N° 7.2: Comparación entre curva base para el eje z y los niveles obtenidos en la losa estructural del Piso N° 29 del edificio Millenium.

7.2 Edificio Bosque Norte.

7.2.1 Descripción del entorno

Ubicación: Avda. El Bosque Norte N° 500,
comuna de las Condes, Santiago.

Propietaria: Inmobiliaria Bosques del Nuevo
Extremo.

Arquitecto: Sr. Abraham Senerman Lamas.

Pisos: 30 pisos.



El edificio Bosque norte, consta de 26 pisos, más 4 pisos en el subterráneo. Desde el piso N° 25 hasta el N° 26 se ubica la sala de máquinas. En las Figuras N° 7.11 y 7.12, se muestran respectivamente los pisos N° 25 y 26, con sus máquinas. Al momento de las mediciones se encontraban en funcionamiento:

- Torres de enfriamiento AT 19-78 (las dos).
- Bombas BAC 1, 2 y 3.
- Bombas BAF-CP 1, 2 y 3.
- Bombas BAF-CS 1, 2 y 3.
- Chillers (los dos).

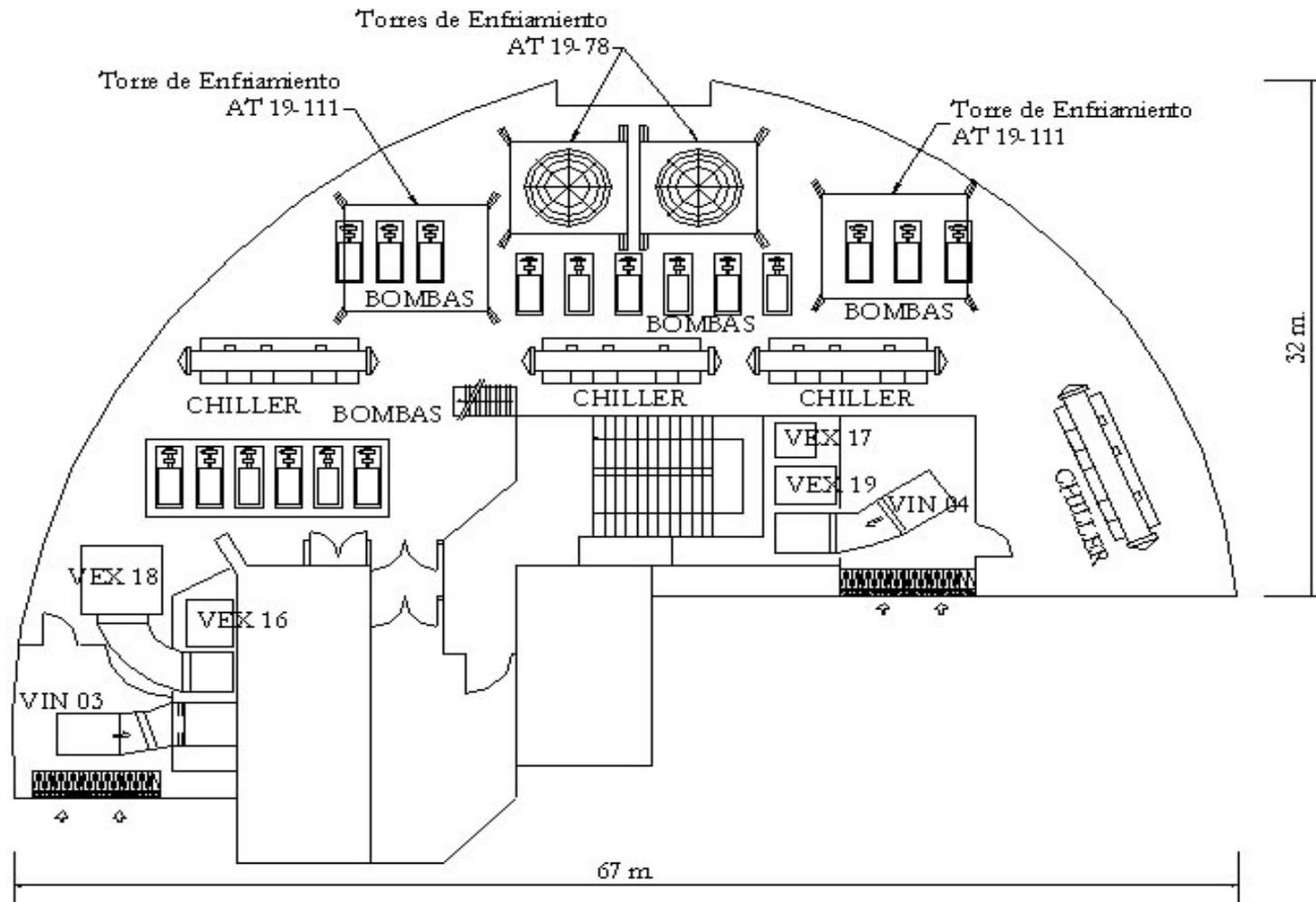


FIGURA N° 7.11: SALA DE MÁQUINAS PISO N° 25 EDIFICIO EL BOSQUE NORTE.

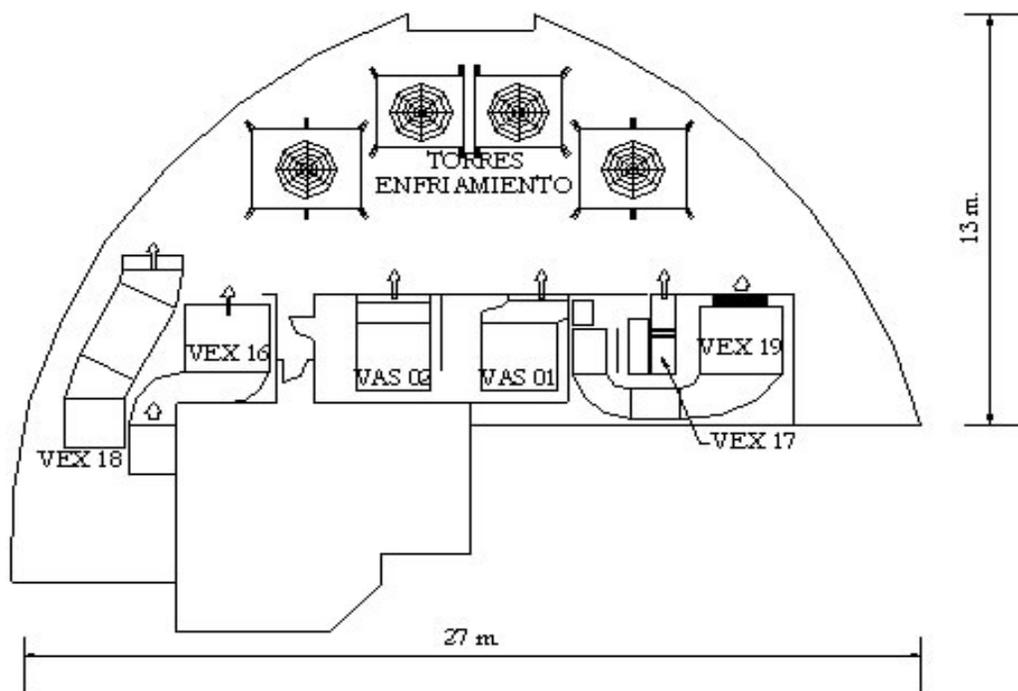


Figura N° 7.12: Sala de Máquinas Piso N° 26 Edificio El Bosque Norte.

Entre las características del edificio cabe mencionar que la preloseta estructural tanto del piso N° 29 como el del piso N° 30 son de hormigón con un espesor aproximado de 0.25 m.

7.2.2 Especificación de máquinas y aisladores de vibraciones respectivos.

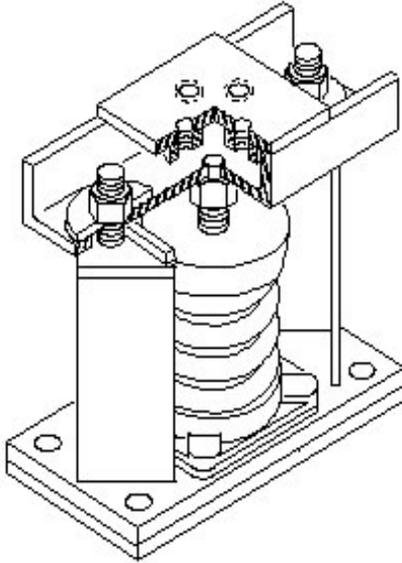
7.2.2.1 Torres de Enfriamiento.

Listado de T. E.				Aislación de Vibraciones	
N° Torre	Cantidad	r.p.m.	Peso kg.	Especie	Deflexión estática mínima (mm)
AT 19-78	2	>500	1746	C - G	38
AT 19-111	2	>500	3474	C - G	38

Tabla N° 7.6: Especificaciones de Torres de enfriamiento.

Especificaciones:

C: Aisladores de Vibración de Resorte Contenidos.

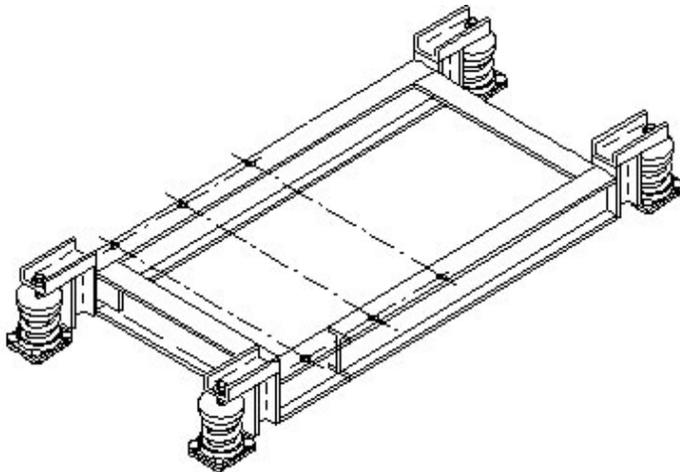


Aisladores de vibración de resorte como los descritos en la especificación B[†], dentro de una cubierta rígida que incluye topes verticales para prevenir la extensión del resorte cuando la carga es removida.

Figura N° 7.13: Aislador de Vibración.

Especificación Tipo C

G: Base en Estructura de Acero.



Corresponde a una estructura integral de acero. La base es lo suficientemente rígida para proporcionar soporte al equipo y evitar que resuene a la frecuencia del equipo que está soportando. La viga IN posee una deflexión estática máxima menor a 6 mm para el peso del equipo.

Figura N° 7.14: Base en estructura de acero. Especificación Tipo G

[†] La descripción se hace más adelante.

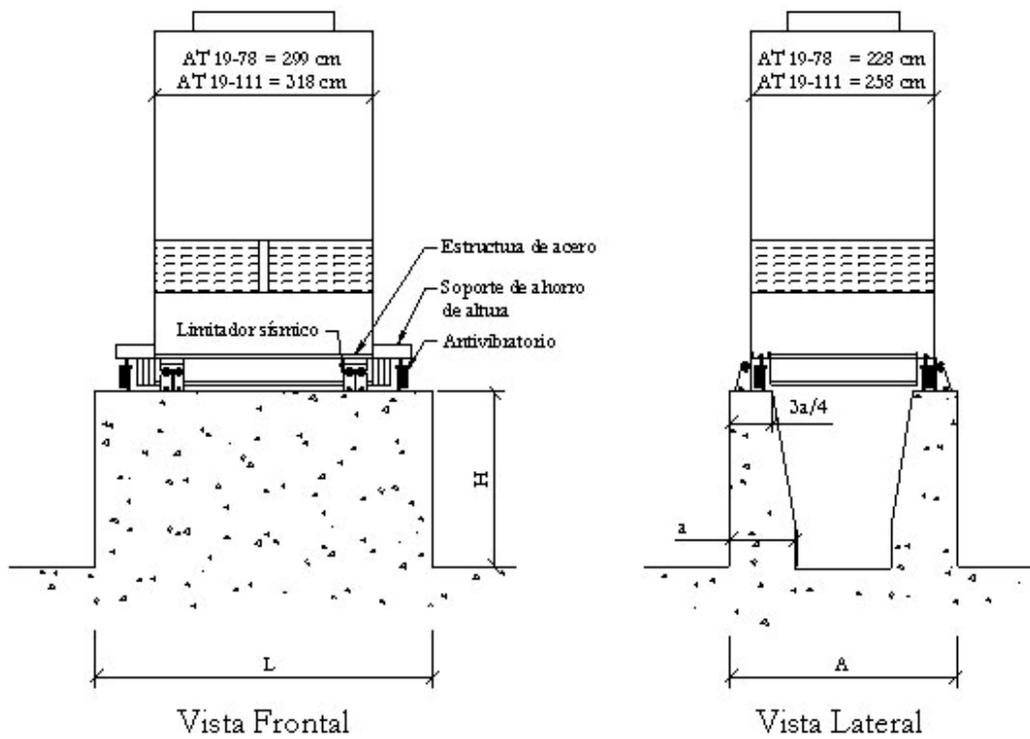


Figura N° 7.15: Vistas de Torres de Enfriamiento.

Donde:

- H: Altura definida por el contratista clima.
- a: 60 cm.
- L: Largo de T.E. + a
- A: Ancho T.E. + $(a/2 - 2b)$

7.2.2.2 Chillers.

Listado de Chillers			Aislación de Vibraciones	
N° Modelo	Cantidad	Peso kg.	Especie	Deflexión estática mínima (mm)
30 HXC260	2	4815	C – G - K	38
30 HXC285	2	4985	C – G - K	38

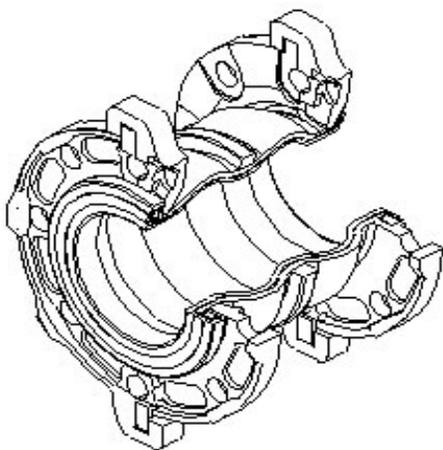
Tabla N° 7.7: Especificaciones de Chillers.

Especificaciones:

C: Aisladores de Vibración de Resorte Contenidos.

G: Base en Estructura de Acero.

K: Conectores Flexibles.



Corresponden a conectores flexibles de neopreno que se colocan entre la bomba y sus tuberías asociadas.

Figura N° 7.16: Conectores Flexibles. Especificación

Tipo K.

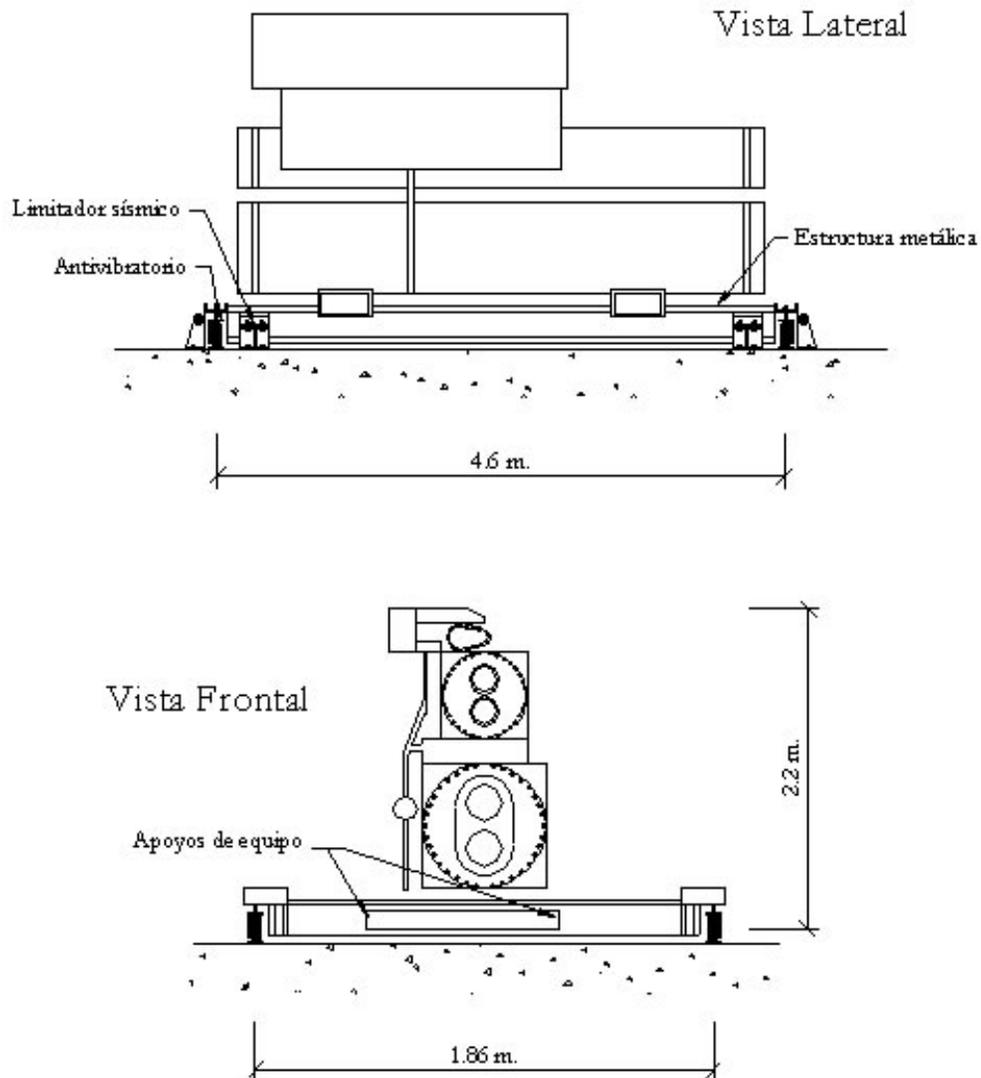


Figura N° 7.17: Vistas de Chillers.

Ambos modelos de Chillers poseen dimensiones similares, sólo se diferencian en los pesos.

Debido a la distribución de cargas en estos equipos, el peso sobre cada antivibratorio no será igual, por lo que se debe determinar el peso que deberá soportar cada antivibratorio. Una vez realizada la distribución de cargas, se pueden seleccionar los antivibratorios adecuados a cada pata del chiller[†] [7].

[†] Por motivos de extensión de la presente tesis, no se explicará en forma detallada el método utilizado. El cual se puede consultar en la referencia citada.

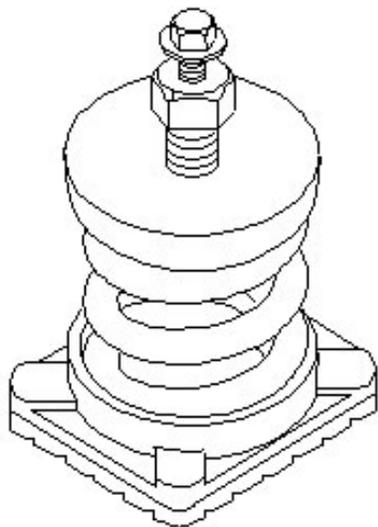
7.2.2.3 Bombas.

Listado de Bombas			Aislación de Vibraciones		
N° Modelo	Potencia hp	Peso kg.	Especie	Peso Base de Inercia	Deflexión estática mínima (mm)
BAF-CP 1/2/3	10	197	B-J-K	394	38
BAF-CP 4/5/6	10	197	B-J-K	394	38
BAF-CS 1/2/3	25	320	B-J-K	640	38
BAF-CS 4/5/6	25	410	B-J-K	820	38
BAC 1/2/3	15	256	B-J-K	512	38
BAC 4/5/6	15	263	B-J-K	526	38

Tabla N° 7.8: Especificaciones de Bombas.

Especificaciones:

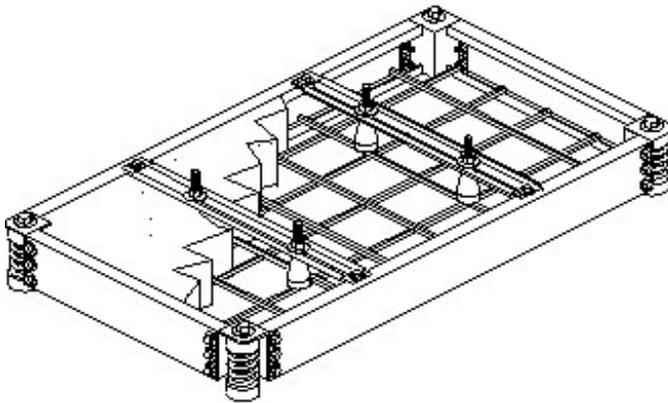
B: Aisladores de Vibración de Resorte.



Son lateralmente estables, sin cubierta y con una tapa de neopreno o con un pad de fricción acústica de 6mm. de espesor entre la base del aislador y la losa. Poseen pernos de nivelación de altura, los que son rígidamente unidos a la estructura.

Figura N° 7.18: Aisladores de Vibración. Especificación Tipo B.

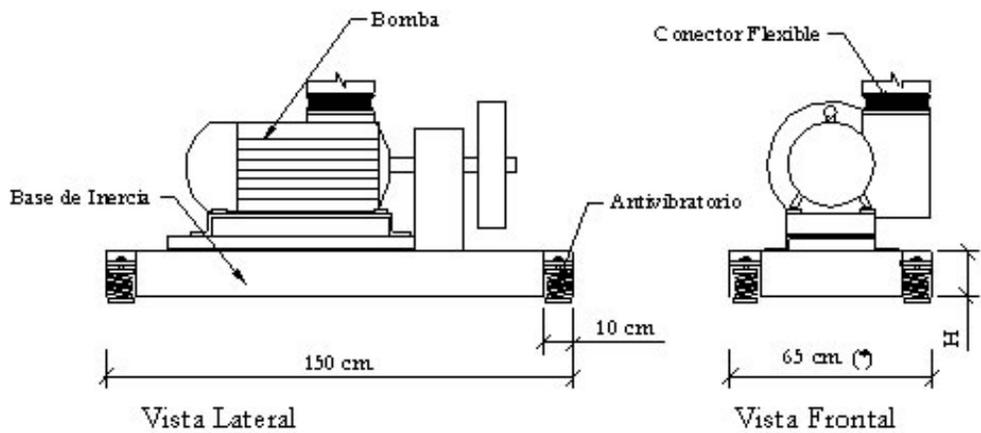
J: Base de Inercia.



Base en perfilera de acero relleno con concreto como base flotante individual de cada bomba. La perfilera incluye un refuerzo para el concreto consistente en barras soldadas. Esta base emplea soportes de ahorro de altura para mantener cierta distancia (25 mm.) bajo la base.

Figura N° 7.19: Base de Inercia. Especificación Tipo J.

K: Conectores Flexibles.



(*) Para las bombas BAFCS 4/5/6 corresponde a 85 cm.

H	Bomba
15 cm.	BAF-CP 1/2/3/4/5/6 BAC 1/2/3/4/5/6
25 cm.	BAFCS 1/2/3/4/5/6

Figura N° 7.20: Vistas de Bombas.

7.2.2.4 Ventiladores.

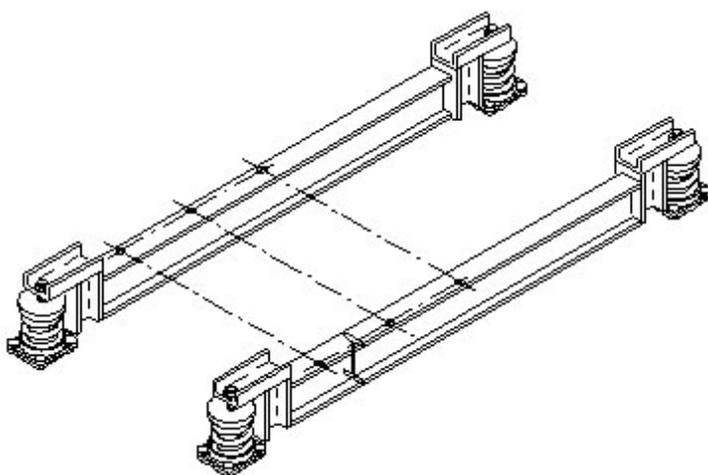
Listado de Ventiladores				Aislación de Vibraciones		
N° Ventilador	Velocidad r.p.m.	Potencia hp	Peso kg.	Especie	Deflexión estática mínima (mm)	Alma Viga IN (mm)
VEX16	550	15	1028	B-H	19	250
VEX17	770	5	503	B-H	19	150
VEX18	1040	10	501	B-H	38	200
VEX19	560	15	1028	B-H	19	250
VAS01	510	20	1350	B-H	19	250
VAS02	420	25	1230	B-H	38	250
VIN03	900	15	630	B-H	38	150
VIN04	1080	15	613	B-H	38	150

Tabla N° 7.9: Especificaciones de Ventiladores.

Especificaciones

B: Aisladores de Vibración de Resorte.

H: Base de Rieles de Acero.



Base de rieles de estructura de acero soldado a soportes de ahorro de altura. Posee la suficiente rigidez para prevenir el desalineamiento del equipo, lo cual se puede lograr con una viga IN, con una deflexión no superior a 6 mm.

Figura N° 7.21: Base de Rieles de Acero. Especificación Tipo H.

7.2. 2.5 Aislación de vibraciones de cañerías.

Aislación Horizontal: Los primeros tres soportes de las cañerías en la línea principal cercana al equipo incluyen un sistema de aislamiento de las vibraciones en base a colgadores resilientes, Figura N° 7.22. El recorrido horizontal en todos los otros sectores a lo largo del edificio son aislados por colgadores para cañerías de 2" o más. Para cañerías soportadas en el piso, éstas son soportadas en aisladores de vibraciones. Algunas alternativas para el aislamiento de cañerías se muestra en la Figura N° 7.23.

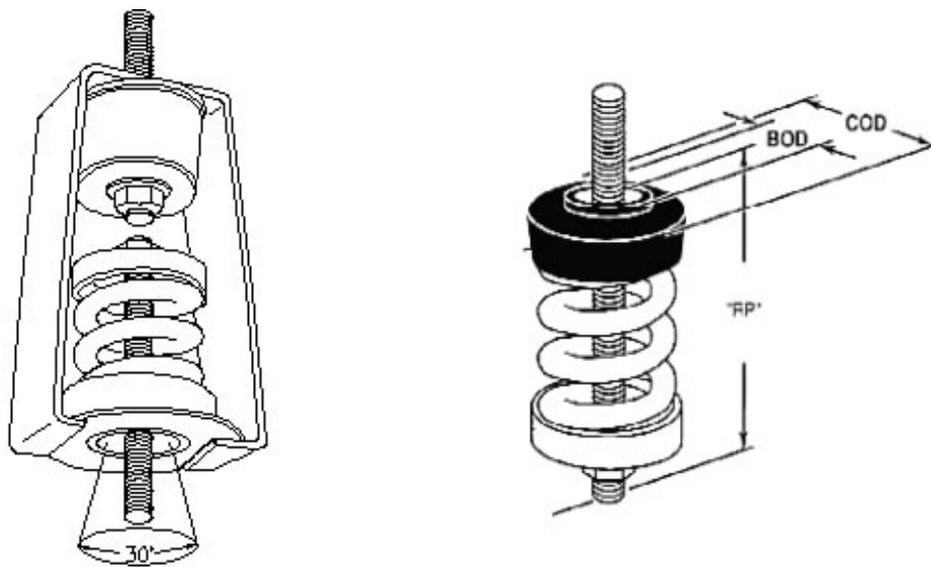


Figura N° 7.22: Colgadores Resilientes.

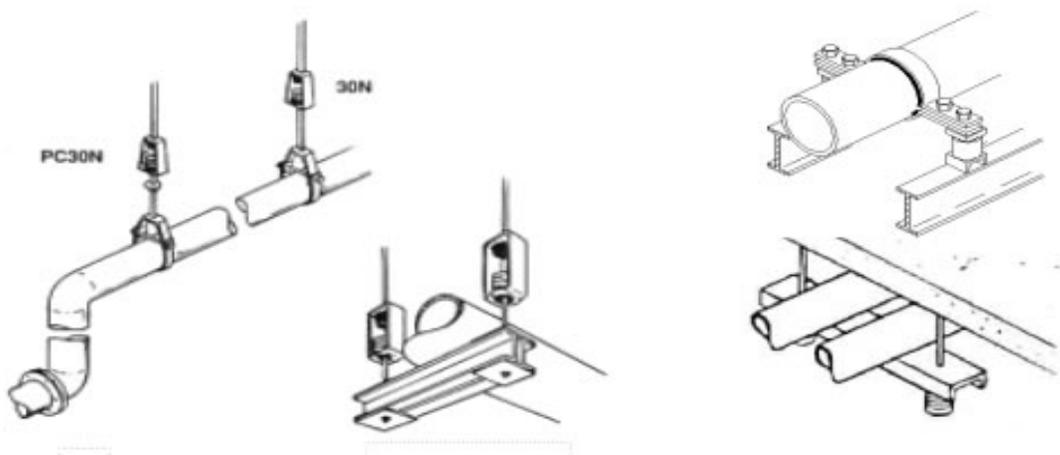


Figura N° 7.23: Aislación de vibraciones para cañerías.

Los primero tres aisladores desde el equipo poseen la misma deflexión estática del equipo. El resto posee una deflexión estática mínima de 19 mm

Aislación Vertical: Las canalizaciones verticales se encuentran suspendidas de colgadores resilientes o soportes antivibratorios. La deflexión estática de estos elementos es como mínimo de 19 mm, Figura N° 7.24.

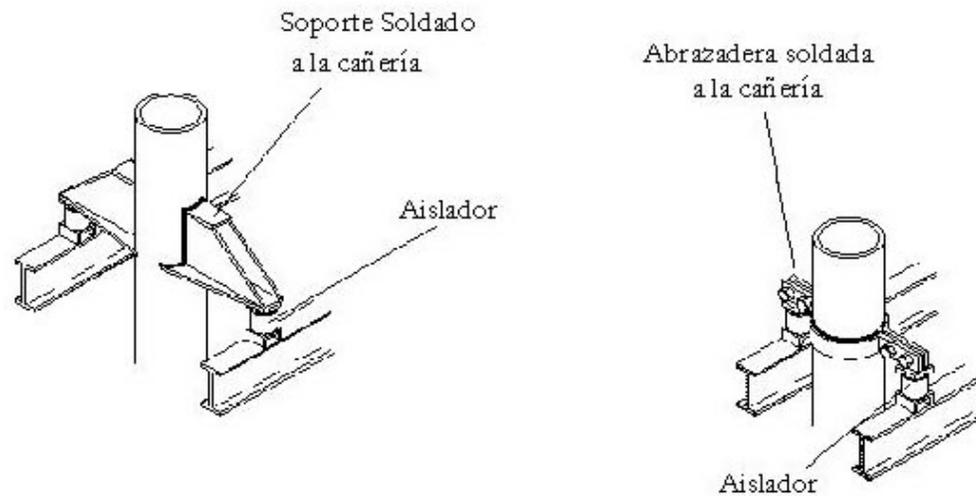


Figura N° 7.24. Aislación de vibraciones para canalizaciones verticales.

7.2.3 Resultados Medición Edificio Bosque Norte.

En el edificio Bosque Norte se realizaron mediciones en la preloseta estructural del piso N° 24, en tres salas distintas, las que serán destinadas a oficinas. En la Figura N° 7.25 se muestran los puntos de medición.

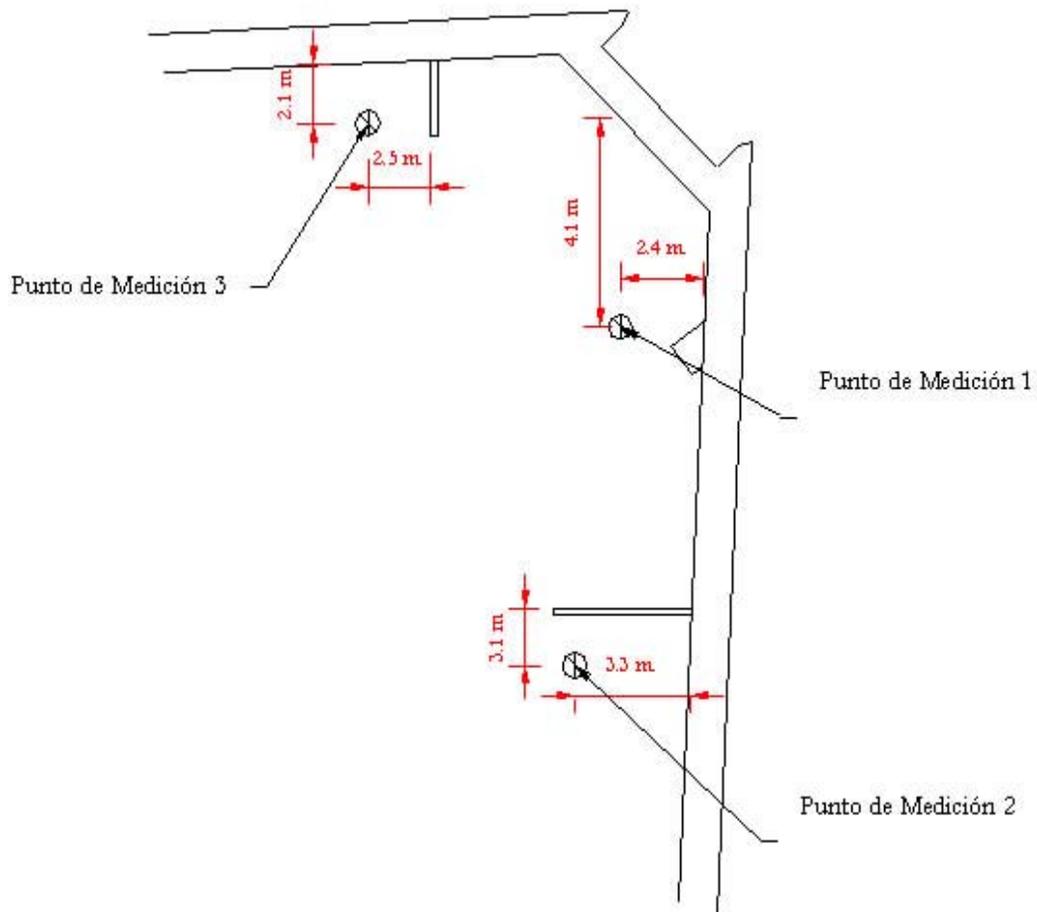


Figura N° 7.25: Puntos de medición.

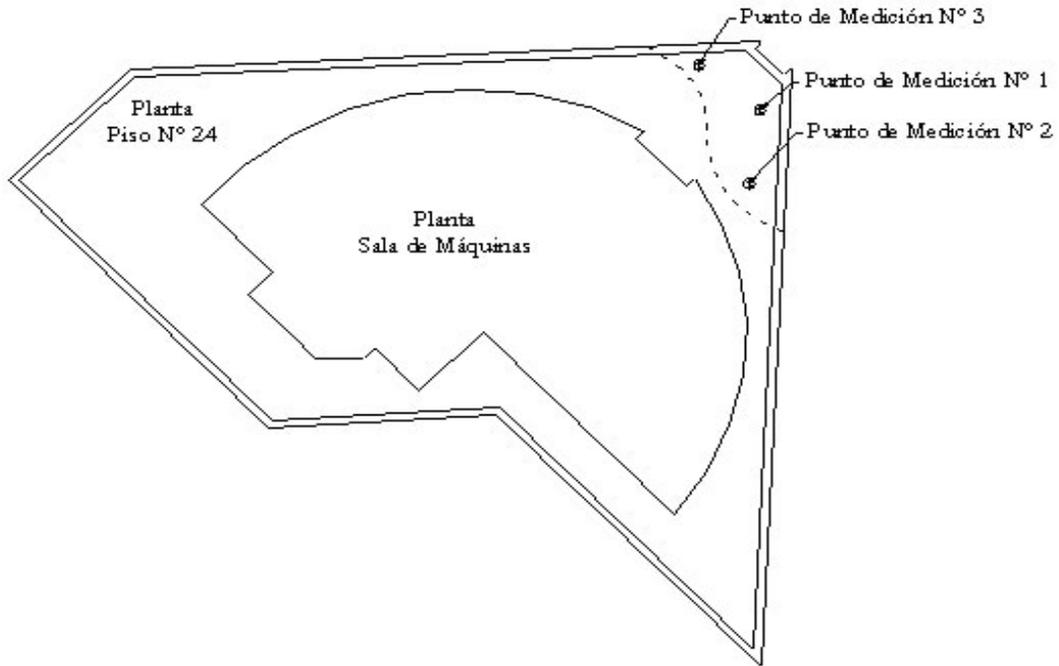


Figura N° 7.26: Emplazamiento general de los puntos de medición en relación a la sala de máquinas.

Lo resultados de estas mediciones se muestran en los siguientes 6 Gráficos.

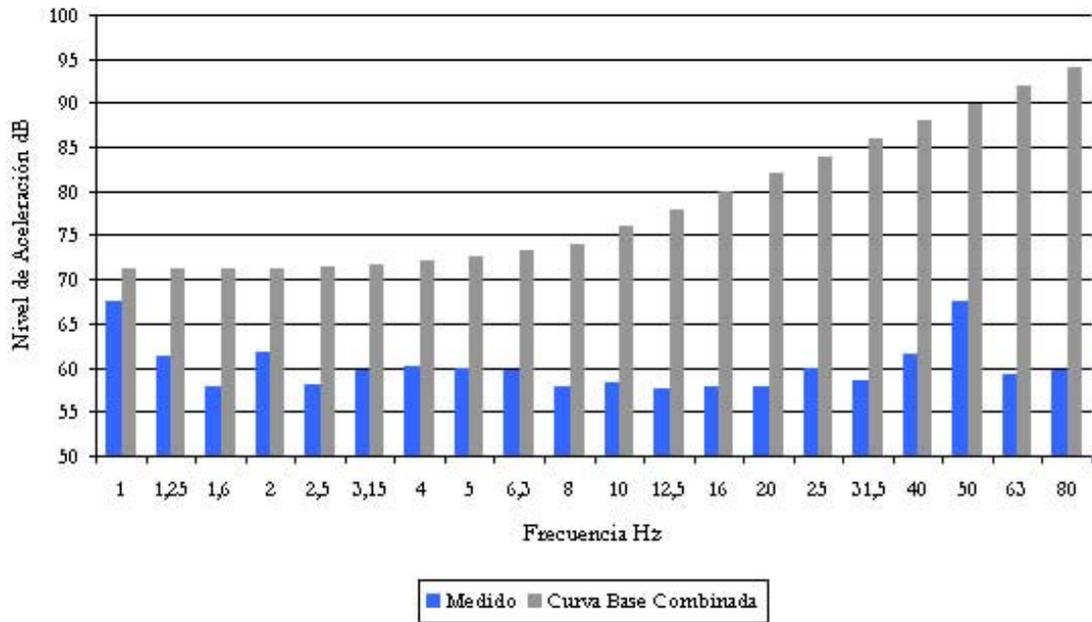


Gráfico N° 7.3: Comparación entre curva base combinada y los niveles obtenidos en la Preloseta estructural del Piso N° 24 del edificio El Bosque Norte en el Punto N° 1.

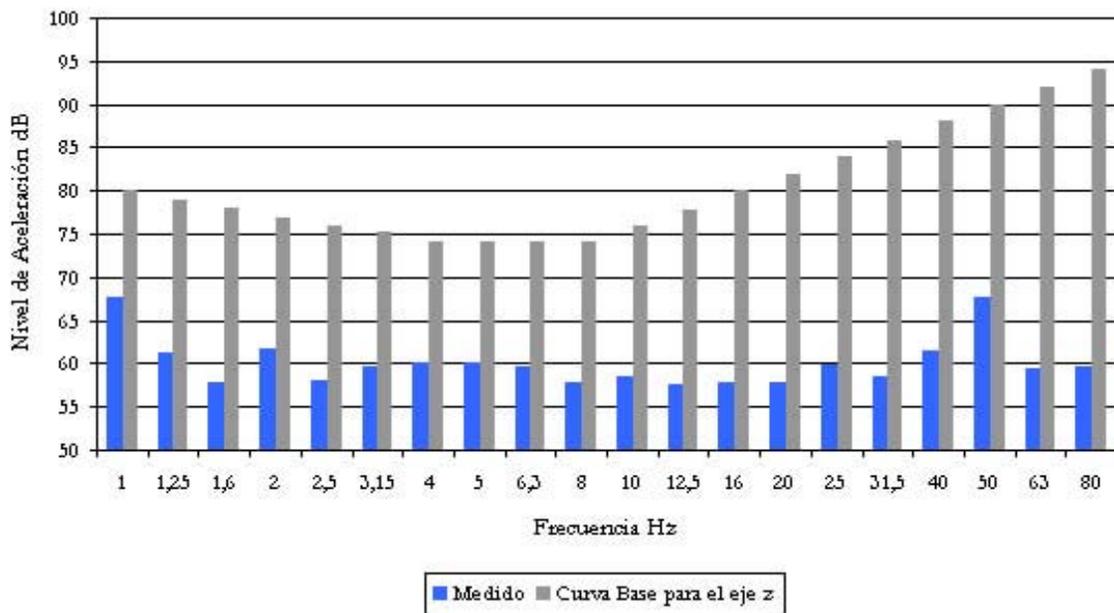


Gráfico N° 7.4: Comparación entre curva base para el eje z y los niveles obtenidos en la preloseta estructural del Piso N° 24 del edificio El Bosque Norte en el Punto N° 1

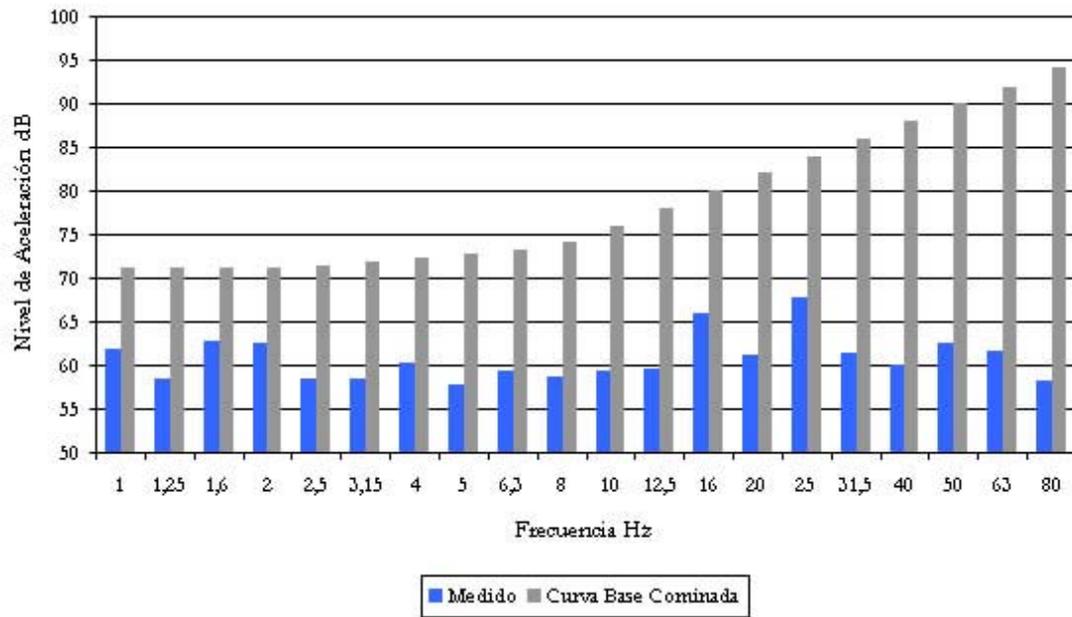


Gráfico N° 7.5: Comparación entre curva base combinada y los niveles obtenidos en la preloseta estructural del Piso N° 24 del edificio El Bosque Norte en el Punto N° 2.

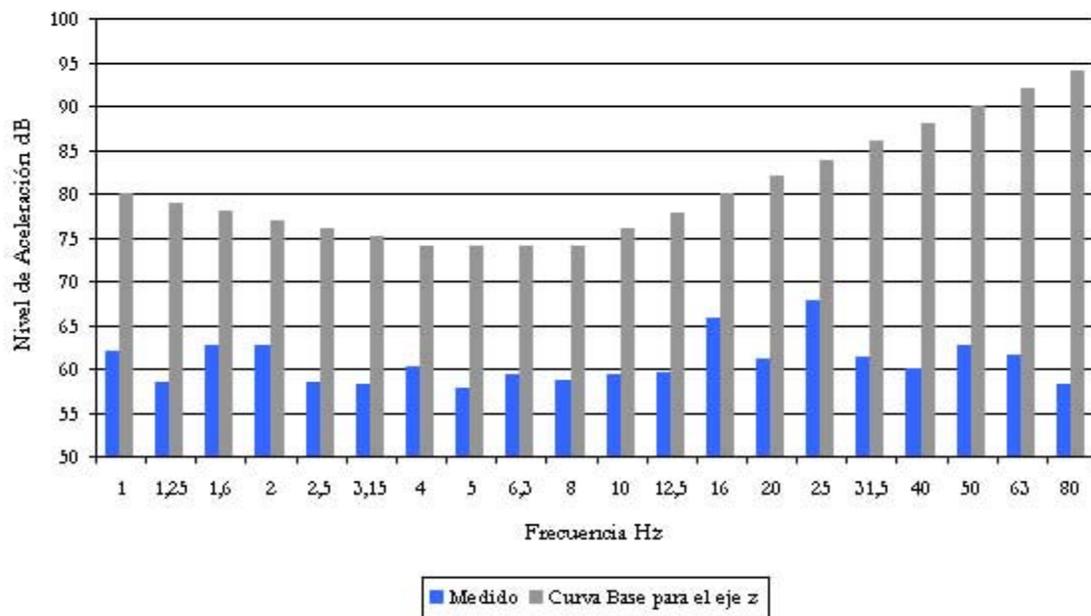


Gráfico N° 7.6: Comparación entre curva base para el eje z y los niveles obtenidos en la preloseta estructural del Piso N° 24 del edificio El Bosque Norte en el Punto N° 2

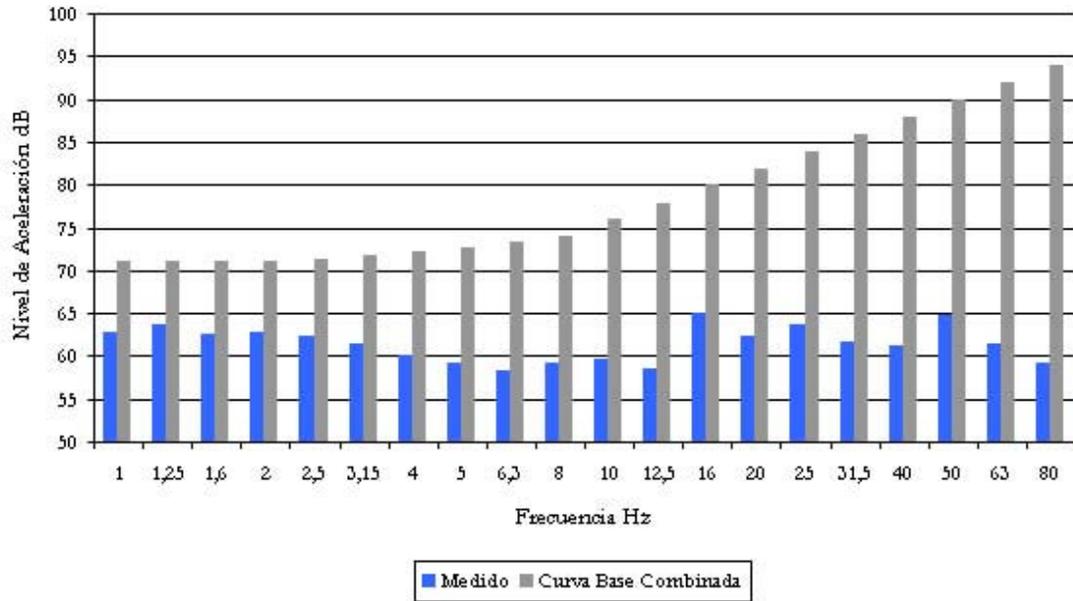


Gráfico N° 7.7: Comparación entre curva base combinada y los niveles obtenidos en la preloseta estructural del Piso N° 24 del edificio El Bosque Norte en el Punto N° 3.

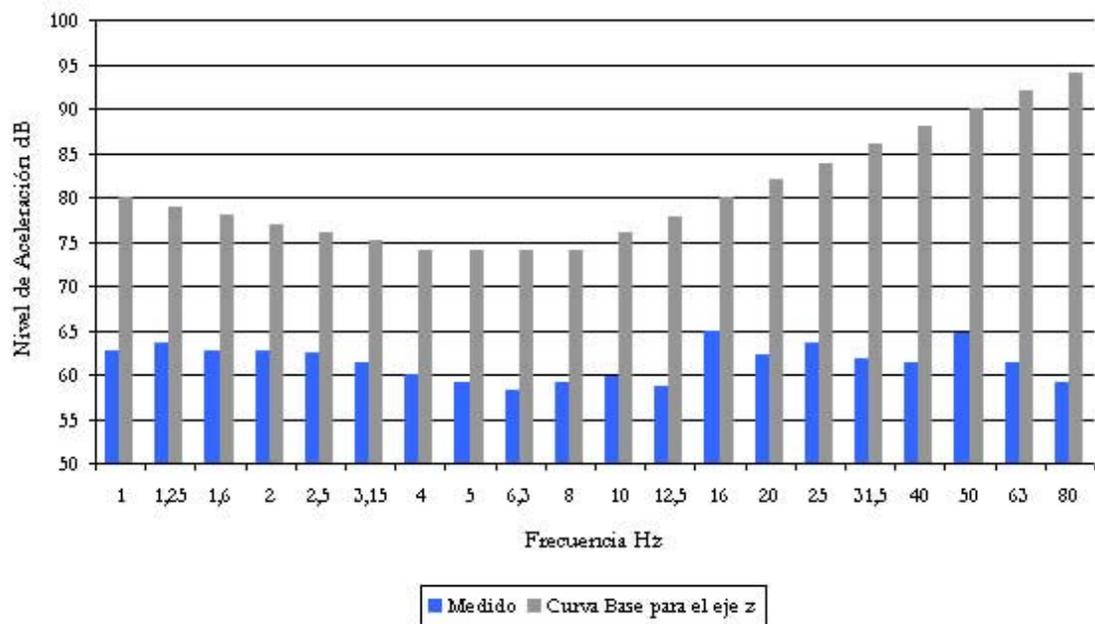


Gráfico N° 7.8: Comparación entre curva base para el eje z y los niveles obtenidos en la preloseta estructural del Piso N° 24 del edificio El Bosque Norte en el Punto N° 3

8. CONCLUSIONES

- Existe muy poca información relacionada al tema de la sensibilidad humana hacia las vibraciones. Si bien existen trabajos bien fundamentados, estos corresponden al ámbito de la investigación científica y no dictan pautas de medición para uniformar la recolección de datos. Por otra parte, la Norma ISO que si entrega métodos de medición, fue confeccionada para evaluar ambientes industriales donde existen altos niveles de vibración.
- Los efectos de las vibraciones sobre los ocupantes de los edificios depende de las características de la vibración y del contexto en el cual las personas perciben las vibraciones. Por lo que si la evaluación de un trabajo en control de vibraciones es realizado subjetivamente por personas que han estado involucradas en la construcción, dicha valoración puede ser influenciada por características tales como conocimiento de la fuente y habitualidad a ambientes que posean vibraciones.
- No existe gran conciencia y conocimiento hacia el control de vibraciones, por lo que generalmente el control ha sido efectuado mediante la instalación de bases de inercia o aisladores de vibración, sin conocer sus características de deflexión, peso máximo, etc. Esta práctica funciona, hasta el momento en el cual las exigencias aumentan por parte de las personas afectadas, o que la instalación de aisladores no produzca ninguna amortiguación, o en un caso extremo, que provoque el efecto de resonancia, produciendo daño al equipo y aumentando las vibraciones al punto de llegar a ser perceptibles por las personas.
- Al realizar un trabajo de control de vibraciones, uno se encuentra con dificultades como la inexistencia de información acerca de la maquinaria, deflexión de la losa, etc. Por lo que se hace casi imposible llevar a cabo un trabajo teórico de cálculo que se encuentre dentro de márgenes de error aceptables. Es por esto que tablas guías como la confeccionada por la ASHRAE cobran importancia, a la hora de especificar aisladores de vibración, amortiguadores, bases, rieles, etc.
- El uso de una tabla guía en las especificaciones de amortiguadores, rieles, bases, etc. no sustituye el trabajo de un consultor, debido a que si bien esta tabla entrega guías generales,

no entrega soluciones a problemas particulares que se puedan presentar, como, por ejemplo, la inexistencia de los aisladores recomendados por la guía en el país, o que la guía no entregue

- métodos para calcular las distribuciones de carga, o desconocimiento de términos como deflexión, frecuencia de excitación, etc., que no son comunes para todos los profesionales.
- La Norma ISO 2631:2-1989, solo evalúa percepción táctil de vibraciones y no toma en cuenta percepción visual, y debido a que las molestias se relacionan en forma más directa con la percepción que con la magnitud, el hecho de observar la vibración en objetos, vidrios, espejos, monitores, etc. va a aumentar las posibilidades de percepción y con ello las quejas, en desmedro de aquellos que no las vean.
- Los resultados de las mediciones realizadas en la oficina contigua a la sala de máquinas, en el Piso N° 29 del Edificio Millenium determinan que, según la Norma ISO 2631:2-1989, no se deberían percibir las vibraciones, debido a que los valores obtenidos se encuentran por debajo de las curvas base relacionadas a oficinas, es decir las curvas base ponderadas en un factor de 4. La comprobación se realizó con la curva en el eje z , y la combinada. Idénticos resultados se aprecian en las mediciones realizadas en las oficinas del piso N° 24 del Edificio El Bosque Norte, en el punto de medición N° 1, N° 2 y N° 3.

9. REFERENCIAS

- [1] Harris C. M. (1996). *Shock and Vibration. 4^o Edition*. McGraw-Hill, Estados Unidos.

- [2] Evaluation of human exposure to whole body Vibration, Part 2: Continuous and shock-Induced vibration in buildings (1 to 80 Hz). International Organization for Standardization ISO 2631-2, Ginebra, Suiza, 1989.

- [3] Beranek L. (1988). *Noise and Vibration Control. Revised Edition*. Washington D. C. Estados Unidos. Institute of Noise Control Engineering.

- [4] Mechanical Vibration and Shock – Mechanical Mounting of Accelerometers, International Standard ISO 5348, Estados Unidos, 1998.

- [5] ASHRAE. (1999). *ASHRAE Applications Handbook (SI)*. Capítulo 46.

- [6] Catálogo, Kinetics Noise and Vibration Control System. KINETICS Noise Control Inc. 2000.

- [7] Webb J. D. (1978). *Noise Control in Industry*. Sound Research Laboratories limited. Great Britain.

- [8] Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General requirements. International Organization for Standardization ISO 2631-1, Ginebra, Suiza, 1997.