



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN COMPUTACIÓN**  
**Secretaría de Investigación y Posgrado**



**Medición y análisis de señales de vibraciones  
mecánicas y su efecto en la salud y el confort.**

**T E S I S**

**Para obtener el grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE CÓMPUTO CON  
OPCIÓN EN SISTEMAS DIGITALES**

**Presenta**

**Norma Angélica Benítez González**

**Director de Tesis: Dr. Luis P. Sánchez Fernández**

México, D.F. Diciembre de 2011



# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 12:00 horas del día 28 del mes de noviembre de 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del:

**Centro de Investigación en Computación**

para examinar la tesis titulada:

**“Medición y análisis de señales de vibraciones mecánicas y su efecto en la salud y el confort”**

Presentada por la alumna:

<b>BENÍTEZ</b> Apellido paterno	<b>GONZÁLEZ</b> Apellido materno	<b>NORMA ANGÉLICA</b> Nombre(s)
Con registro: <b>B 0 9 1 6 7 6</b>		

aspirante de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE CÓMPUTO CON OPCIÓN EN SISTEMAS DIGITALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

#### LA COMISIÓN REVISORA

Director de Tesis

Dr. Luis Pastor Sánchez Fernández

Dr. Sergio Suárez Guerra

Dr. Oleksiy Pogrebnyak

Dra. Itzala Rabadán Malda

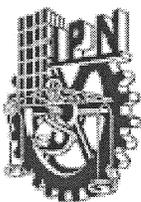
M. en C. Pablo Manrique Ramírez

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. Luis Alfonso Villa Vargas



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN  
EN COMPUTACIÓN  
DIRECCIÓN



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESIÓN DE DERECHOS**

En la Ciudad de México, Distrito Federal; el día 13 de Diciembre de 2011, la que suscribe **Norma Angélica Benítez González**, alumna del programa de la **Maestría en Ciencias en Ingeniería de cómputo con opción en sistemas digitales** con número de registro **B091676**, adscrito al **Centro de Investigación en Computación**, manifiesta que es autora intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de **Dr. Luis Pastor Sánchez Fernández** y cede los derechos del trabajo intitulado ***“Medición y análisis de señales de vibraciones mecánicas y su efecto en la salud y el confort”***, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección electrónica: [norma.benitez@gmail.com](mailto:norma.benitez@gmail.com). Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

---

**Norma Angélica Benítez González**



---

# Agradecimientos

A mi hijo, Ángel Benítez. La razón de mi vida.

Al Dr. Luis Pastor Sánchez Fernández por su dedicación y apoyo en la realización de esta tesis.

A mi comité tutorial por sus observaciones y comentarios a lo largo del desarrollo de este trabajo.

Al Centro de Investigación en Computación y a los profesores que compartieron su conocimiento participando en mi formación como estudiante de maestría. Al personal administrativo y técnico por todas las facilidades otorgadas para este fin.

A cada uno de mis cuatro compañeros de generación, por compartir esta nueva experiencia conmigo, por su ayuda y palabras de aliento y sobre todo, por su amistad.

Al Instituto Politécnico Nacional por ser mi alma mater.

Al CONACYT por el apoyo económico recibido.

*Mi mayor gratitud va para mi familia: mi madre Catalina González, mi hermana Sofía y mi hijo, quienes me han apoyado a lo largo de estos dos años y medio, porque sin ellos este trabajo no hubiera sido posible.*

**GRACIAS**



## Resumen

El cuerpo humano siempre está expuesto a vibraciones mecánicas producidas por diferentes tipos de fuentes. Las vibraciones mecánicas pueden interferir con el confort, actividades y salud. Por lo anterior es importante utilizar un método de estudio que ayude a conocer este fenómeno, evaluarlo y controlarlo.

En este trabajo se desarrolla un sistema para la medición y análisis de señales de vibraciones mecánicas para obtener una estimación del grado de su efecto en la salud y el confort en personas expuestas. Este sistema permite la medición y el análisis de señales de vibración en los dominios del tiempo y de la frecuencia a través de dos etapas, la primera para la recolección y almacenamiento de datos. La segunda consiste en el análisis de la información de las señales para obtener información sobre el grado de de alteración al confort y a la salud.

En primer lugar, se establecen los métodos de medición y evaluación para vibraciones en extremidades superiores y cuerpo completo. Posteriormente el sistema se implementa mediante un instrumento virtual programado en LabVIEW™ 8.2 en una computadora portátil, incluyendo un módulo de adquisición de datos de *National Instruments* y un acelerómetro triaxial calibrado con sus respectivos accesorios de conexión, fijación y accesorios de montaje para cada caso. También se utilizó un calibrador de aceleración para permitir la verificación del sistema. Debido a que la evaluación de la exposición a vibración mecánica depende de la respuesta del cuerpo humano, se implementan los filtros de ponderación en frecuencia correspondientes.

Para la parte de medición, el sistema está basado en las normas internacionales correspondientes para la evaluación de exposición a vibraciones ISO2631-2 e ISO5349-1. A partir de los resultados obtenidos es posible determinar el grado de alteración al confort ocasionado por la exposición a vibraciones. Mediante el análisis de la información en el dominio de la frecuencia es posible obtener rasgos característicos de las señales que posteriormente son utilizados para la creación de patrones y entrenamiento de una red neuronal tipo perceptrón multicapa para proporcionar de manera automática el tipo de posible riesgo a la salud (nulo, bajo, alto). Esta última es la parte novedosa del sistema a diferencia de otros medidores de vibración disponibles en el mercado actual. También se obtiene un equipo de menor precio.

El sistema ya completo puede ser utilizado para evaluaciones conforme a los procedimientos indicados en las normas mexicanas de evaluación de exposición de vibraciones (NOM-024-STPS-2001 y NADF-004-AMBT-2004), además de aprovechar la potencialidad del análisis de las señales para obtener posibles alteraciones en el confort y la salud.

Las aplicaciones de este sistema se realizan principalmente en herramientas eléctricas que transmiten vibraciones al cuerpo y que son utilizadas en ambientes laborales típicos en nuestro país.



---

## Abstract

Human body is always exposed to mechanical vibration from different types of sources, like machinery. Mechanical vibration can interfere with comfort, activities and health. As a result, it is important to use a study method in order to help to know this phenomenon, to assess it and control it.

This work develops a system for measurement and analysis of mechanical vibration signals in order to obtain an estimated degree of their effect on health and comfort in exposed individuals. This system allows the measurement and analysis of vibration signals in time and frequency domain by means of two stages, the first one for the collection and storage of data for outcome measurement results. The second one consists of the information analysis of the signals to obtain information on the degree of alteration on comfort and health.

First, measurement and assessment methods are established for hand – arm and whole body vibrations exposure. Then system is implemented by using a virtual instrument on LabVIEW™ 8.2 on a laptop, including a data acquisition module from National Instruments and a calibrated triaxial accelerometer along the respective connection and mounting accessories plus assemblies for each case. An acceleration calibrator was used to allow verification of the system. Because the assessment of the exposure to mechanical vibration depends on the response of the human body, frequency weighting filters are implemented.

For the measurement, the system is based on the requirements stated by international standards for vibration exposure assessment ISO2631-2 and ISO5349-1. From the results it is possible to determine the degree of comfort alteration caused by exposure to vibration. Along with the analysis in the frequency domain it is possible to obtain features which are used to create patterns and to train a back propagation neural network to provide the type of possible health risk (zero, low, high). This last part is the real difference from other types of measurement meters available on the market. The other one is the price.

The complete system can be used for the evaluation methods stated on the Mexican standards for vibration exposure (NOM-024-STPS-2001 and NADF-004-AMBT-2004), as well as to take advantage of the capacity of signal analysis for possible alterations in human comfort and health.

Applications of the system are mainly the use power tools transmitting vibration to the body by the hand and are used in typical work environments in our country.



# Índice general

Agradecimientos .....	6
Resumen .....	7
Abstract.....	8
Índice general .....	9
Índice de figuras.....	13
Índice de tablas.....	15
Glosario.....	16
<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>19</b>
Introducción.....	19
1.1 Antecedentes.....	19
1.2 Planteamiento del problema .....	20
1.3 Justificación .....	20
1.4 Hipótesis.....	21
1.5 Objetivos .....	21
1.5.1 Objetivo general .....	21
1.5.2 Objetivos particulares.....	21
1.6 Alcances del trabajo .....	22
1.7 Contribuciones.....	22
1.8 Método de investigación y desarrollo .....	23
1.9 Organización del trabajo .....	24
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>25</b>
Estado del arte.....	25
2.1 Introducción.....	25
2.2 Vibraciones mecánicas .....	27
2.2.1 Movimiento armónico simple. ....	27
2.2.2 Respuesta en frecuencia .....	28
2.3 Percepción de vibraciones en humanos.....	29
2.3.1 Vibración en cuerpo entero.....	29



2.3.2	Vibración en extremidades superiores.....	30
2.3.3	Normatividad internacional .....	30
2.3.4	Ponderación de la frecuencia.....	30
2.3.5	Niveles de Vibración .....	32
2.4	Efectos en la salud .....	33
2.4.1	Debidos a la vibración en cuerpo completo.....	33
2.4.2	Debidos a la vibración en extremidades superiores.....	33
2.5	Instrumentación de medición de vibraciones.....	34
2.5.1	Analizador de vibraciones .....	35
2.5.2	Instrumentos digitales y virtuales.....	36
2.6	Resumen del capítulo .....	36
<b>CAPÍTULO 3</b>	.....	<b>37</b>
Marco teórico .....		37
3.1	Introducción.....	37
3.2	Exposición humana a vibraciones.....	37
3.2.1	Ejes de medición .....	38
3.2.2	Evaluación de la vibración en cuerpo completo .....	39
3.2.3	Evaluación de la vibración en extremidades superiores .....	41
3.2.4	Medios físicos .....	42
3.3	Normatividad nacional sobre exposición humana a vibraciones.....	43
3.4	Procesamiento digital de señales .....	44
3.4.1	Clasificación de las señales.....	45
3.4.2	Modelo auto regresivo .....	46
3.5	Transformada de Fourier.....	49
3.6	Reconocimiento de patrones.....	49
3.7	Redes neuronales artificiales (RNA).....	50
3.7.1	Perceptrón multicapa.....	50
3.8	Filtros digitales IIR .....	51
3.9	Transformada bilineal.....	51
3.10	Resumen del capítulo.....	52



<b>CAPÍTULO 4</b> .....	53
Descripción del sistema .....	53
4.1.    Introducción.....	53
4.2.    Arquitectura del sistema de medición y análisis .....	53
4.3.    Entrada de datos y acondicionamiento de la señal. ....	55
4.3.1.    Acelerómetro mod. 3093B1.....	55
4.3.2.    Módulo de adquisición de datos mod. NI 9234.....	56
4.4.    Procesamiento de la señal .....	57
4.4.1.    Filtros de ponderación en frecuencia para exposición humana a vibraciones .....	58
4.4.2.    Filtros de ponderación de acuerdo para vibraciones en cuerpo completo.....	59
4.4.3.    Filtro de ponderación de para vibraciones en extremidades superiores. ....	60
4.4.4.    Normalización .....	62
4.4.5.    Antialiasing.....	62
4.4.6.    Ventaneo .....	62
4.4    Resumen del capítulo .....	63
<b>CAPÍTULO 5</b> .....	64
Procesamiento y análisis de datos.....	64
5.1.    Análisis en el dominio del tiempo .....	64
5.1.1.    Relación entre confort y aceleración – cuerpo entero.....	64
5.1.2.    Relación entre confort y aceleración – extremidades superiores .....	65
5.1.3.    Valor RMS actual (“Running RMS”) .....	66
5.1.4.    Análisis estadístico.....	67
5.2.    Análisis en el dominio de la frecuencia.....	67
5.2.1.    Análisis en bandas de 1/3 de octava .....	67
5.2.2.    FFT .....	68
5.2.3.    Patrón de Modelo AR .....	68
5.1.    Resumen del capítulo .....	70
<b>CAPÍTULO 6</b> .....	71
Reconocimiento de patrones y red neuronal.....	71
6.1.    Introducción.....	71
6.2.    Corpus de vibraciones .....	71



6.3.	Creación de los patrones representativos para posibles alteraciones a la salud.....	73
6.4.	Arquitectura de la red neuronal utilizada.....	75
6.5.	Topología .....	76
6.5.1.	Entrenamiento .....	77
6.6.	Resumen del capítulo .....	78
<b>CAPÍTULO 7</b>	.....	<b>79</b>
	Pruebas y resultados.....	79
7.1.	Puntos de medición.....	79
7.1.1.	En cuerpo completo .....	79
7.1.2.	En extremidades superiores .....	79
7.2.	Metodología de la medición .....	80
7.2.1.	Verificación del sistema.....	81
7.3.	Medición.....	81
7.3.1.	Características de la medición.....	81
7.3.2.	Resultados.....	82
	Conclusiones.....	83
	Trabajo futuro.....	85
	Referencias bibliográficas .....	86
	Anexo 1 Fundamentos de Acústica y Vibraciones .....	90
A1.1	Vibración libre .....	90
A1.2	Vibración libre con amortiguamiento.....	91
A1.3	Vibraciones Forzadas.....	92
A1.4	Magnitud y cuantificación de las vibraciones mecánicas .....	94
A1.5	Respuesta en frecuencia del cuerpo humano.....	94
	Anexo 2 Curvas de Ponderación en frecuencia .....	96
	Anexo 3 Información técnica acelerómetro .....	98



# Índice de figuras

<b>Figura 2.1</b> - Forma de onda de una señal periódica de vibración	27
<b>Figura 2.2</b> - Forma de onda de una función harmónica	27
<b>Figura 2.3</b> - Niveles de vibración producidos por actividades humanas.	32
<b>Figura 2.4</b> - Esquema de un instrumento de medición.	34
<b>Figura 3.1</b> - Sistema de ejes basicéntricos x, y, z para el cuerpo humano	38
<b>Figura 3.2</b> - Sistema de coordenadas para las manos.	38
<b>Figura 3.3</b> - Acelerómetros IEPE / LIVM©.	43
<b>Figura 3.4</b> - Clasificación típica de señales en análisis de vibraciones	45
<b>Figura 3.5</b> - Sistema típico de medición. $H(f)$ es la función transferencia del sistema.	46
<b>Figura 3.6</b> - Estructura general de un clasificador de patrones	49
<b>Figura 4.1</b> - Arquitectura general del sistema	53
<b>Figura 4.2</b> - Etapas físicas de la arquitectura del sistema	54
<b>Figura 4.3</b> - Sistema completo	55
<b>Figura 4.4</b> - Formas de montaje del acelerómetro para mediciones en mano brazo	56
<b>Figura 4.5</b> - Formas Módulo de adquisición de datos NI 9234.	57
<b>Figura 4.6</b> - Formas de onda de una señal de exposición a vibraciones	59
<b>Figura 4.7</b> - Formas de onda de una señal de vibraciones normalizada y ventana de Hanning	62
<b>Figura 5.1</b> - Espectro en frecuencias mediante bandas de 1/3 de octava.	67
<b>Figura 5.2</b> - Espectro en frecuencia mediante FFT	68
<b>Figura 5.3</b> - Envoltentes obtenidas mediante el modelo AR.	69



<b>Figura 6.1</b> - Señales en los ejes X, Y, Z. Cortadora	71
<b>Figura 6.2</b> - Señales en los ejes X, Y, Z. Pulidor.	72
<b>Figura 6.3</b> - Señales en los ejes X, Y, Z. Taladro	72
<b>Figura 6.4</b> - Señales en los ejes X, Y, Z. Taladro rotomartillo	72
<b>Figura 6.5</b> - Conjuntos de patrones utilizados	74
<b>Figura 6.6a</b> - FFT de una pulidora a) Sin riesgo a la salud	75
<b>Figura 6.6b</b> - FFT de una pulidora b) Con riesgo a la salud	75
<b>Figura 6.7</b> - Topología de la red neuronal utilizada en el reconocimiento de patrones	76
<b>Figura 6.8</b> - Desarrollo del entrenamiento de la red neuronal	77
<b>Figura 7.1</b> - Medición en sitio (ambiente laboral)	81
<b>Figura 7.2</b> - Medición en herramientas y equipos de trabajo	82
<b>Figura A1.1</b> - Respuesta en frecuencia de vibración forzada. Respuesta en amplitud normalizada.	93
<b>Figura A1.2</b> - Modelo mecánico simplificado del cuerpo humano	95
<b>Figura A2.1</b> Curvas de ponderación $W_k$ , $W_d$ , $W_f$	96
<b>Figura A2.2</b> Curvas de ponderación $W_c$ , $W_e$ , $W_j$	96
<b>Figura A2.3</b> Curva de ponderación $W_m$	97
<b>Figura A2.3</b> Curva de ponderación $W_h$	97
<b>Figura A3.1</b> Especificaciones de diseño	98



# Índice de tablas

<b>Tabla 4.1</b> - Características Dytran Mod. 3093B1	55
<b>Tabla 4.2</b> - Ponderaciones en frecuencia para exposición a vibraciones	58
<b>Tabla 4.3</b> - Valores numéricos utilizados en las ecuaciones 4.1 a 4.4 $\omega = 2\pi f$ .	60
<b>Tabla 4.4</b> - Valores numéricos utilizados en las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.6 $\omega = 2\pi f$ .	61
<b>Tabla 4.5</b> - Frecuencias mínima de muestreo requeridas para cada filtro	61
<b>Tabla 5.1</b> - Relación entre confort y Aceleración – Cuerpo Completo	65
<b>Tabla 5.2</b> - Relación entre confort y Aceleración – Extremidades superiores	66
<b>Tabla 6.1</b> - Relación de equipo y herramienta evaluado	73
<b>Tabla 6.2</b> - Numero de patrones generados para el entrenamiento	77



# Glosario

**$a_w(t)$**  - Aceleración instantánea en un eje ponderada en frecuencia en el tiempo  $t$ .

**Aceleración** - Variación de la velocidad, por unidad de tiempo, de un cuerpo en movimiento ( $m/s^2$  o gravedad).

**Aceleración raíz cuadrática media ponderada ( $a_w$ ,  $m/s^2$ )** - Es la magnitud de la aceleración de la vibración calculada a partir de alguna de las ponderaciones de las frecuencias contenidas en el intervalo de frecuencia de interés.

**Acelerómetro** - Elemento transductor que se sujeta a la superficie que vibra y convierte el movimiento mecánico en una señal eléctrica equivalente.

**Acoplamiento** - La unión entre la mano y la fuente que vibra. La integridad del contacto entre la mano y la superficie del asa de la herramienta que vibra.

**Análisis espectral** - Es el gráfico que muestra cómo es la descomposición de una señal ondulatoria (sonora, luminosa, electromagnética, etc.) en el dominio de la frecuencia.

**Analizador de señal** - Es un instrumento que permite medir variables eléctricas separándolas en componentes de diferentes frecuencias y que incluye filtros ya sea digitales o analógicos para realizar la separación de la señal temporal en sus diferentes componentes, en el dominio de la frecuencia.

**Backpropagation** - Algoritmo de entrenamiento para redes neuronales multicapa. Utiliza una metodología de aprendizaje de gradiente descendiente para actualizar los pesos a través de la topología.

**Calibrador de acelerómetros** - Instrumento que genera una vibración y de amplitud y frecuencia conocidas. Se emplea para la verificación en campo de sistemas de medición de vibraciones.

**Condiciones normales** - Situación de operación estable, misma que se determina a través del comportamiento de variables tales como el ritmo de operación y producción, número de máquinas y equipos en operación ordinaria, programa de mantenimiento, demanda de productos o subproductos que en su caso representen una jornada laboral de trabajo o un día ordinario de actividades.

**Desplazamiento** - Distancia entre la posición normal de reposo de un objeto y de su posición en un momento dado del ciclo de la vibración.

**Época** - ciclo en el que se adquieren y procesan por completo los datos de entrada a una red neuronal durante su entrenamiento.

**FFT – Fast Fourier Transform** – Transformada rápida de Fourier.



**Frecuencia ( $f$ )** - Inverso del período de una señal. Se mide en ciclos por segundo o Hertz (Hz).

**Fuente emisora** - Aquellas fuentes que emitan de forma continua o discontinua vibraciones mecánicas.

**Gravedad o "G"** - La fuerza normal de la gravedad en la Tierra ( $1g = 9.81 \text{ m/seg}^2$ ).

**H** - Función completa de ponderación en frecuencia.

**$K_i$**  - Constantes multiplicadores aplicadas a la aceleración ponderada en frecuencia para cuerpo completo para el eje  $i$ .

**Instrumentación de medición de vibración** - Combinación de un transductor de vibración, procesador de señal y pantalla, siendo un solo instrumento o una serie de instrumentos, los cuales son capaces de medir parámetros de medición relacionados a la respuesta humana a la vibración.

**Intervalo de la banda limitada en frecuencia** - Intervalo de frecuencia definido por el componente limitador de banda de una ponderación en frecuencia.

**Intervalo nominal de frecuencia** - Intervalo de frecuencia definido en la norma o procedimiento de medición de interés.

**ISO** - *International Organization for Standardization*— Organización internacional para la normalización.

**LabVIEW™** - *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*.

**Límites de la banda de ponderación en frecuencia** - Componente de la ponderación en frecuencia definida por filtros limitadores de banda pasa bajos y pasa altos.

**MATLAB®** - *Matrix Laboratory*.

**Medición Basicéntrica** - Medición de la vibración directamente sobre la herramienta.

**Medición Basidinámica** - Medición de la vibración indirectamente sobre el nudillo.

**MTVV** - *Maximum transient vibration value* – *Valor Máximo transitorio de Vibración*.

**Muestreo** - Operación de crear una secuencia de números o muestras, a partir de una señal analógica en la que cada valor equivale a la magnitud de la misma en un instante de tiempo.

**Parestesia** - Sensación de hormigueo, punzadas o ardor de la piel.

**Punto de medición** - Sitio específico para cuantificar las emisiones de vibraciones mecánicas que emite la fuente emisora.

**RMS** - Valor efectivo de una señal.



**RNA** - Red neuronal artificial.

**s** - variable de la transformada de Laplace.

**Síndrome de Vibraciones en Extremidades Superiores (SVES)** - Término general para una condición de salud causada por la transferencia de vibraciones de herramientas y equipos energizados a la mano, muñeca y antebrazo del operador, usualmente con la presencia de frío. El SVES es causado por el uso repetido y frecuente de herramientas manuales que vibran. El SVES también es conocido como el “síndrome del dedo blanco” (SDB), “el dedo muerto” o el Síndrome de Raynaud.

**Sistemas HVAC** – Sistemas de calentamiento, ventilación y aire acondicionado.

**T** - Duración de la medición.

**t** - Tiempo instantáneo.

**Topología** - Estructura en la que las neuronas son conectas en una red neuronal artificial.

**Transductor** - Dispositivo empleado para transformar un tipo de energía en otro.

**Vector** - Cantidad que es determinada por completo por su magnitud y dirección.

**Velocidad** - Magnitud física que representa el espacio recorrido en una unidad de tiempo (m/s).

**Vibración** - Variación, con respecto al tiempo, de la amplitud de una onda (desplazamiento, velocidad y aceleración) que describe el movimiento o posición de un sistema mecánico, cuando la amplitud es alternativamente mayor y menor a algún valor promedio o referencia.

**Vibración Aleatoria** - Vibración que no puede predecirse en ningún instante de tiempo.

**Vibración en Extremidades Superiores** - Vibración en los miembros superiores del ser humano.

**Vibración Mecánica** - Vibración transmitida (o afectando) al hombre por el movimiento o vibración de estructuras u otras fuentes.

**Valor de la dosis de vibración (VDV,  $m/s^{1,75}$ )** - parámetro empleado para cuantificar un tipo de exposición humana a la emisión de vibraciones mecánicas en función del tiempo.

**Valor total de vibración** - Vibración combinada de los tres ejes de vibración traslacional.

**Valor de vibración pico** - El modulo máximo de los valores pico (negativos y positivos) instantáneos de la aceleración ponderada en frecuencia.

**$W_x$**  - Ponderación en frecuencia  $x$ .



# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1 Antecedentes

La vibración es un agente o fenómeno físico complejo que puede producir diversidad de efectos nocivos sobre el cuerpo humano que van desde sensación de incomodidad o molestia hasta efectos en tejidos blandos y sistema circulatorio. Las vibraciones también pueden influir en la capacidad de ejecución de tareas o representar un riesgo para la salud o la seguridad de las personas. Para valorar objetivamente estos efectos es necesario realizar un análisis con gran detalle tanto en el dominio temporal como en el espectral de estos fenómenos.

Las vibraciones mecánicas pueden medirse en todos los ámbitos donde sean producidas siendo relevantes aquellas situaciones donde exista exposición humana, (para fines de salud y legislaciones) ya sea por maquinaria (sistemas HVAC, bombas, compresores, ascensores, etc.), vehículos (tierra, mar y aire), actividades (industriales, ocio, domésticas) y vibraciones estructurales en edificios percibidas por el cuerpo humano. El propósito principal de la medición y análisis de las vibraciones mecánicas es su control y prevención.

Las vibraciones que afectan al cuerpo humano se dividen en dos clases de acuerdo a la parte del cuerpo expuesta: vibraciones en cuerpo completo (de pie y sentado) y vibraciones en mano-brazo o extremidades superiores (principalmente por uso de herramientas eléctricas y manubrios.).

De acuerdo a la normatividad nacional e internacional, las mediciones de vibración deben efectuarse mediante la obtención de la aceleración generada en tres ejes ortogonales. Las señales obtenidas deben ponderarse en frecuencia mediante filtros que representen las funciones de transferencia del cuerpo humano o de las partes expuestas a vibraciones. Finalmente las señales obtenidas se combinan y analizan para obtener una variedad de parámetros que deben ser comparados contra los límites y recomendaciones establecidas a nivel nacional o internacional, según sea el caso.

Actualmente la instrumentación disponible para este tipo de ensayos puede ser de bajo o alto costo. Los sistemas de bajo costo tienen un bajo desempeño y no cuentan con capacidad de análisis de señales y únicamente deben ser utilizados para mediciones de propósito general que no requieren mayor información ni precisión. Por el otro lado, los sistemas de alto costo, tienen un muy buen desempeño y cuentan con herramientas sofisticadas de análisis pero su desventaja es el precio. Otro punto importante a mencionar es que la mayoría de los equipos están diseñados para medir de acuerdo a normas internacionales cuyo método no coincide completamente con los procedimientos establecidos en la normatividad nacional vigente, por lo que usualmente se presentan dos situaciones



para cumplir con esta necesidad: utilizar un equipo de muy alto costo o usar dos (uno para medición en cuerpo entero y otro para extremidades superiores) con el respectivo coste de ambos.

Por todo lo anterior, en este trabajo de investigación, se propone como línea principal de estudio la realización de un sistema completo para medición y análisis detallados de la exposición humana a vibraciones por fuentes cotidianas y de trabajo, y sus efectos a la salud y al confort humanos.

## 1.2 Planteamiento del problema

Aunque hoy en día existen equipos diversos en el mercado internacional para la medición de vibraciones, no existen en el país desarrollos nacionales de sistemas para la medición, análisis y evaluación de vibraciones mecánicas con efectos nocivos sobre la salud y el confort.

Se requiere crear sistemas computacionales, que permitan extraer y reconocer características relevantes de las vibraciones mecánicas que afecten la salud y el confort, dependiendo del tiempo y la forma de exposición a las mismas.

## 1.3 Justificación

La exposición humana a vibraciones es muy común en la vida diaria o en el trabajo. Es un factor mecánico que tiene influencia en la fisiología y psicología humana que además de afectar el confort, puede ser un factor de riesgo para la salud, por lo que estudiar la exposición a vibraciones humanas con herramientas computacionales puede arrojar resultados significativos.

En primer lugar, este trabajo de investigación es conveniente debido a la necesidad de contar con un sistema integral que sea capaz de medir y evaluar la exposición humana a vibraciones mecánicas de acuerdo a los procedimientos oficiales vigentes en nuestro país (NOM-024-STPS-2001).

Al ser un desarrollo nacional, podrá ser utilizado por los especialistas en el campo de las vibraciones, salud e higiene en el trabajo sin el inconveniente de tener que utilizar uno o más equipos costosos, facilitando la realización de este tipo de estudios bajo las condiciones actuales más comunes de la población expuesta a vibraciones en México. En la medida que este tipo de estudios se realice con mayor frecuencia y facilidad, es posible que en un futuro que se desarrollen nuevas soluciones administrativas u operativas para el problema de la exposición a vibraciones.

En segundo lugar, es importante que además de realizar la medición y obtención de datos y señales, se obtengan patrones característicos de la señales de exposición a vibraciones para poder obtener posibles efectos en la salud y el confort de las personas expuestas. Esto es una ventaja a favor del sistema con respecto a la mayoría de los equipos que existen actualmente en el mercado.

El sistema propuesto se desarrolla principalmente en LabVIEW, ya que es un programa enfocado hacia la instrumentación virtual, permite una fácil integración con tarjetas de adquisición y



procesamiento de datos, y es compatible con herramientas de desarrollo similares y puede trabajar con programas como MATLAB® o Excel.

El sistema podrá ser utilizado en puestos fijos de trabajo y en aquellos donde no interfiera con la seguridad de la persona a evaluar.

## 1.4 Hipótesis

Es posible a partir un sistema computacional que incluya un acelerómetro triaxial, una tarjeta de adquisición de datos de rango dinámico de 24 bits y una PC portátil, poder evaluar la exposición humana a vibraciones.

A partir de la extracción de parámetros de las señales de vibración triaxial obtenidas, es posible construir un modelo computacional que pueda brindar información sobre posibles efectos a la salud y confort por dicha exposición.

## 1.5 Objetivos

### 1.5.1 Objetivo general

Desarrollar un sistema para el análisis de señales generadas por la exposición humana a vibraciones mecánicas, que permita evaluar sus efectos sobre la salud y el confort.

### 1.5.2 Objetivos particulares

- Diseñar y programar el sistema que permita obtener señales de vibraciones mecánicas para personas expuestas.
- Evaluar vibraciones mecánicas, que por sus características y tiempo de exposición, sobre personas, sean capaces de alterar la salud y el confort.
- Analizar señales de vibraciones mecánicas y extraer características importantes sobre la salud y el confort para personas expuestas.
- Construir un modelo mediante una red neuronal para el reconocimiento de patrones de exposición humana a vibraciones.
- Realizar pruebas de laboratorio y de campo que permitan evaluar el sistema.



## 1.6 Alcances del trabajo

En esta investigación se desarrolla un sistema que incluya los siguientes componentes y técnicas:

- Un instrumento virtual para la adquisición de señales que permita la medición y evaluación de la exposición de vibraciones en cuerpo completo (WBV por sus siglas en inglés, *whole body vibration*) y en extremidades superiores (HAV, *Hand-arm vibration*) ocasionadas por fuentes cotidianas o de trabajo más comunes, bajo los procedimientos oficiales y normativos vigentes en México (NOM-024-STPS-2001). Además, se podrán obtener resultados de acuerdo a los procedimientos indicados en normas internacionales (ISO 2631-1 y 2 e ISO 2451-1).
- Utilizar técnicas de procesamiento digital de señales y de extracción de parámetros característicos de las señales obtenidas en el punto anterior.
- Programar una red neuronal que permita reconozca los posibles efectos en la salud y el confort más conocidos y documentados actualmente para las fuentes de exposición más utilizadas.
- Generar una base de datos con los resultados de las pruebas del sistema.

## 1.7 Contribuciones

Tomando como base la tecnología actual para el diseño de instrumentación virtual, las contribuciones obtenidas con este trabajo de investigación son las siguientes:

- Un sistema de medición para exposición humana a vibraciones, que pueda ser utilizado por profesionales de la salud y la higiene industrial.
- Un sistema para el análisis de señales generadas por la exposición humana a vibraciones mecánicas basado en sus características espectrales, que permita proporcionar información sobre sus efectos sobre la salud y el confort.



## 1.8 Método de investigación y desarrollo

La metodología utilizada para resolver el problema anteriormente expresado durante esta investigación consiste en:

- Documentación de las técnicas y equipos existentes, así como de información de las causas y efectos más comunes de la exposición humana a vibraciones mecánicas.
- Obtener muestras de señales de vibración mediante el montaje de un acelerómetro triaxial miniatura en fuentes y actividades comunes de exposición humana.
- Realizar la adquisición de datos, desde el transductor al instrumento virtual operando en una computadora portátil, vía USB.
- Utilizar técnicas de procesamiento digital de señales, como lo son filtrado digital de acondicionamiento y ponderación de la misma y FFT (*Fast Fourier Transform*), entre otras.
- Diseñar el instrumento virtual que permita obtener resultados para la medición y evaluación conforme a la normatividad mexicana
- Utilizar técnicas de extracción de parámetros característicos de las señales obtenidas.
- Probar y entrenar diversas topologías existentes de redes neuronales artificiales con la arquitectura suficiente para reconocer los posibles efectos a la salud y confort en personas expuestas a fuentes comunes de vibraciones.
- Evaluación de los resultados de las dos fases anteriores y seleccionar el método de mejor desempeño.
- Integración del sistema completo que incluya todos los pasos anteriores.



## 1.9 Organización del trabajo

La presente tesis se encuentra conformada por los siguientes capítulos:

**Capítulo 1. Introducción** – se especifican objetivos y se propone la hipótesis que orientará el desarrollo de esta investigación, su alcance, y las aportaciones al término de la misma.

**Capítulo 2. Estado del Arte** – se revisa el estado actual de los sistemas y técnicas tradicionales y digitales implementadas para la solución de problema planteado en el capítulo 1.

**Capítulo 3. Marco teórico** – Se describe toda la teoría utilizada en el proyecto de investigación.

**Capítulo 4. Descripción del sistema** – Se describe el funcionamiento general del sistema y cada una de sus partes: Adquisición y procesamiento de las señales, análisis estadístico, análisis espectral y las posibles afectaciones en el confort y la salud.

**Capítulo 5. Medición y análisis de datos** – Se describen los rasgos característicos que se deben obtener para evaluar las señales de vibración, así como los análisis que se realizan en el dominio del tiempo y la frecuencia.

**Capítulo 6. Reconocimiento de patrones y red neuronal** – Se indica la forma en que se obtienen los patrones de vibración para los efectos de confort y salud y el modelo de la red neuronal utilizada para realizar la identificación de los patrones mencionados.

**Capítulo 7. Pruebas y resultados** – Se describe la metodología utilizada durante las pruebas de campo y se analizan los resultados obtenidos.



## Capítulo 2

### Estado del arte

#### 2.1 Introducción

Los conceptos de vibración han sido utilizados por varios siglos en aplicaciones prácticas. Los avances recientes son significativos y las aplicaciones correspondientes son numerosas.

Los orígenes de la teoría de las vibraciones puede remontarse mucho tiempo atrás cuando el ser humano diseñó y desarrolló los primeros instrumentos musicales (“buenas vibraciones”) ya que hay evidencias de que ya existían instrumentos musicales en culturas antiguas hace miles de años A.C. y de que ellos experimentaban con las características de los sonidos y vibraciones desde puntos de vista prácticos y analíticos.

En el campo científico es posible remontarse hasta el filósofo griego, matemático y músico Pitágoras (582 a 502 A.C.) que experimentó con los sonidos que hacían los herreros y los relacionó a la música y a la física. Otro ejemplo corresponde a los chinos que desarrollaron un sismógrafo mecánico en el siglo II D.C.

Sin embargo, el estudio de las vibraciones y su análisis, y de la acústica en general, es relativamente joven. Hasta finales del siglo XIX, la acústica era considerada una ciencia inexacta y, en consecuencia, no resulta extraño que continuamente aparecieran explicaciones esotéricas a través de las cuales se pretendían aclarar los “misterios” de esta materia. [1]

Posteriormente, la fundación de la teoría moderna de la vibración probablemente fue llevada a cabo por científicos y matemáticos tales como Galileo (1564-1642), quien comenzó investigando las oscilaciones de un péndulo y dedujo la relación existente entre el período del péndulo y su longitud y posteriormente pensó en la idea del reloj del péndulo, construido posteriormente por Huygens en 1656; Robert Hooke (1635–1703) famoso por la Ley de Hooke, quien experimentó con vibración en cuerdas; Sir Isaac Newton (1642–1727), quien contribuyó con el cálculo y las leyes de movimiento para analizar las vibraciones; Daniel Bernoulli (1700–1782) y Leonard Euler (1707–1783), quienes obtuvieron la ecuación diferencial que gobierna la vibración en vigas; Joseph Lagrange (1736–1813), que estudió la vibración en cuerdas y desarrolló las ecuaciones que describen el movimiento de los sistemas dinámicos por medio de cantidades escalares (energía cinética y potencial) en lugar de vectoriales; Charles Coulomb (1736–1806), que estudio la fricción y vibración torsional; Joseph Fourier (1768–1830), que desarrolló la teoría del análisis de frecuencia de señales; Simeon-Denis Poisson (1781–1842), quien analizó la vibración de membranas y también analizó la elasticidad (coeficiente de Poisson); Rayleigh (1842 -1919) investigó e hizo contribuciones a la teoría del sonido y vibraciones y



desarrolló técnicas computacionales y un método numérico para determinar la frecuencia natural más baja de un sistema

Como resultado de la revolución industrial y asociada con el desarrollo de la maquinaria en general, nació la necesidad de desarrollar el análisis, medición, control y diseño de las vibraciones industriales así como de la exposición de los trabajadores a este agente físico. Otras contribuciones notables van para científicos de más recientes en el campo industrial como Kirchhoff, que hizo estudios de vibración en placas; Rayleigh (1842-1919), que realizó contribuciones a la teoría del sonido y vibraciones y desarrolló técnicas computacionales para determinar las frecuencias naturales; Poincaré (1854–1912), que analizó las vibraciones no-lineales y Stodola (1859–1943), que estudió la vibración en rotores, juntas y sistemas continuos.

Con el paso del tiempo, en una época caracterizada por descubrimientos revolucionarios en campos como la física atómica, el progreso del estudio y análisis del sonido y vibraciones fue lento debido a la falta de equipamiento electrónico para poder hacer mediciones objetivas. La acústica y el estudio del ruido y vibraciones se consolidaron como una nueva ciencia a partir de los años 1930, de la mano con el desarrollo de transductores y amplificadores de válvulas al vacío y su utilización como herramientas en la medición en trabajos de campo. Posteriormente con la evolución de equipos electrónicos de medición, fue posible relacionar los resultados objetivos obtenidos durante las mediciones con una serie de parámetros subjetivos tales como confort y alteraciones a la salud, entre otros varios.

Otros ingenieros modernos distinguidos que realizaron contribuciones importantes a estudio y práctica de la vibración incluyen a Timoshenko, Den Hartog, Clough, y Crandall [2].

Mucho del desarrollo reciente en el campo de las vibraciones han sido motivados probablemente por dos razones principalmente:

1. Las velocidades de operación de maquinaria se ha duplicado en los últimos 50 años y por lo tanto, las cargas de vibración ocasionadas por excitación han aumentado así como los problemas que se ocasionan en maquinaria y aquellas transmitidas a los seres humanos.
2. Consideraciones de masa, energía y eficiencia han resultado en diseños óptimos y ligeros de estructuras y maquinarias fabricadas a partir de partes pequeñas y de alta dureza.

Debido a lo anterior, continuamente se están realizando mayores aportes a la teoría de vibraciones

## 2.2 Vibraciones mecánicas

### 2.2.1 Movimiento armónico simple.

La vibración en su sentido general es un movimiento periódico, es decir, un movimiento que se repite después de un intervalo de tiempo llamado período de vibración y que se designa con el símbolo  $T$ . Una gráfica de desplazamiento  $x$  en el tiempo  $t$  puede describir una curva de complejidad considerable. En la figura 2.1 se muestra una señal de vibración.

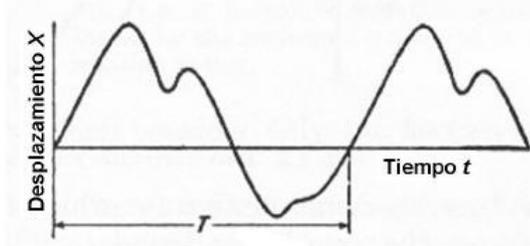


Figura 2.1 Forma de onda de una señal periódica de vibración

El tipo más simple de movimiento periódico es el *movimiento armónico* [3] y se puede expresar mediante

$$x = A \sin(\omega t) \quad 2.1$$

- Donde
- $x$  es el desplazamiento del movimiento armónico simple,
  - $A$  El valor máximo de desplazamiento ó *amplitud* de la vibración.
  - $\omega$  es la frecuencia angular y
  - $t$  es el tiempo en el que transcurre el movimiento.

En la Figura 2.2, se representa una pequeña oscilación de un péndulo simple.

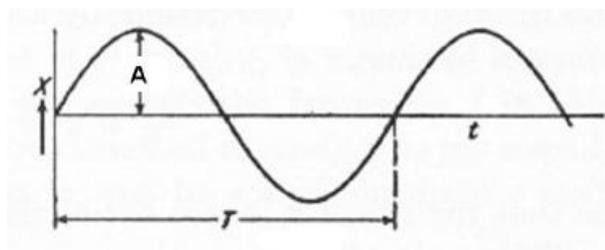


Figura 2.2 Forma de onda de una función armónica.



El período  $T$  se mide en segundos (s); su recíproco  $f = 1/T$  es la *frecuencia* de la vibración, que se mide en ciclos por segundo o *Hertz* (Hz). En la expresión anterior  $\omega$ , la frecuencia angular, definida como  $\omega = 2\pi f$  en radianes por segundo, indica que un ciclo completo de vibración toma lugar cuando  $\omega t$  ha pasado por los  $360^\circ$  ( $2\pi$  radianes), por lo que cuando  $\omega t = 2\pi$ , el intervalo de tiempo  $t$  es igual al periodo  $T$ .

En el movimiento armónico simple, la velocidad se obtiene al diferenciar el desplazamiento  $x$  con respecto al tiempo  $t$ . La velocidad también es armónica

$$v = \frac{dx}{dt} = \dot{x} = A\omega \cos(\omega t) \quad 2.2$$

De igual forma, la aceleración se obtiene al diferenciar la velocidad  $v(\dot{x})$  con respecto al tiempo  $t$  obteniéndose un resultado armónico

$$a = \frac{d^2x}{dt^2} = \ddot{x} = -A\omega^2 \sin(\omega t) \quad 2.3$$

Una medida importante de la vibración es el valor raíz cuadrático medio (r.m.s.) de la *aceleración*. El valor r.m.s. es proporcional al contenido de energía de la vibración medida. Se ha adoptado utilizar el valor r.m.s. para establecer los métodos de medición de la exposición a vibración en seres humanos, así como los límites recomendados de exposición.

Por otro lado, la explicación física del fenómeno de vibración tiene que ver con la relación entre energía potencial y cinética. Un sistema que vibra debe tener un componente que almacene energía potencial y libere energía cinética en forma de movimiento o vibración de una masa. Una de las metas del análisis de vibración, es la de predecir la respuesta o movimiento de un sistema que vibra, establecer modelos matemáticos que describan este fenómeno y finalmente buscar las soluciones apropiadas a los mismos.

Se recomienda el anexo 1 en el que se encuentra mayor información sobre los conceptos generales de acústica y vibraciones.

## 2.2.2 Respuesta en frecuencia

La solución a un problema de vibración, puede verse como una relación entrada / salida, donde la entrada es la fuerza y la salida la vibración.

$$X(\omega) = H(\omega) \cdot F(\omega) \quad 2.4$$

La función de la respuesta en frecuencia, que representa la relación entre los espectros de la entrada y la salida, está dada por

$$H(\omega) = \left| \frac{X(\omega)}{F(\omega)} \right| \quad 2.5$$



De esta forma se puede observar que la vibración resultante del sistema depende de la fuerza de entrada y de la respuesta del sistema al que se le aplica la fuerza. Una vez obtenida la ecuación de transferencia del sistema, es posible modelar su respuesta a distintas entradas. Otra aplicación de este modelado es la de obtener las características de un sistema que responda a una señal periódica en la entrada, con una respuesta deseada.

## 2.3 Percepción de vibraciones en humanos

El cuerpo no tiene un único órgano para percibir señales de vibración, sino que combina señales visuales, vestibulares, somáticas y auditivas. Cada uno de estos sistemas percibe la vibración en más de una forma. Los movimientos en el cuerpo humano han sido objeto de investigación desde el siglo V, en el que los primeros científicos e investigadores intentaron modelar el sistema músculo esquelético humano. En la actualidad, se han utilizado técnicas modernas para evaluar el movimiento producido por vibraciones que pueden causar daños a la salud. Una de esas técnicas es la medición directa mediante el uso de acelerómetros, que fue sugerida por vez primera en la década de 1970 pero que ha sido refinada y perfeccionada durante los últimos 10 a 20 años aproximadamente [4].

Las vibraciones humanas se definen como el efecto de la exposición a vibraciones mecánicas en el cuerpo humano y existen dos tipos principales: *vibraciones en cuerpo entero* y *vibraciones en extremidades superiores*. Ambos son distintos y “mecánicamente diferentes” por lo que se estudian de manera separada. [5]

### 2.3.1 Vibración en cuerpo entero

Para las personas es común experimentar vibración en todo el cuerpo todos los días. Un empleado en una oficina puede viajar al trabajo en coche o autobús. Un trabajador en una fábrica puede utilizar maquinaria pesada; un trabajador agrícola puede manejar un tractor. Otros trabajadores como choferes, tripulaciones aéreas, etc., pueden estar expuestos también a vibraciones en todo el cuerpo. En estos y otros muchos ambientes, las personas están expuestas a vibración, en un rango muy amplio de parámetros tales como magnitud, formas de onda y duración [6].

La exposición a vibraciones de cuerpo entero (o completo) ocurre cuando el cuerpo está apoyado en una superficie vibrante. Las vibraciones de cuerpo completo se presentan en todas las formas de transporte y cuando se trabaja en la cercanía de maquinaria industrial.

Actualmente, la investigación de las vibraciones humanas es llevada a cabo en ambientes laborales y los resultados utilizados para establecer normas y procedimientos nacionales e internacionales que permitan evaluar la exposición humana a vibraciones.

La exposición a vibraciones de cuerpo completo puede causar daño físico permanente o perturbar el sistema nervioso.



### 2.3.2 Vibración en extremidades superiores.

La vibración en mano brazo es el caso específico de la transferencia de la vibración proveniente de una herramienta o pieza de trabajo a la mano y brazo de un trabajador. El nivel de la vibración en mano-brazo se determina mediante la medición de la vibración de la herramienta o pieza que sostiene el trabajador.

El síndrome de vibración en mano brazo es una enfermedad que involucra disturbios circulatorios, sensoriales y motrices, y músculo esqueléticas. Desde inicios del siglo XX se tenía conocimiento de que este tipo de vibraciones afectaba a manos y brazos, pero no fue sino hasta 1983 que los científicos dieron una definición que incluyera los daños señalados anteriormente.

### 2.3.3 Normatividad internacional

A través de muchos años de investigación se ha llegado a algunos métodos de medición y evaluación, muchos de los cuales se encuentran recopilados en las Normas Internacionales, en los que se engloba el estado del arte en cuanto a métodos de medición de vibración y de las que se derivan la mayoría de los procedimientos locales, entre ellos variantes como las Norma Mexicana. Se utiliza el valor cuadrático medio de la aceleración de la vibración como indicador principal de la medición.

La norma ISO 2631 trata esencialmente de las vibraciones transmitidas al conjunto del cuerpo por la superficie de apoyo. Su campo de aplicación se centra en las vibraciones transmitidas al cuerpo humano por superficies sólidas en un intervalo de frecuencias entre 1Hz a 80Hz, para vibraciones periódicas, aleatorias o no periódicas.

Dado que las vibraciones no son igualmente perjudiciales en cualquier dirección que se produzcan, esta norma define tres ejes que “orientan” el cuerpo humano en el espacio tridimensional. Por lo que las señales de aceleración de deben medir en las direcciones del eje z (verticales) y en dirección de los ejes x e y (laterales).

La norma internacional ISO5349 trata sobre el sistema mano-brazo, denominado como extremidades superiores. El intervalo de frecuencias de interés se encuentra comprendido entre 12 y 16 Hz.

### 2.3.4 Ponderación de la frecuencia

La sensibilidad del cuerpo humano a la vibración mecánica es dependiente tanto de sus componentes de frecuencia y de la dirección de la excitación. Estos factores necesitan ser tomados en cuenta para evaluar los efectos dañinos de la vibración, por lo que la ponderación de frecuencias modela la respuesta del cuerpo a la exposición a vibración, de la misma manera que sucede en los casos de exposición a ruido u otros fenómenos físicos.

Para mayor información sobre la respuesta en frecuencia del cuerpo humano, se recomienda consultar el anexo 1.



La ponderación en frecuencias parte de medir una señal de vibración mecánica dentro del intervalo de frecuencias dentro del intervalo de sensibilidad humano. Aquellas frecuencias a las cuales el cuerpo es más sensible se les proporciona una mayor ponderación que aquellas a las que el cuerpo es menos sensible. Esta ponderación proporciona una buena correlación entre la vibración medida y el valor subjetivo de la sensibilidad o impacto producidos por la vibración.

Para la vibración en todo el cuerpo, las tres ponderaciones de frecuencia más utilizadas son  $W_b$ ,  $W_k$  y  $W_d$ . Por otro lado, existen  $W_b$  y  $W_k$  que son usados para vibración vertical únicamente y están caracterizadas por un pico a 5 Hz.  $W_k$  es aproximadamente 25% más alta que  $W_b$  debajo de los 3 Hz y menos que  $W_b$  a frecuencias sobre los 12 Hz. Estas diferencias son pequeñas cuando se comparan diferencias entre sujetos. Estas son definidas en la norma ISO 2631-1 de 1997. Otra ponderación mayormente utilizada por incluir los efectos de las anteriores es la ponderación  $W_m$  para evaluar la exposición de vibraciones en cualquier ambiente y posición, esta última es definida en la norma ISO 2631-2 de 2003.

Es posible encontrar documentos refiriéndose a las ponderaciones de la norma ISO de versiones anteriores a 1997. Estas ponderaciones son diferentes a las que se utilizan actualmente. Otras ponderaciones incluyen  $W_e$  para vibración rotacional y  $W_c$  para vibración del respaldo de asientos.

Para extremidades superiores la única ponderación utilizada es  $W_h$ . Esta es definida en la norma ISO 5349-1 de 2001.

Las gráficas de estas ponderaciones se pueden consultar en el Anexo 2.

### 2.3.5 Niveles de Vibración

El valor de la aceleración ponderada en frecuencia  $a_{w(rms)}$  asociada con la exposición laboral en extremidades superiores normalmente varía en el intervalo de 2 a 50  $m/s^2$ , mientras que para vibraciones de cuerpo completo van de 0.1 a 40  $m/s^2$ . Algunas situaciones típicas de trabajo y entretenimiento se ilustran en la figura 2.3, junto con su respectivo intervalo de niveles de aceleración r.m.s. ponderada en frecuencia. Se indican las actividades de mayor interés.

(m/s <sup>2</sup> )	← Aceleración ponderada en frecuencia →			Nivel (dB)
	Extremidades superiores	Cuerpo Completo	En Edificios	
100				150
10				140
1				120
0.1				100
0.01				80

Figura 2.3 Niveles de vibración producidos por actividades humanas. [5]



## 2.4 Efectos en la salud

### 2.4.1 Debidos a la vibración en cuerpo completo.

Uno de los principales problemas derivados de los síntomas descritos en los estudios sobre el efecto de la vibración, es la identificación de la gran variedad de factores que los pueden causar. Por lo que es importante establecer causalidad entre el patógeno observado (la vibración) y la respuesta en el cuerpo humano.

El problema de relacionar un patógeno específico a una enfermedad específica no es exclusivo de la vibración en todo el cuerpo. Los epidemiólogos han desarrollado técnicas que pueden ser útiles para establecer relaciones. El criterio de Bradford Hill [7] provee un marco epidemiológico de nueve partes para establecer lazos o correlaciones y ayudan a dar soporte a la relación, pero ninguno determina el lazo de forma irrefutable. Los otros criterios son difíciles de probar. Por ejemplo, no es ético intentar deliberadamente causar daño a través de la aplicación de vibración (como lo requiere la evidencia de criterio experimental). De forma similar, otros patógenos son conocidos para dolor de espalda (criterio de especificidad)

Los datos epidemiológicos para distintos tipos de exposición específica, han sido reportados repetidamente desde los años cincuenta. Es útil por lo tanto que los estudios epidemiológicos de vibración en todo el cuerpo sean revisados periódicamente [8] [9].

Algunos efectos estudiados importantes que se han realizado:

- Efectos de la exposición a vibraciones en la medicina de la aviación
- Efectos de la exposición a vibraciones relacionados con el transporte terrestre
- Efectos de la exposición a vibraciones relacionados con el área laboral
- Efectos metabólicos de la exposición a vibraciones
- Efectos cardio-respiratorios
- Efectos en el sistema nervioso central y periférico de la vibración en todo el cuerpo

### 2.4.2 Debidos a la vibración en extremidades superiores.

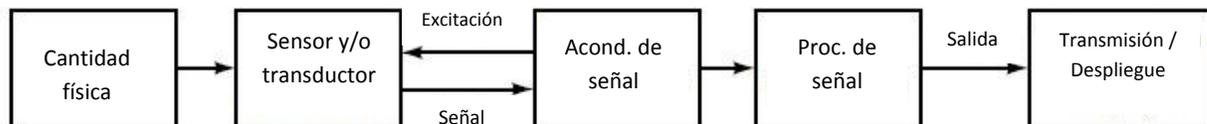
La exposición regular y frecuente a niveles altos de vibración puede generar lesiones permanentes. Esto es más común cuando el uso de herramientas o procesos que vibran son una actividad regular durante la realización de una tarea. La exposición regular a las VES puede generar una serie de lesiones permanentes en las manos y antebrazos que son conocidas como Síndromes por Vibraciones en Extremidades Superiores (SVES). Las lesiones pueden incluir los daños siguientes:

- Sistema Circulatorio (Síndrome del dedo blanco)
- Daño Nervioso Sensorial
- Daño en los músculos, huesos y articulaciones

## 2.5 Instrumentación de medición de vibraciones

La medición es esencial para observar y realizar pruebas científicas e investigaciones tecnológicas. Es tan fundamental e importante que se puede decir que ciencia en general depende de ella. Los instrumentos de medición son desarrollados para recopilar y monitorear variables físicas y convertirlas en salidas que puedan ser interpretadas.

Un instrumento se puede dividir en elementos funcionales más pequeños, como se muestra en la figura 2.5.



**Figura 2.4** Esquema de un instrumento de medición.

En los últimos años, el rápido crecimiento de la electrónica y microelectrónica han hecho posible un rápido crecimiento en el campo de la instrumentación, con el desarrollo de técnicas, arquitecturas distribuidas y estándares enfocados a mejorar el desempeño. En la actualidad, el diseño de la instrumentación para cualquier rama requiere de actividades multidisciplinarias, actualizados para satisfacer las necesidades del mercado en cuestión actual. Se deben considerar factores como la simplicidad, la apariencia, facilidad y flexibilidad de uso y requisitos de mantenimiento.

Los instrumentos de medición pueden ser analógicos o digitales o la combinación de ambos, o virtuales. Actualmente la gran mayoría de los equipos de medición que se diseñan son digitales debido a las ventajas que ofrecen. Las señales eléctricas de entrada son acondicionadas mediante circuitos analógicos antes de ser convertidas a formato digital para su procesamiento digital. Cabe mencionar que los instrumentos que funcionan totalmente bajo principios digitales se encuentran en constante desarrollo.

El desarrollo de la instrumentación en general comenzó con el desarrollo de equipos analógicos basados en tecnologías electrónicas, sin embargo nuestro mayor interés se concentra en equipos digitales y virtuales.



### 2.5.1 Analizador de vibraciones

De manera general, un instrumento para medir vibraciones se le llama vibrómetro, mientras que un instrumento o sistema que además está diseñado para realizar otro tipo de análisis y procesamiento de datos, por ejemplo análisis en frecuencia en conjunto con otras características útiles como almacenamiento y registro, es usualmente llamado “Analizador de vibraciones”.

El primer analizador de vibraciones fue el cerebro humano acoplado a los sentidos del tacto y oído, y aún en nuestros días puede ser el mejor si está entrenado apropiadamente. Además, el mecanismo humano de la audición con el que se apoya las sensaciones que se perciben mediante el tacto es muy adaptable al reconocimiento de patrones, por lo que se convierte en un reto inevitable desarrollar y fabricar sistemas de igual adaptabilidad mediante herramientas modernas para la medición y análisis de vibraciones mecánicas, industriales en maquinaria o de exposición humana.

Los primeros medidores de vibración fueron introducidos en la década de 1950, y medían básicamente el nivel total de la vibración, ya fuera en unidades de desplazamiento o velocidad. Posteriormente, se añadieron filtros analógicos sintonizables para discriminar y/o seleccionar entre distintas componentes de frecuencia, y de esta manera producir un espectro de vibración.

En la década de 1970, el nacimiento de las computadoras personales y el avance en el procesamiento digital de señales, llevaron a la creación de los primeros analizadores FFT, que de manera rápida calculaban el espectro en frecuencias a partir de una señal de vibración grabada. Dichos analizadores eran grandes y pesaban alrededor de 35 kg, por lo que su uso fue más conveniente como instrumentación de laboratorio que cómo de unidades portátiles para uso en campo.

La década de 1980 fue la época de los microprocesadores en un solo chip de silicio que dio paso, entre otros, a los primeros analizadores digitales de señal verdaderamente portátiles. Es este dispositivo, con capacidades de almacenamiento y de registro de datos y anotaciones de manera ordenada, el que ha revolucionado la aplicación de los análisis de vibraciones en diversos campos, incluyendo principalmente el monitoreo de maquinaria y la exposición humana a vibraciones, entre otros no menos importantes como vibraciones en estructuras, en edificios o en medios de transporte.

El desarrollo actual de los analizadores de vibración va de la mano con el desarrollo de programas computacionales diseñados para la gestión y análisis de los datos. Y el desarrollo sigue en constante crecimiento.



## 2.5.2 Instrumentos digitales y virtuales

Un instrumento digital se caracteriza por sus capacidades para realizar operaciones matemáticas y con así como el almacenamiento y transmisión de datos.

En los instrumentos virtuales o VIs, el uso de técnicas digitales, software y computadoras reemplazan las capacidades de procesamiento y de despliegue de datos de la mayoría de la instrumentación tradicional. Para esta modalidad de instrumentación se utilizan tarjetas de adquisición de datos (DAQ), tarjetas PC (PCMCIA) y dispositivos de entrada / salida para conectar los sensores y transductores del sistema a una computadora. Una vez que el sistema está debidamente interconectado para todos sus componentes, la computadora puede ser programada para actuar como un instrumento de medición, pero ofreciendo beneficios adicionales de flexibilidad en el procesamiento, despliegue y almacenamiento de los datos.

En este sentido, LabVIEW es una herramienta de programación gráfica para pruebas, control y diseño para el desarrollo de instrumentos virtuales. Existen otros sistemas en el mercado para desarrollo y aplicaciones de este tipo.

## 2.6 Resumen del capítulo

En este capítulo se presentó una revisión de la literatura disponible sobre 1) la vibración, 2) La percepción y los efectos de las vibraciones que afectan la salud y el confort humano – exposición en cuerpo entero y mano brazo, 3) Instrumentación para vibraciones.

En la primera parte del capítulo se presenta la teoría sobre vibración mecánica; en la segunda se hace una revisión de los sistemas humanos involucrados en la percepción de la vibración, incluyendo límites y curvas de percepción en las que se basa la normatividad nacional y normas internacionales ISO, además de los efectos a la salud y confort, y posteriormente una breve historia de la instrumentación para la exposición a vibraciones así como las nuevas implementaciones y estudios que se han realizado a la fecha.



## Capítulo 3

### Marco teórico

#### 3.1 Introducción

El cuerpo humano siempre ha estado expuesto a vibraciones mecánicas en su entorno, ejemplos actuales son maquinaria, equipo pesado, vehículos, etc. La vibración mecánica puede interferir con el confort, salud y actividades cotidianas, por lo que es muy importante aplicar el método científico para medir y evaluar vibraciones de tal manera que se puedan reducir tanto sus efectos y causas y obtener información de sus efectos.

En esta sección se presenta de manera resumida los métodos de medición de la exposición a vibración mecánica, tanto de carácter nacional como internacional y a su vez aplicar técnicas de procesamiento digital de señales y de reconocimiento de patrones, se pueda crear un sistema para este propósito para casos de medición y evaluación en nuestro país.

#### 3.2 Exposición humana a vibraciones

La influencia de la vibración en el cuerpo humano es muy compleja. El cuerpo humano es una estructura activa, inteligente y dinámica, por lo que no debe esperarse que el movimiento del mismo tenga consecuencias simples o fácilmente predecibles. Ya sea que un movimiento cause molestia, molestia, interferencia con actividades, daños a la salud o mareos; esto depende de muchos factores incluyendo las características del movimiento, las actividades y características de la persona expuesta y otros factores ambientales.

La exposición a vibración mecánica en cuerpo humano, para fines de medición y evaluación de confort y salud se divide en:

- Vibraciones en cuerpo completo (o entero): Aquella que se transmiten al cuerpo a través del punto de apoyo del cuerpo humano, existen tres posiciones de evaluación: de pie, sentada o acostada. Las fuentes de transmisión son maquinaria, transporte etc.
- Vibraciones en extremidades superiores (ó mano brazo): Aquellas que se transmiten específicamente hacia las manos y brazos, principalmente de operadores de maquinaria rotativa y/o vibratoria, por ejemplo herramientas eléctricas ó motocicletas.

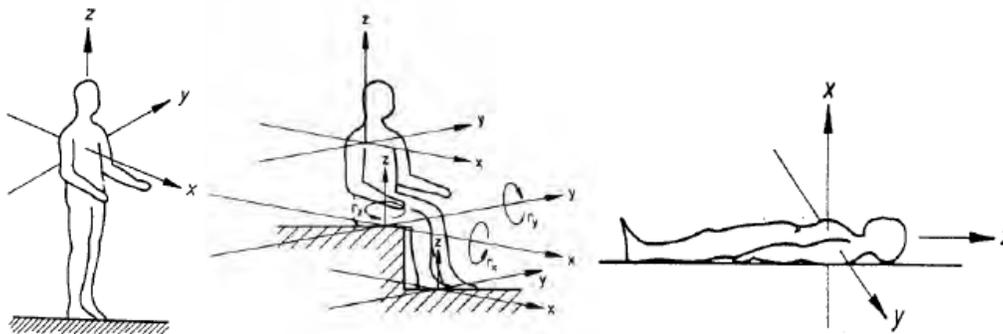
Para el caso de exposición humana a vibraciones se cuenta con los procedimientos descritos en:

- Serie ISO 2631 - 1 y 2 para evaluación de vibraciones en cuerpo completo (WBV).
- Serie ISO 2541 -1 para evaluación de vibraciones en extremidades superiores (HAV).
- Método de la absorción de potencia, mediante la medición de la fuerza y la velocidad, lo que resulta en un método complejo y caro.

La cantidad primaria para expresar la magnitud de la vibración será aceleración en  $m/s^2$ .

### 3.2.1 Ejes de medición

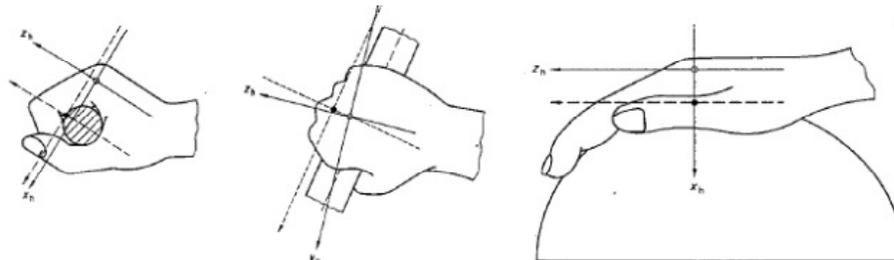
Dependiendo de la posición de evaluación indicada anteriormente, la evaluación debe realizarse en el punto de apoyo del cuerpo con la superficie que vibra. La evaluación se realiza de acuerdo los ejes basicéntricos que se muestran en la Figura 3.1:



**Figura 3.1** Sistema de ejes basicéntricos x, y, z para el cuerpo humano

a) Posición de pie b) Posición sentada c) posición acostada

Para extremidades superiores se tienen dos posiciones de medición: puño y palma plana. La medición debe realizarse utilizando el sistema de ejes basicéntricos, como se muestra en la Figura 3.2:



**Figura 3.2** Sistema de coordenadas para las manos.

a) Puño b) Palma plana



Una señal de vibración capturada significa la suma vectorial de la vibración de cada uno de los componentes [10].

La importancia de una vibración, desde un punto de vista ergonómico está dada por la intensidad y la frecuencia.

### 3.2.2 Evaluación de la vibración en cuerpo completo

Existen dos métodos de medición para la evaluación de vibración en cuerpo completo:

**Método básico:** método de la aceleración cuadrática media ponderada.

Se deberá obtener la magnitud de la vibración expresada en el intervalo de 1Hz a 80 Hz, en cada uno de los ejes ortogonales de los puntos de medición. Deberá utilizarse la aceleración raíz cuadrática media (r.m.s.) ponderada conforme la siguiente ecuación:

$$a_{w(rms)} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt \right]^{1/2} \quad 3.1$$

Donde  $a_w(t)$  es la aceleración instantánea ponderada en frecuencia; como función del tiempo en  $m/s^2$ .

$T$  es la duración de la medición, en segundos.

Es necesario considerar  $a_{w(rms)}$  para estimar los efectos en el confort, percepción y mareo.

**Método adicional:** método del valor actual (“running”) r.m.s., valor de la dosis de vibración VDV o aceleración raíz al cuadrado media.

Se utiliza en ambientes donde hay impactos o vibraciones transitorias, se deberá obtener “la dosis de vibración a la cuarta potencia” ( $m/s^{1.75}$ ), la cual es más sensible a picos utilizando una la potencia a la cuarta en lugar de al cuadrado:

$$VDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{1/4} \quad 3.2$$

Donde  $a_w(t)$  es la aceleración instantánea ponderada en frecuencia; en  $m/s^2$ .

$T$  es la duración de la medición, en segundos



Cuando la exposición a vibración consista de dos o más períodos o magnitudes, el valor total de la dosis de vibración o VDV total será calculado a partir de la suma de todos los valores de dosis de vibración individuales.

$$VDV_{total} = \left( \sum_i VDV_i^4 \right)^{1/4} \quad 3.3$$

El método de la aceleración instantánea r.m.s. toma en cuenta los impulsos, impactos y vibraciones transitorias mediante el uso de una constante de integración. La magnitud de la vibración se define como el valor máximo de vibración transitoria (MMTV: *Maximum Transient vibration Value*).

Para efectos de las vibraciones humanas en la salud, es recomendable utilizar el valor VDV en lugar de  $a_{w(rms)}$ . [Checar límites en ISO y NOADF](#)

#### **Criterio del factor de cresta**

Un factor de cresta  $Q$  menor o igual a 9, indica si es suficiente determinar el valor de la aceleración RMS ponderada del método básico, o es necesario aplica el método adicional. También es un indicativo de un alto contenido de impactos en la señal (severidad). Se define como el módulo de la razón del valor pico máximo instantáneo de la aceleración respecto al valor r.m.s. definido por 3.1.

$$Q = \left| \frac{a_{w(max\ peak)}}{a_{w(rms)}} \right| \quad 3.4$$

Donde  $Q$  es el factor de cresta.

$a_{w(max\ peak)}$  Es el valor pico máximo instantáneo de la aceleración promediada en frecuencia.

$a_{w(rms)}$  Es el valor r.m.s. de la aceleración promediada en frecuencia.

El valor pico de la aceleración ponderada se obtiene durante la medición con duración  $T$  utilizado para la integración del valor r.m.s., según la ecuación 3.1.



### 3.2.3 Evaluación de la vibración en extremidades superiores

La vibración en mano brazo se evalúa mediante el valor de la aceleración r.m.s. definida en 3.1 con la ponderación  $Wh$ , que puede ser expresada de la siguiente forma:

$$a_{hw} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_{hw}^2(t) dt \right]^{1/2} \quad 3.5$$

Donde  $a_{hw}$  es la aceleración r.m.s. ponderada en frecuencia para vibraciones que se transmiten a la mano-brazo, por eje de medición en  $m/s^2$ .

$a_{hw}(t)$  es la aceleración instantánea ponderada en frecuencia, por cada eje de medición, para vibraciones que se transmiten a la mano-brazo; como función del tiempo  $t$  en  $m/s^2$ .

$T$  es la duración de la medición, en segundos.

Se debe tomar en cuenta la duración de la exposición para calcular la exposición diaria, es decir, cuánto tiempo las manos están en contacto con la fuente de vibración. Para facilitar las comparaciones entre exposiciones diarias de diferente duración, el valor diario de exposición a vibraciones se puede expresar en términos del valor total de vibración ponderado en frecuencia equivalente a la energía de 8 hrs, que es la duración típica de una jornada de trabajo, denominado  $a_{hw(eq,8h)}$  ó simplemente  $A_{(8)}$ .

Si la vibración diaria consiste de varias actividades con diferentes tipos de exposición a vibración (de duración  $T_i$  cada uno,  $a_{hwi}(t)$  es la aceleración r.m.s. correspondiente a cada actividad distinta), entonces el valor diario de exposición se obtiene mediante:

$$A_{(8)} = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^n a_{hwi}^2 T_i} \quad 3.6$$

Donde  $a_{hwi}$  es el valor total de vibración para la  $i$ -ésima actividad.

$n$  es el número de actividades.

$T_i$  es la duración de la  $i$ -ésima actividad.

$T_0$  es la duración de referencia de 8 hrs.



La relación que proporciona un estimado de la duración de la exposición total expresado en años, es la siguiente:

$$\frac{D_y}{\text{años}} = 31.8 \left( \frac{A(8)}{m/s^2} \right)^{-1.06} \quad 3.7$$

Donde  $A_{(8)}$  es el valor de la exposición diaria a vibraciones ó  $a_{hv(eq,8h)}$ .

$D_y$  es el valor de la exposición en un conjunto total o tiempo de vida.

### 3.2.4 Medios físicos

Un acelerómetro es un transductor que detecta el movimiento de una superficie produciendo una señal eléctrica análoga al movimiento (impactos o vibración). La fidelidad de la señal capturada depende en gran manera del modo de acoplamiento del acelerómetro a la superficie de la fuente de movimiento, y los fabricantes recomiendan varias técnicas entre las que destacan la fijación mediante un perno entre ambas partes

Actualmente las dos clases más conocidas de acelerómetros piezoeléctricos en el mercado son los de carga y el estándar IEPE (*Integrated Electronic Piezo Electric*: Piezoeléctricos con electrónica integrada), siendo estos de mayor uso en las aplicaciones de investigación e industria conocidos también como ICP ©, LIVM©, Isotron©, Deltatron©, Piezotron© y otros; marcas registradas de los respectivos fabricantes. Los acelerómetros tipo IEPE cuentan con un preamplificador interno que permite una mayor *sensibilidad* a pesar de la longitud y/o calidad de del cable, así como mejor comportamiento ante condiciones cómo polvo y humedad, a costa de una alimentación externa continua y un límite de operación < 120°C. [11]

Los acelerómetros deben colocarse de manera ortogonal con respecto al plano de los ejes basicéntricos definidos anteriormente de tal manera que midan la vibración entre el cuerpo humano y la superficie de vibración. Es recomendable que se mida entre ambas, en caso de no ser posible, se medirá en alguna parte rígida de la superficie que genera el movimiento [12] [13] [14].



**Figura 3.3 .** Acelerómetros IEPE / LIVM©.  
Cortesía: Dytran Instruments Inc.

Recomendaciones de montaje se pueden encontrar en [6], [12] y [15].

### 3.3 Normatividad nacional sobre exposición humana a vibraciones.

Actualmente existen dos normas mexicanas relacionadas a la medición y evaluación de exposición humana a vibraciones. Incluyen valores límites de vibración.

#### **Norma Oficial Mexicana NOM-024-STPS-2001, Vibraciones – Condiciones de seguridad e higiene en los centros de trabajo.**

Tiene por objetivo establecer los límites máximos permisibles de exposición y las condiciones mínimas de seguridad e higiene en los centros de trabajo donde se generen vibraciones que, por sus características y tiempo de exposición, sean capaces de alterar la salud de los trabajadores. Su ámbito de validez rige en todo el territorio nacional y aplica en todos aquellos centros de trabajo en donde por las características de operación de la maquinaria y equipo, se generen vibraciones que afecten a los trabajadores en cuerpo completo o en extremidades superiores. [14]

Básicamente, presenta los requisitos técnicos así como el procedimiento para la medición de la exposición de vibraciones humanas en ambiente laboral para cuerpo entero y mano brazo, así como los valores límite máximo permisible de exposición. Coincide en lo descrito en 3.2.2 y 3.2.3, con la diferencia que para vibraciones en cuerpo entero la vibración debe ser reportada como la respuesta en frecuencia de la misma.

#### **Norma ambiental NADF-004-AMBT-2004 que establece las condiciones de medición y los límites máximos permisibles para vibraciones mecánicas que deberán cumplir los responsables de fuentes emisoras en el Distrito Federal**

Tiene por objetivo establecer los límites máximos permisibles que deben cumplir los responsables de las fuentes emisoras de vibraciones mecánicas y su método de medición. Su ámbito de validez es el Distrito Federal y aplica a las fuentes emisoras que por su giro o tipo de actividad incluyan en su



operación maquinaria y equipo que generan vibraciones mecánicas en los sitios o inmuebles aledaños que causen molestia o no-confort. [16]

Básicamente, presenta los requisitos técnicos así como el procedimiento para la medición de la exposición de vibraciones cuerpo completo así como el valor límite máximo permisible de exposición.

### 3.4 Procesamiento digital de señales

El objetivo del procesamiento digital de señales es extraer información relevante de un conjunto de datos recolectados mediante la medición de un fenómeno físico, utilizando diferentes técnicas basadas en los dominios del tiempo y frecuencia y seleccionando aquellos que ofrezcan diferentes ventajas para el caso de estudio y posterior uso en sistemas de diagnóstico, reconocimiento y clasificación.

De acuerdo a lo anterior la exposición a vibración es registrada mediante una señal eléctrica que es proporcional al fenómeno mecánico que la genera, obteniéndose una señal en el dominio del tiempo. Posteriormente la señal deberá convertirse al dominio de la frecuencia en forma de espectro. El análisis espectral en frecuencia consiste en descomponer la señal en sus componentes de frecuencia. El análisis espectral de vibraciones es muy útil para la detección rasgos característicos en las señales de vibraciones humanas. Algunos de estos métodos que pueden proporcionar esta y otra información utilizados para el desarrollo de este trabajo son:

- Transformada rápida de Fourier.
- Análisis de en bandas de Octavas.
- Análisis de Forma de Onda.
- Modelado auto regresivo (paramétrico).

### 3.4.1 Clasificación de las señales

Cómo ya se mencionó anteriormente, los fenómenos físicos de mayor interés en las áreas de ingeniería se miden en términos de una función de amplitud versus tiempo (registro histórico temporal o señal observada). Se dice que los fenómenos físicos en general se pueden clasificar en sistemas lineales o no lineales, con parámetros en cada uno de ellos que pueden ser constantes o variables en el tiempo, lo que lleva a la clasificación mostrada en la Figura 3.4

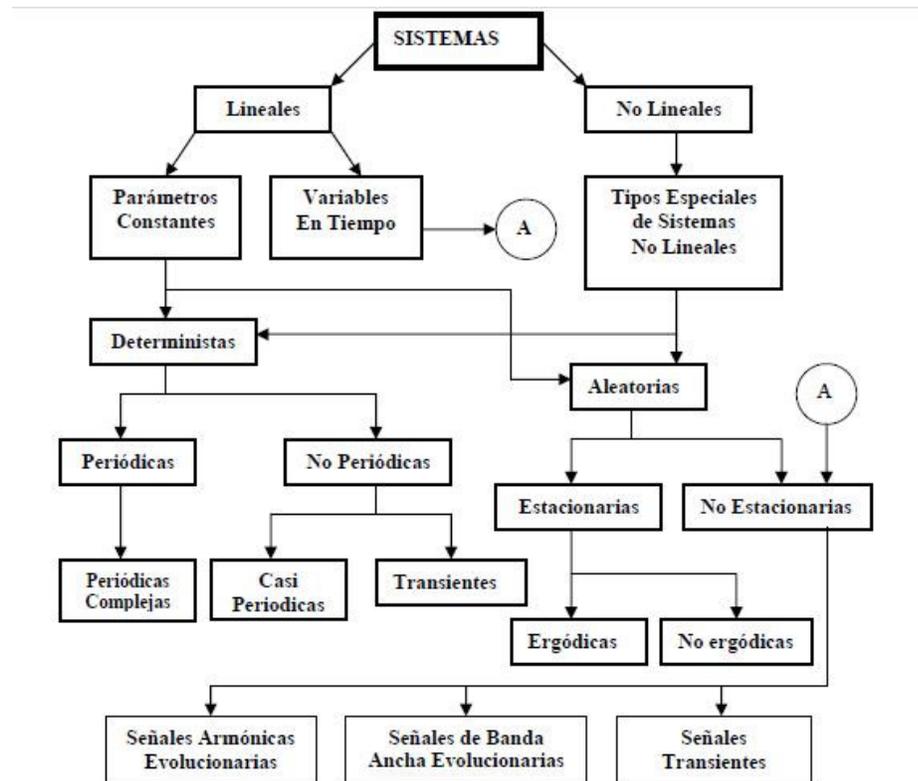
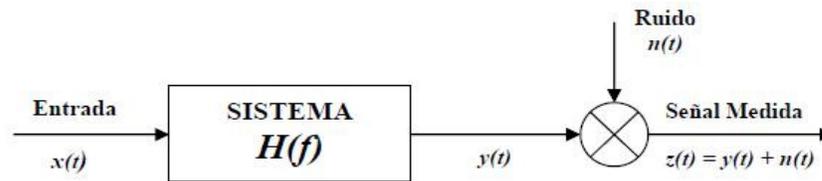


Figura 3.4: Clasificación típica de señales en análisis de vibraciones.

A diferencia de los sistemas no lineales, los sistemas lineales satisfacen el principio de superposición, además de que cuando los datos de entrada sean aleatorios con una función de distribución de probabilidad (p.d.f.) Gaussiana, producirán una señal de salida que tendrá también el mismo tipo de distribución. Para un sistema no lineal una entrada de datos similar producirá una señal de salida con una distribución no Gaussiana.



**Figura 3.5:** Sistema típico de medición.  $H(f)$  es la función transferencia del sistema.

Cualquier conjunto de datos observados se pueden clasificar en deterministas o aleatorios. Los primeros son aquellos que se pueden describir por medio de una relación matemática explícita. El caso más simple lo representa una función sinusoidal. Los segundos son los fenómenos físicos donde las mediciones producen un registro temporal único, el cual muy probablemente no vuelva a repetirse. En tales casos, la historia temporal resultante de un experimento dado representa solamente una realización física de lo que podría haber ocurrido, de modo que a fin de tener una comprensión completa de los datos, debería pensarse en términos de un número infinito de registros temporales que podrían haber ocurrido. Una registro temporal simple  $x_i(t)$  es lo que se denomina *realización* observable en un período finito de tiempo, mientras que la colección de todas ellas  $\{x_i(t)\}$  es lo que se llama un *proceso aleatorio* (ó *estocástico*).

Desde el punto de vista del análisis de vibraciones mecánicas y son “aleatorias”, debido a que las actividades de trabajo y actividades cotidianas que las generan son de esa misma naturaleza. Los métodos propuestos para la evaluación de la exposición a vibraciones usualmente suponen que el movimiento es estacionario y que se puede utilizar un promedio representativo para indicar la severidad del movimiento durante el periodo de exposición. En la práctica, las condiciones varían de un instante a otro, por lo que se usan lapsos cortos donde se considera que los datos son estacionarios. Por otro lado existe una clase de datos no estacionarios de especial interés, denominadas señales transitorias y son las resultantes de un fenómeno de muy corta duración con un comienzo y un fin perfectamente definidos.

### 3.4.2 Modelo auto regresivo

Las técnicas de estimación de la Densidad de Potencia Espectral (PSD) basadas en procedimientos de la transformada rápida de Fourier (FFT) son computacionalmente eficientes y producen resultados razonables para una gran clase de señales, sin embargo poseen algunas limitaciones: la resolución en frecuencia y el uso implícito de una ventana para evitar fugas, especialmente cuando se analizan registros temporales cortos, lo que ocurre frecuentemente en la práctica ya que muchos procesos son de corta duración o tienen un espectro variable en el tiempo tal que las consideraciones de estacionalidad no aplican. En vibraciones mecánicas estas situaciones con pocos datos se obtienen, por ejemplo, de mediciones de maquinas que giran a bajas revoluciones o en casos de muy corta duración de exposición en uso de herramientas.



Las señales pueden ser descritas por sus parámetros estadísticos de segundo orden, es decir de forma *paramétrica*. De tal manera que la PSD de una señal será una función de los parámetros del modelo. Un aspecto importante de la aproximación paramétrica para la estimación espectral es que es posible realizar suposiciones más realistas respecto a la naturaleza del proceso medido fuera del intervalo de medición, en lugar de asumir que la misma es cero o periódica, por lo que se elimina la necesidad de utilizar una función de ventana. Uno de tales métodos se denomina modelación auto regresiva (AR). Los modelos auto regresivos (AR) surgen de la necesidad de una estimación espectral de alta resolución, siendo un método de modelado mediante una función de transferencia racional. El modelo AR es apropiado para la estimación de espectros con picos finos, es decir, es de alta resolución.

La secuencia de datos puede ser aproximada utilizando un número finito de valores  $p$ , este modelo se expresa mediante una regresión lineal en si misma (de ahí el nombre “auto regresión”) más un error de aproximación donde  $e[n]$ :

$$x[n] = -\sum_{k=1}^p a(k) \cdot x[n-k] + e[n] \quad 3.8$$

Donde  $e[n]$  es ruido Gaussiano con media cero y varianza  $\sigma^2$  y  $p$  es el orden del modelo.

Este modelo considera que la vibración puede ser descrita como un filtro IIR, todo polos, con una entrada de ruido blanco, descrito mediante su función de transferencia:

$$H_s(z) = \frac{1}{\sum_{i=0}^M a_i z^{-i}} = \frac{1}{A(z)} \quad 3.9$$

Donde  $a_i$  son los coeficientes del filtro.

El estimador espectral AR es el que ha recibido más atención en la literatura técnica de los modelos de series temporales por dos razones. En primer lugar los espectros auto regresivos tienden a tener picos agudos, característica asociada con estimación espectral de alta resolución. La segunda razón es que las estimaciones de los parámetros AR se pueden obtener como soluciones de ecuaciones lineales, de esta manera se obtiene un sistema de ecuaciones de Yule - Walker que puede ser resuelto mediante la recursión de Levinson Durbin, utilizando la estructura hermitiana – Toeplitz de la matriz de correlación:



$$\begin{bmatrix} R_{ss}(0) & R_{ss}(-1) & \dots & R_{ss}(-(p-1)) \\ R_{ss}(1) & R_{ss}(0) & \dots & R_{ss}(-(p-2)) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ R_{ss}(p-1) & R_{ss}(p-1) & \dots & R_{ss}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} R_{ss}(1) \\ R_{ss}(2) \\ \vdots \\ R_{ss}(p) \end{bmatrix} \quad 3.10$$

$R_{ss}(k) = R_{ss}(-k)$  por lo tanto  $R_{ss}(-1) = R_{ss}(1)$  y así sucesivamente. 3.11

Para obtener los valores de  $R_{ss}(k)$ , se utiliza:

$$R_{ss}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1-|k|} S(i+|k|)S(i) \quad \text{para } |k| < p+1 \quad 3.12$$

El factor  $1/N$ , es el factor de escala de la autocorrelación parcial, el cual garantiza la estabilidad de los coeficientes [17].

Se debe escoger un número  $p$  de tal manera que pueda representar adecuadamente los picos relevantes de la señal, ya que mientras más grande sea este número, la respuesta en frecuencia del filtro se aproxima más al espectro de potencia continuo.

### 3.5 Transformada de Fourier

Las funciones periódicas más generales quedan representadas por su serie de Fourier:

$$x(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos 2\pi f_1 t + b_n \sin 2\pi f_1 t) \quad 3.13$$
$$f_1 = \frac{1}{T}$$

Donde  $x(t)$  es la señal y  $T$  es el período de la señal.

$T$  es el período de la señal, en segundos.

El primer término  $a_0$  representa la DC en la señal, mientras que los restantes términos consisten en un número infinito de sinusoides de amplitudes decrecientes y frecuencias que son múltiplos de  $f_1$ .

#### Transformada rápida de Fourier.

Es el conjunto de algoritmos computacionalmente eficientes para la evaluación rápida de la DFT (Transformada Discreta de Fourier), cuyo concepto central es dividir los  $N$  puntos de la DFT en dos o más DFT pequeñas, cada una de las cuales pueden computarse en forma individual y combinarse en forma lineal a fin de obtener la DFT de la secuencia de  $N$  puntos originales. Su importancia radica en la rapidez de cálculo conseguida ya que la DFT aumenta el número de operaciones necesarias para la resolución de forma exponencial, la transformada rápida lo hace casi de forma lineal [18]

### 3.6 Reconocimiento de patrones.

Para llevar a cabo la tarea de reconocimiento de vibraciones y sus posibles alteraciones a la salud y el confort es necesario realizar la correcta extracción de rasgos o parámetros característicos para la clasificación de los mismos. Para lograr lo anterior, en primer lugar se deben generar patrones, y posteriormente proceder al el proceso de clasificación, como se muestra a continuación:

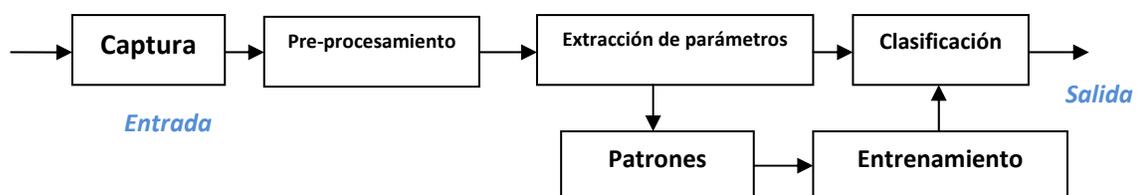


Figura 3.6: Estructura general de un clasificador de patrones



El procedimiento es el siguiente:

- La señal es capturada y digitalizada.
- El conjunto de patrones resultantes se someten a un pre procesamiento, para adecuar las señales a etapas posteriores.
- Extracción de patrones, que se resumen en un vector. La extracción de las características se puede ver como una transformación de los patrones para reducir la cantidad de datos, manteniendo en lo posible la información relevante.
- Una vez considerando los vectores característicos es necesario realizar el proceso de clasificación. En general, las características de una clase deben ocupar una o más regiones compactas en el espacio y las regiones de clase diferentes deben separarse.

### 3.7 Redes neuronales artificiales (RNA)

Inspirada en la fisiología de la célula del sistema nervioso de los seres humanos, conocida como neurona, en ingeniería y matemáticas una red neuronal artificial (RNA) es un procesador distribuido en paralelo, que puede filtrar y procesar la información y tomar una decisión. En base a la analogía con el cerebro humano, una RNA necesita una cantidad determinada de información para entrenarse y posteriormente las conexiones entre las neuronas se utilizan para almacenar información.

El uso de las RNA ofrecen ventajas tales como el aprendizaje adaptativo y funcionan como el cerebro humano, procesando la información en paralelo, y en que también pueden aprender y generalizar a casos nuevos que no fueron incluidos durante la etapa de entrenamiento.

#### 3.7.1 Perceptrón multicapa

Este tipo de red neuronal artificial obedece a un algoritmo de gradiente descendientes en el que los pesos de la red son movidos a través del gradiente negativo de la función de salida. El término del algoritmo utilizado *backpropagation* se refiere a la manera en que este gradiente es calculado en una arquitectura multicapa no lineal. Los vectores de entrada y sus correspondientes vectores objetivo de salida, son utilizados para entrenar la red hasta que se pueda aproximar a la función, asociando vectores de entrada de un amañera apropiada definida por el programador [19].

La característica primordial de este tipo de redes es que sí son bien entrenadas, pueden reconocer o clasificar vectores de entrada aunque nunca hayan sido vistas por la red.



### 3.8 Filtros digitales IIR

Con un filtro digital es posible modificar la respuesta en frecuencia y fase de un sistema aplicando una serie de multiplicaciones y adiciones a la información en el dominio del tiempo (para información detallada sobre filtrado digital se recomiendan los trabajos de Oppenheim y Schaffer [20] o de Rabiner y Gold [21]). Esencialmente existen dos métodos de filtrado digital de señales: Respuesta finita al impulso (FIR: *Finite Impulse Response*) y Respuesta Infinita al Impulso (IIR: *Infinite Impulse Response*).

Un filtro IIR es recursivo y requiere menos coeficientes que su equivalente filtro FIR, sin embargo su diseño es más complicado. Por otro lado un filtro FIR es siempre estable.

$$y[n] = \frac{1}{a_0} \left( \sum_{j=0}^M b_j \cdot x[n-j] - \sum_{k=1}^M a_k \cdot y[n-k] \right) \quad 3.14$$

Un filtro IIR utiliza los valores previos de salida además de los valores previos de entrada para calcular el valor actual de la muestra de salida.

### 3.9 Transformada bilineal

Existen varios métodos para obtener un filtro digital a partir de un filtro análogo en el dominio  $s$ . En este trabajo se utiliza el método de la transformada bilineal con distorsión de frecuencia (*frequency warping*), ya que mapea el eje  $j\omega$  completo en el plano  $s$  a una revolución en el círculo unidad en el plano  $z$  [20]. En el método de la transformada bilineal con distorsión en frecuencia para el diseño de filtros IIR, la variable  $s$  en las ecuaciones en el dominio analógico  $s$  es reemplazada por la transformada bilineal definida en la ecuación siguiente [21]:

$$s \rightarrow 2 \frac{(1-z^{-1})}{1+z^{-1}} \quad 3.15$$

Sin embargo, existe una relación no lineal entre la frecuencia analógica y la frecuencia digital. Pre-distorsionando las frecuencias utilizadas en el dominio analógico  $s$ , mediante la sustitución que se indica en 4.8 es posible eliminar este problema:

$$\omega_n' \rightarrow 2 \tan \left[ \frac{\omega_n}{2} \right] \quad 3.16$$

Donde  $\omega_n$  es la frecuencia de diseño del filtro normalizado (es decir  $2\pi\omega_c / \omega_s$  ó  $2\pi f_c / f_s$ , donde  $\omega_c$  y  $f_c$  son las frecuencias centrales y  $\omega_s$  y  $f_s$  son las frecuencias de muestreo respectivamente) y  $\omega_n'$  es la frecuencia distorsionada normalizada.



### 3.10 Resumen del capítulo.

La complejidad de la vibración y la diversidad en la respuesta humana genera interés en el desarrollo científico para poder establecer relaciones entre la vibración y sus efectos. La vibración tiene formas diversas. La evolución de la vibración debe considerar su magnitud, su contenido en frecuencia así como de la dirección de propagación y cómo cambia con el tiempo.

En el presente capítulo, se presentarán las generalidades de la exposición humana a vibraciones, sus características, su forma de adquisición así como los métodos de medición y evaluación tanto en cuerpo completo como en extremidades superiores. A su vez se hace mención de las herramientas de procesamiento digital de señales útiles para la extracción de rasgos característicos de la exposición a vibración, como el análisis espectral, entre otras y posteriormente sobre reconocimiento de patrones y redes neuronales artificiales, de tal manera que en conjunto proporcionen información importante para determinar y clasificar posibles efectos a la salud y confort humanos.

# Capítulo 4

## Descripción del sistema

### 4.1. Introducción

Uno de los puntos importantes en la medición de vibraciones es contar con los elementos adecuados que conviertan las vibraciones mecánicas en señales que puedan ser almacenadas, manejadas y analizadas técnicamente.

De acuerdo a las necesidades de medición y a las características de las vibraciones que se pretenden medir, se seleccionan los instrumentos y los equipos adecuados para llevar a cabo esta tarea de manera que se obtengan registros precisos y confiables.

En este capítulo se describirá la estructura de la investigación y desarrollo para el sistema propuesto.

### 4.2. Arquitectura del sistema de medición y análisis

La Fig. 4.1 muestra el diagrama completo del sistema, el cual, se encuentra dividido como se muestra a continuación:

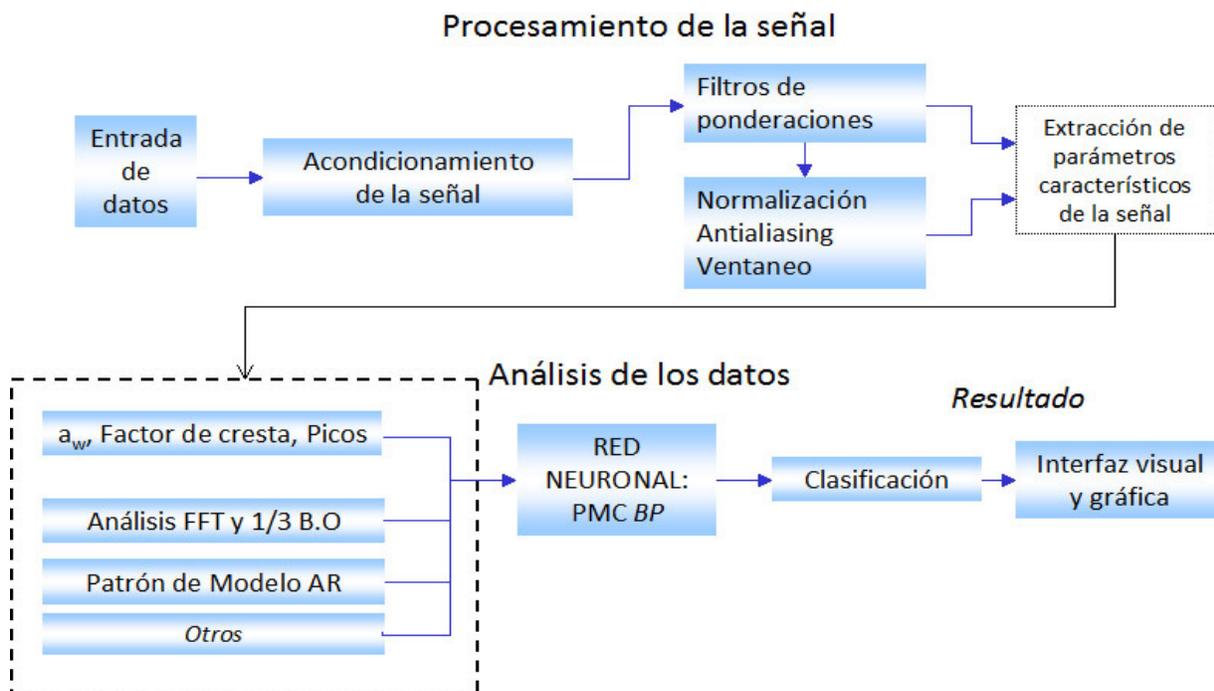


Figura 4.1: Arquitectura general del sistema

El sistema se divide en dos etapas:

**Procesamiento de la señal:** Recolección de datos y acondicionamiento de la señal.

**Procesamiento y análisis de datos:** Análisis y diagnóstico (capítulo 5).

De forma física, el sistema se puede representar de la siguiente manera:

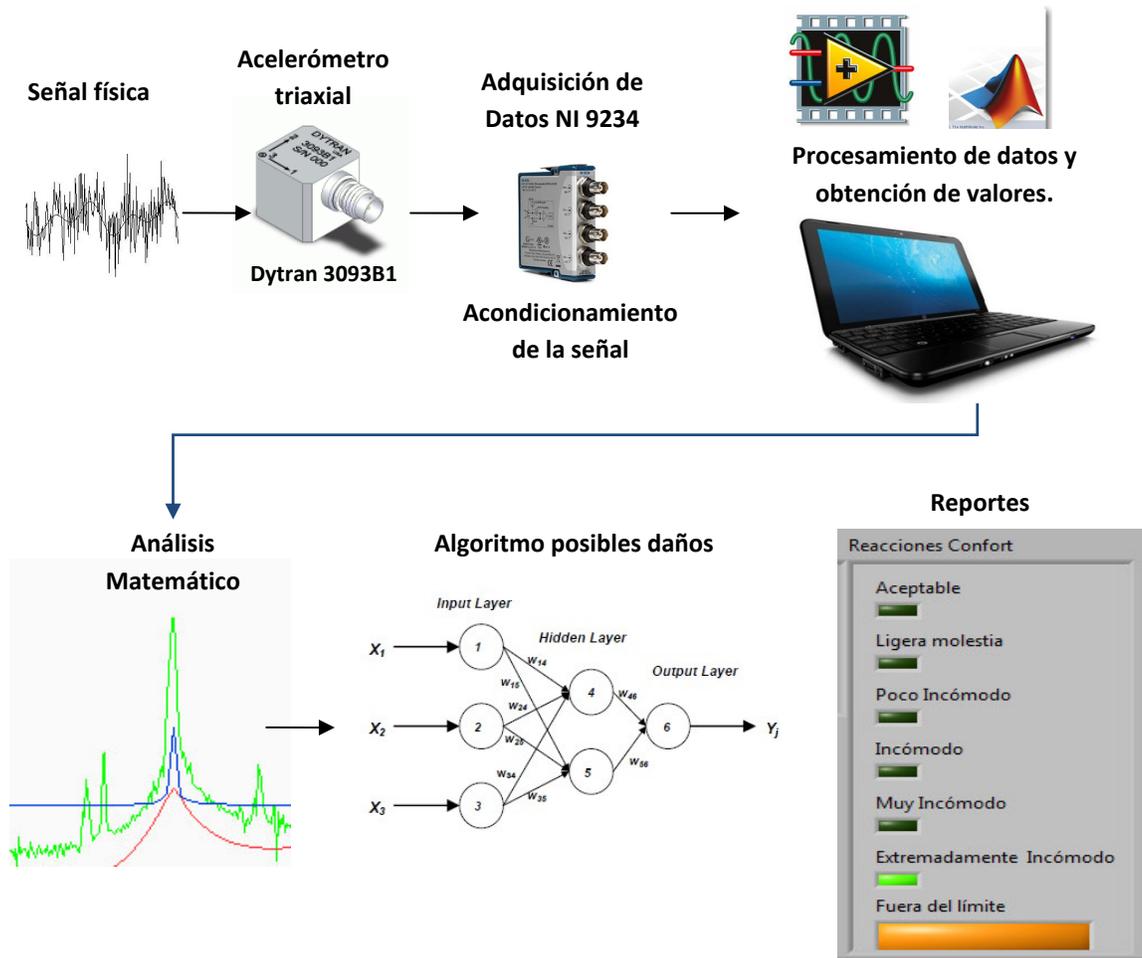


Figura 4.2: Etapas físicas de la arquitectura del sistema



**Figura 4.3:** Sistema completo

### 4.3. Entrada de datos y acondicionamiento de la señal.

Cómo su nombre lo indica, esta etapa está dedicada a la captura, acondicionamiento de las señales de la vibración mecánica a medir, así como la obtención de valores representativos de dicho evento. A continuación se detallan las etapas de las que está conformado.

#### 4.3.1. Acelerómetro mod. 3093B1

El efecto de la vibración en humanos es una función de la frecuencia y por lo tanto el acelerómetro debe ser capaz de proporcionar información confiable en las frecuencias más importantes [8].

Para este proyecto, se decidió utilizar el acelerómetro triaxial IEPE miniatura Modelo 3093B1 de la marca *DYTRAN Instruments™*, que incorpora tres elementos de cuña de cuarzo como elementos del sensor en un cuerpo fabricado de titanio. Este modelo fue seleccionado por sus características de operación que cubren las especificaciones recomendadas dentro de las Norma Oficiales Mexicanas de medición de vibraciones, su alta sensibilidad, su tamaño y peso reducidos para no afectar las labores de las personas evaluadas. Su diseño resistente y compacto facilita su uso en ambientes de prueba y de campo [22].

**Tabla 4.1:** Características Dytran Mod. 3093B1

Especificaciones	
<b>Peso</b>	13.5 gramos
<b>Sensibilidad</b>	100mV/g 10 mV/m/s <sup>2</sup>
<b>Intervalo</b>	50 g 490 m/s <sup>2</sup>
<b>Respuesta en frecuencia ±10%</b>	1-5000 Hz
<b>Shock Máximo</b>	3000 g / 29420 m/s <sup>2</sup>

El montaje de este acelerómetro se realiza mediante fijación por perno a la superficie que está vibrando.

**Para medición de vibraciones en cuerpo completo (WBV):** el acelerómetro es fijado directamente a la superficie en la que el sujeto bajo medición se encuentra ubicado. Otra forma de montaje posible, en el caso que no sea posible perforar la superficie de medición, es mediante el uso de cera de abeja o grasa de silicón. Este último es una opción rápida y fácil que reporta una frecuencia de resonancia ligeramente menor, por lo que se debe emplear la menos cantidad de adhesivo posible con el fin de no disminuir el rango de frecuencias de operación del acelerómetro [23] [24].

**Para medición en extremidades superiores ó mano brazo (HAV):** el acelerómetro debe fijarse rígidamente a la superficie vibrante. Debido a que en este caso particular la medición se debe realizar de la manera más cercana posible a la zona de agarre por donde “entran las vibraciones al cuerpo humano” la medición se realiza mediante adaptadores de mano, que pueden tener forma de “T” o forma de asa, cómo se muestra en a continuación:



**Figura 4.4** - Formas de montaje del acelerómetro para mediciones en mano brazo.

La conexión eficaz entre el acelerómetro y el módulo NI 9234 se realiza directamente mediante un cable que proporcione un buen aislamiento, libre de interferencias electromagnéticas y comportamiento entre los puntos de contacto [25]. El cable utilizado es Mod. 6430A10 de la marca DYTRAN™. La hoja técnica de datos se encuentra en el Anexo 2.

#### 4.3.2. Módulo de adquisición de datos mod. NI 9234

La adquisición y acondicionamiento de los datos de la señal eléctrica que proporciona la salida del acelerómetro 3093B1 se realiza mediante el módulo NI 9234 de National Instruments™. La NI 9234 es un módulo de adquisición de señales dinámicas de 4 canales, diseñada específicamente para la adquisición de señales acústicas de alta precisión mediante sensores comunes ó IEPE/ICP, micrófonos y acelerómetros.



**Figura 4.5** - Formas Módulo de adquisición de datos NI 9234.

Es compatible con sistemas de análisis y procesamiento de National Instruments™. Ideal para aplicaciones portables de monitoreo y pruebas de ruido, vibración y rigidez.

Las características principales son:

- 4 canales de entrada analógica, que pueden digitalizar simultáneamente señales a velocidades de hasta 51.2 KHz por canal.
- 51.2 KS/s por canal a la máxima frecuencia de muestreo, entrada de  $\pm 5V$ .
- Resolución: 24 bits
- Rango dinámico: 102 dB.
- Filtros antialiasing internos que se ajustan automáticamente a la frecuencia de muestreo seleccionada.
- Acoplamiento AC/DC, seleccionable mediante software.
- Acondicionamiento de señal IEPE (0-2mA), seleccionable mediante software.
- Compatibilidad con sensores TEDS.
- USB

Los datos recolectados de cada una de las señales es almacenada en un búfer, pasando por un pre-filtro analógico y muestreada mediante un convertidor analógico a digital (ADC) mediante modulación delta-sigma que realiza el filtrado digital con una frecuencia de corte que se ajusta automáticamente a la frecuencia de muestreo seleccionada por el usuario. (14) Cita de la ficha de National Instruments.

#### 4.4. Procesamiento de la señal

Los procedimientos de evaluación de vibraciones incorporan métodos basados valores r.m.s. . tanto en tiempo como en frecuencia. La respuesta de la frecuencia del acelerómetro y de los dispositivos acondicionadores de señal, cumplen con los rangos de frecuencia de interés para la exposición de vibraciones humanas.

Para vibraciones aleatorias, la señal debe ser fragmentada en varias partes para reducir los errores de exactitud.



#### 4.4.1. Filtros de ponderación en frecuencia para exposición humana a vibraciones

La exposición humana a vibraciones se obtiene mediante acelerómetros, sin embargo se requieren filtros de ponderación para correlacionar las mediciones físicas de la vibración con la respuesta humana respectiva y para proporcionar una mayor prominencia en las frecuencias en las que los humanos son más sensibles [6] [8].

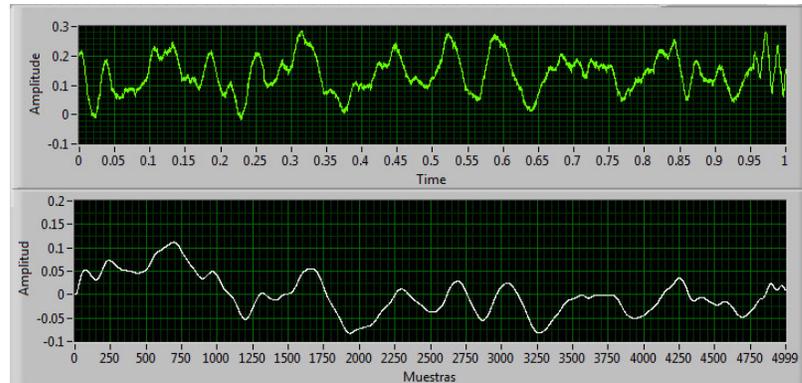
Las normas existentes para la medición de exposición a vibraciones describen los filtros adecuados en forma de filtros analógicos. En este trabajo se utilizó la transformada bilineal para realizar la transformación correspondiente a filtros digitales tipo IIR (*Infinite Impulse Response*) [26] [27].

En la tabla siguiente se muestran las ocho ponderaciones existentes según su contexto de uso:

**Tabla 4.2:** Ponderaciones en frecuencia para exposición a vibraciones

Filtro	Dirección	Contexto Primario de Uso	Norma
$W_c$	Frente – atrás	Vibración en respaldo de la espalda	ISO 2631-1
$W_d$	Frente – atrás y lateral	Vibración en asiento	ISO 2631-1
$W_e$	<i>Roll, pitch, yaw</i>	Vibración en asiento rotacional	ISO 2631-1
$W_f$	Vertical	Mareo	ISO 2631-1
$W_h$	Frente – atrás y vertical	Vibración en mano – brazo	ISO 5349-1
$W_j$	Vertical	Vibración en la cabeza	ISO 2631-1
$W_k$	Vertical	Vibración en asiento	ISO 2631-1
$W_m$	Todos	Vibración en edificios	ISO 2631-2

Las normas presentan estos filtros como ecuaciones de filtros analógicos así como tablas con factores de multiplicación en bandas de 1/3 de octava. Sin embargo, debido a que los datos se obtienen y almacenan de forma digital en el dominio del tiempo como una serie de valores muestreados, para la implementación de los filtros de ponderación se utiliza la transformada bilineal.



**Figura 4.6** - Formas de onda de una señal de exposición a vibraciones  
a) Respuesta en el tiempo proveniente del acelerómetro  
b) Respuesta en el tiempo ponderada ( $Wh$ )

#### 4.4.2. Filtros de ponderación de acuerdo para vibraciones en cuerpo completo

Los límites de la banda de frecuencia de interés se realiza mediante filtros pasa-altos y pasa bajos; y otras partes del proceso de ponderación se obtienen utilizando filtros de “transición de aceleración - velocidad” y “upward step”. Estos pueden ser descritos en el dominio  $s$  como sigue:

Filtro pasa alto

$$H_h(s) = \frac{s^2}{s^2 + \frac{\omega_1}{Q_1}s + \omega_1^2} \quad 4.1$$

Filtro pasa bajo:

$$H_l(s) = \frac{\omega_2^2}{s^2 + \frac{\omega_2}{Q_2}s + \omega_2^2} \quad 4.2$$

Filtro de transición de aceleración- velocidad:

$$H_t(s) = \frac{\frac{\omega_4^2}{\omega_3}s + \omega_4^2}{s^2 + \frac{\omega_4}{Q_4}s + \omega_4^2} \quad 4.3$$

Filtro Upward Step:

$$H_s(s) = \frac{s^2 + \frac{\omega_5^2}{Q_5} s + \omega_5^2}{s^2 + \frac{\omega_6}{Q_6} s + \omega_6^2} \quad 4.4$$

El filtro total de ponderación se describe como la combinación de las ecuaciones anteriores como se muestra en la tabla 4.3. Los valores numéricos utilizados se muestran en la tabla siguiente:

$$W = H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_t(s) \cdot H_s(s) \quad 4.5$$

**Tabla 4.3** Valores numéricos utilizados en las ecuaciones 4.1 a 4.4  $\omega = 2\pi f$

Filtro	$H_h$		$H_l$		$H_t$			$H_s$			
	$f_1$ (Hz)	$Q_1$	$f_2$ (Hz)	$Q_2$	$f_3$ (Hz)	$f_4$ (Hz)	$Q_4$	$f_5$ (Hz)	$Q_5$	$f_6$ (Hz)	$Q_6$
$W_c$	0.4	$1/\sqrt{2}$	100	$1/\sqrt{2}$	8	8	0.63	-	-	-	-
$W_d$	0.4	$1/\sqrt{2}$	100	$1/\sqrt{2}$	2	2	0.63	-	-	-	-
$W_e$	0.4	$1/\sqrt{2}$	100	$1/\sqrt{2}$	1	1	0.63	-	-	-	-
$W_f$	0.08	$1/\sqrt{2}$	0.63	$1/\sqrt{2}$	$f_3/2$	0.25	0.83	0.06	0.8	0.1	0.8
$W_j$	0.4	$1/\sqrt{2}$	100	$1/\sqrt{2}$	-	-	-	3.75	0.91	5.3	0.91
$W_k$	0.4	$1/\sqrt{2}$	100	$1/\sqrt{2}$	12.5	12.5	0.63	2.37	0.91	3.3	0.91
$W_m$	0.794	$1/\sqrt{2}$	100	$1/\sqrt{2}$	5.68	5.68	0.63	-	-	-	-

#### 4.4.3. Filtro de ponderación de para vibraciones en extremidades superiores.

El filtro de ponderación  $W_h$  utilizado en ISO 5349-1 también se define en ISO 8041. El proceso de filtrado se realiza de la misma manera descrita en ISO2631. El límite de la banda se realiza mediante filtros pasa-alto y pasa-bajo, ecuaciones 4.1 y 4.2. La parte del *filtro de ponderación* se define en el dominio  $s$  como sigue:

$$H_w(s) = \frac{(s + \omega_7)\omega_8^2}{\left(s^2 + \frac{\omega_8}{Q_7} s + \omega_8^2\right)\omega_7} \quad 4.6$$

Los valores numéricos para los filtros de ponderación en extremidades superiores se proporcionan en la tabla 4.4. Los filtros pasa alto y pasa-bajo van en cascada con el filtro de ponderación en frecuencia para producir el filtro total  $W_h$ , de tal manera que:

$$W_h = H_h(s) \cdot H_l(s) \cdot H_w(s) \quad 4.7$$

**Tabla 4.4** Valores numéricos utilizados en las ecuaciones 4.1, 4.2 y 4.6  $\omega = 2\pi f$

Filtro	$H_h$		$H_l$		$H_w$		
	$f_1$ (Hz)	$Q_1$	$f_2$ (Hz)	$Q_2$	$f_7$ (Hz)	$f_8$ (Hz)	$Q_6$
$W_h$	6.31	$1/\sqrt{2}$	1258.9	$1/\sqrt{2}$	15.915	15.915	0.64

La tabla siguiente proporciona la frecuencia mínima recomendada para cada uno de los filtros de ponderación, requeridos para obtener las tolerancias en las normas correspondientes. Sin embargo en este trabajo se realizaron pruebas con una frecuencia de muestreo de 5000 Hz, obteniéndose resultados muy similares entre sí sin ocupar archivos demasiado grandes, lo que beneficia el procesamiento de las señales en cuanto a carga computacional se refiere.

**Tabla 4.5:** Frecuencias mínima de muestreo requeridas para cada filtro para cumplir con las tolerancias especificadas en la Norma ISO8041

Filtro	Frecuencia mínima de muestreo $f_s$ (Hz)
$W_c$	$9f_2$
$W_d$	$9f_2$
$W_e$	$9f_2$
$W_f$	$11f_2$
$W_h$	$9f_2$
$W_j$	$8f_2$
$W_k$	$9f_2$
$W_m$	$9f_2$

El formato en el que se presentan las frecuencias de muestreo en esta tabla corresponde a ISO8041 donde se representa como un múltiplo de la frecuencia límite superior  $f_2$ .

#### Coefficientes de los filtros de ponderación digitales IIR.

Aplicando la transformada bilineal (sección 3.9) a las ecuaciones 4.1 a 4.4, y a la ecuación 4.6, es posible diseñar los filtros de ponderación IIR con la correspondiente respuesta en frecuencia. La forma general para un filtro IIR está dada en la ecuación 4.8, donde  $a_0$  a  $b_2$  son los coeficientes del filtro.

$$H(z) = \frac{b_2 z^{-2} + b_1 z^{-1} + b_0}{a_2 z^{-2} + a_1 z^{-1} + a_0} \quad 4.8$$

#### 4.4.4. Normalización

Debido a que dos señales de vibración provenientes del mismo evento no son idénticas y presentan grandes diferencias en la amplitud, es recomendable aplicar algunas técnicas de procesamiento [28].

La normalización consiste en transformar la amplitud de la señal tomando un determinado valor como máximo y reajustando en la correspondiente proporción toda la señal. En este caso, las señales son normalizadas utilizando su valor RMS.

#### 4.4.5. Antialiasing

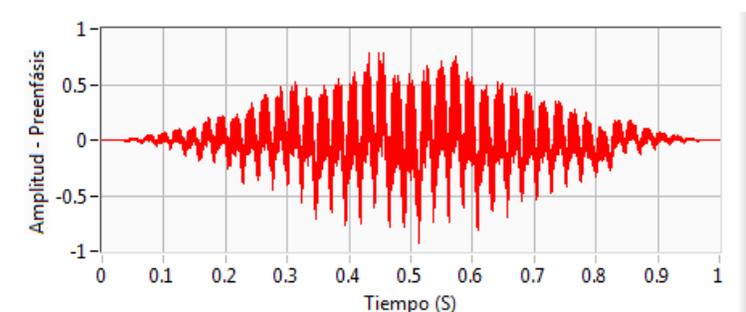
Para asegurarnos que no tenemos componentes de alta frecuencia en nuestra señal de vibraciones (mayores que la frecuencia máxima elegida/necesaria  $F_{\max}$ ), se puede utilizar un filtro anti-aliasing para suprimir las señales por arriba de  $F_{\max}$ .

#### 4.4.6. Ventaneo

Para este trabajo se utilizó la función de ventana de Hanning, ya que funciona bien para procesos aleatorios no estacionarios como las señales de vibración. Sin embargo se implementan otras funciones de ventana para los casos en los que se requieran aplicaciones específicas de exposición a vibración mecánica, permite el uso de un rango dinámico mucho mayor y proporciona una buena definición de la frecuencia y las amplitudes [29] [30].

La función de ventana de Hanning consiste de un periodo de una señal coseno de longitud  $T$ , desplazada de tal manera que comienza y termina en cero. Al ser utilizada en las señales recolectadas evita fugas al hacer que el inicio y fin de la señal sean cero.

Como resumen la combinación de todas estas técnicas, ahorran tiempo de procesamiento y aseguran que la información en el intervalo de frecuencias de interés sea precisa.



**Figura 4.7** - Formas de onda de una señal de vibraciones normalizada y ventana de Hanning



#### 4.4 Resumen del capítulo

En el presente capítulo se describió la arquitectura general de un sistema de medición y análisis el cual fue tomado para generar y establecer la arquitectura general del sistema propuesto.

Se describen a detalle las etapas de recolección y procesamiento de datos, así como de los elementos físicos seleccionados para este proyecto. Es de gran importancia la el diseño de los filtros de ponderación en frecuencia tanto para la exposición humana de vibraciones en cuerpo completo como en extremidades superiores.



## Capítulo 5

# Procesamiento y análisis de datos.

### 5.1. Análisis en el dominio del tiempo

En nuestro sistema de medición y evaluación de la exposición a vibraciones, los datos de las señales recolectadas por el acelerómetro triaxial primero son ponderados en frecuencia y posteriormente se realiza el cálculo de valores y análisis mencionados en los capítulos 3 y 4.

#### 5.1.1. Relación entre confort y aceleración – cuerpo entero.

El cálculo de la aceleración ponderada en frecuencia de un punto y una dirección en el dominio del tiempo y de manera continua se define como:

$$a_w = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_{w(t)}^2 dt \right]^{1/2} \quad 5.1$$

Donde  $a_w(t)$  es la aceleración ponderada de una sola dirección como función del tiempo, en  $m/s^2$   
 $T$  es la duración de la medición, en segundos.

El cálculo de la aceleración ponderada en frecuencia en un solo punto y para los tres ejes de medición es:

$$a_w = (k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2)^{1/2} \quad 5.2$$

Donde  $a_w$  es la aceleración ponderada en las direcciones X, Y y Z; en  $m/s^2$   
 $a_{wx}$ ,  $a_{wy}$ ,  $a_{wz}$  son las aceleraciones ponderadas en frecuencia para cada una de las direcciones X, Y y Z.

$k_x$ ,  $k_y$ ,  $k_z$  Son las constantes para cada una de las direcciones X, Y y Z, y dependen de la ponderación en frecuencia que se está aplicando.



Cálculo de la aceleración total promedio de varias mediciones de exposición a vibraciones:

$$a_{w,e} = \left[ \frac{\sum a_{wi}^2 T_i}{\sum T_i} \right]^{1/2} \quad 5.3$$

ó

$$a_{w,e} = \left[ \frac{\sum a_{wi}^4 T_i}{\sum T_i} \right]^{1/4} \quad 5.4$$

Donde:  $a_{w,e}$  es la aceleración promedio RMS de varias mediciones.  
 $a_{wi}$  y  $T_i$  son la aceleración ponderada en frecuencia y el Tiempo de medición de la i-ésima medición, respectivamente.

Para una sola medición, es suficiente realizar hasta 5.2, mientras que para mediciones diversas es necesario calcular hasta 5.5. Después de haber calculado la vibración total, se debe comparar con los límites mostrados en la tabla 5.1:

**Tabla 5.1:** Relación entre confort y Aceleración – Cuerpo Completo

Aceleración Ponderada $m/s^2$	Reacción al Confort
< 0.315	Aceptable
0.315 – 0.63	Ligera molestia
0.5 – 1.00	Poco incómodo
0.8 – 1.6	Incómodo
1.25 -2.5	Muy incómodo
> 2.00	Extremadamente incómodo

### 5.1.2. Relación entre confort y aceleración – extremidades superiores

Esta relación es el resultado de nuevas investigaciones en el campo de los estudios subjetivos para categorizar las vibraciones de mano brazo utilizando el método de evaluación de la Norma ISO5349-1. El método de juicio de categorías (*Category judgment method*). Los resultados obtenidos es esta investigación realizada por el Dr. Setsuo Maeda [31] [32] se muestran en la tabla 5.2:

**Tabla 5.2:** Relación entre confort y Aceleración – Extremidades superiores

Aceleración RMS Ponderada $a_{hw}$ ( $m/s^2$ )	Reacción al Confort
$a_{hw} < 0.747$	1. Aceptable
0.747 – 1.73	2. Ligera molestia
1.73 – 3.06	3. Poco incómodo
3.06 – 6.59	4. Incómodo
$a_{hw} \geq 6.59$	5. Muy incómodo

### 5.1.3. Valor RMS actual (“Running RMS”)

Este método toma en cuenta impactos ocasionales y vibraciones transitorias por medio del uso de una constante de tiempo corta. La magnitud de la vibración se define como un valor máximo de la vibración transitoria (MTVV), dado como el máximo de  $a_w(t_0)$  definida por:

$$a_{w(t_0)} = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)^2 dt] \right\}^{1/2} \quad 5.5$$

Donde

$a_w(t)$  es la aceleración instantánea ponderada en frecuencia;

$\tau$  es la constante de integración en el tiempo para promedio “running”,  $\tau = 1$ ;

$t$  es tiempo, la variable de integración;

$t_0$  es el momento de observación (tiempo actual).

El valor máximo de la vibración transitoria, MTVV, se define por:

$$MTVV = \max [a_{w(t_0)}] \quad 5.6$$

Es decir, es el valor de mayor magnitud de  $a_{w(t_0)}$  obtenido durante el período de medición  $T$ .

#### 5.1.4. Análisis estadístico

Mediante la realización de un análisis estadístico de la señal obtenida durante la medición se puede descubrir como los niveles de la vibración variaron con respecto al tiempo, por ejemplo, mediante una curva acumulativa. Una curva de distribución acumulativa es una forma de representar la información de la misma señal de vibración. Estas curvas de distribución grafican el porcentaje del tiempo total de medición para el cual un nivel de vibración dado fue excedido. El uso de percentiles junto con los valores r.m.s., cresta, pico e indicadores, proporcionan un ambiente completo de la vibración para su análisis.

#### 5.2. Análisis en el dominio de la frecuencia

Dado que la forma en la que la vibración afecta la salud y el confort dependen del contenido en frecuencia, se realizan diversos análisis en el dominio de la frecuencia, como se indica a continuación.

##### 5.2.1. Análisis en bandas de 1/3 de octava

La octava es un intervalo definido como una norma tradicional para el análisis acústico incluyendo la vibración mecánica. Para casos de mayor precisión se utiliza en análisis por bandas de 1/3 de octava. Una octava es una banda de frecuencia donde el límite de frecuencia superior es el doble del límite inferior.

Este análisis es útil para identificar vibraciones que se encuentran dentro o fuera de los límites de la Norma Oficial de vibraciones en centros de trabajo NOM-024-STPS. Además proporciona información valiosa para el diagnóstico de posibles alteraciones a la salud y al confort [5].

El intervalo de interés en frecuencias para el despliegue de la información en bandas de 1/3 de octava para vibraciones en cuerpo entero es de 1Hz a 80Hz, mientras que para análisis de vibraciones en extremidades superiores es de 8 Hz a 1600 Hz.

En la figura siguiente se muestra el espectro en frecuencias obtenido para la herramienta descrita en 5.2.1.

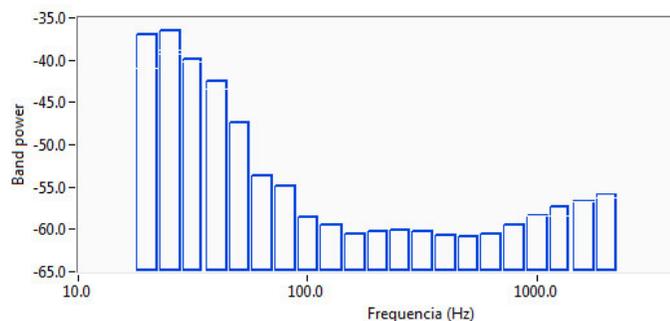
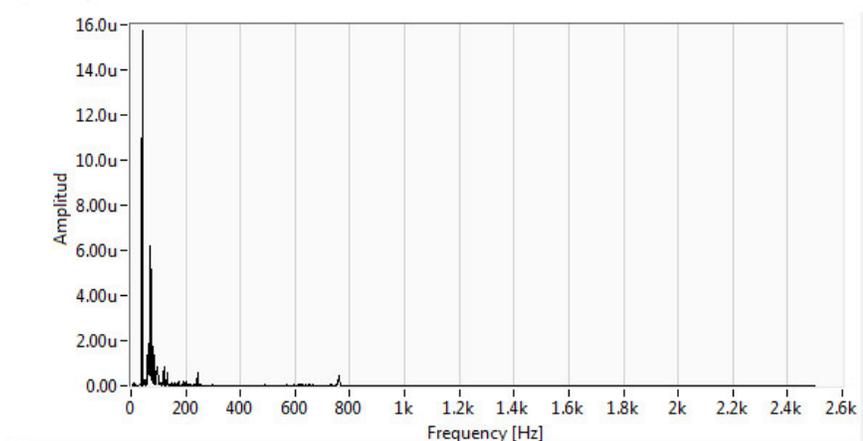


Figura 5.1: Espectro en frecuencias en bandas de 1/3 de octava.

### 5.2.2. FFT

El análisis frecuencias es una de las técnicas más utilizadas para el análisis de señales. La forma más común de procesamiento de señales es conocida como FFT, o Transformada de Fourier. Este es un método que consiste en llevar una señal real variante en el tiempo y dividirla en componentes, cada uno con una amplitud, fase y frecuencia.

De acuerdo a la teoría de Fourier todas las formas de onda, no importa su complejidad, pueden ser expresadas como la suma de ondas sinusoidales de varias amplitudes, fases y frecuencias. La figura 5.1 muestra el espectro en frecuencia obtenido mediante la FFT de un *Mototool* o rectificadora marca Bosch de 3000W



**Figura 5.2** Espectro en frecuencia de la aceleración de una rectificadora marca Bosch de 3 kW.

### 5.2.3. Patrón de Modelo AR

Este análisis en obtener la envolvente del espectro en frecuencia de la señal, considerado los picos y los valles de la señal, y a partir de ello obtener como resultado el porcentaje de energía presente en cada una de las bandas respecto a total de la energía de la señal.

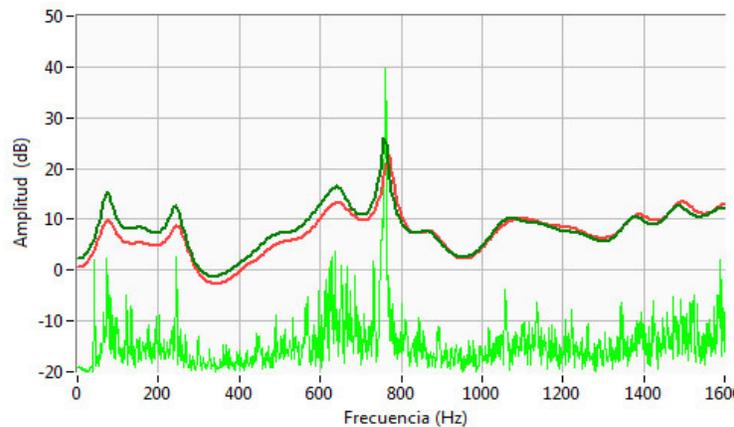
Esto es importante porque permite ver en que bandas de frecuencias se concentra la mayor energía de la señal de manera sencilla, sin la necesidad de utilizar todos los valores obtenidos del análisis de la FFT.

La envolvente del espectro normalizado se obtiene mediante la respuesta de un filtro auto regresivo, como se mostró en el capítulo 3. Tomando dicha envolvente, se separa en bandas de frecuencia considerando los valles del espectro de la señal.

Originalmente se cuentan con los tres componentes X, Y y Z para una señal de vibración humana obtenidos del acelerómetro triaxial, de los cuales se selecciona el aquel con el mayor valor de aceleración r.m.s para realizar este análisis. Lo anterior se llevó a cabo debido a que se puede observar que las señales de los tres ejes presentan respuestas en frecuencia muy similares, se decidió tomar como referencia aquel eje cuyo valor de aceleración contribuye mayormente al valor de la aceleración total de la vibración.

El número de coeficientes  $p$  utilizados para este caso es  $p=30$ , y se obtuvo a través de varias pruebas en las que se utilizaron diversos valores. Se eligió este valor, ya que para las respuestas en frecuencia del tipo de señales evaluadas es suficiente para poder distinguir las frecuencias principales sin llegar a perder rasgos (caso de  $p$  menor). Si  $p$  es mayor la resolución del filtro tiende a parecerse a respuesta en frecuencia obtenida mediante FFT y por lo tanto hay mayor susceptibilidad entre señales del mismo tipo de la misma clase. Este valor es suficiente y no compromete la carga de trabajo del sistema. Este vector de 30 coeficientes obtenidos, es utilizado para generar patrones entre las clases de las señales estudiadas. Esto se verá con mayor detalle en el capítulo 6.

En la figura siguiente se muestra el espectro en frecuencias obtenido para la herramienta descrita en 5.2.2.



**Figura 5.3** - Envolturas del espectro en frecuencia obtenidas mediante el modelo AR,  $p = 30$ .



## 5.1. Resumen del capítulo

En este capítulo se describieron los rasgos característicos para la evaluación de las vibraciones para sujetos expuestos, tanto en el dominio del tiempo como en el de la frecuencia.

En el dominio del tiempo se definen los valores RMS en lapso de observación y su relación con las reacciones al confort para exposición de vibraciones en extremidades superiores como en cuerpo completo. Cabe mencionar que los valores mostrados para el confort en extremidades superiores están basados en estudios recientes realizados por investigadores japoneses y que siguen en investigación.

De igual manera se describe el valor r.m.s. actual de la aceleración ponderada en frecuencia para vibraciones con contenido de impactos. Otro análisis de utilidad que ayuda a caracterizar mejor las señales de vibración son parámetros estadísticos.

En el dominio de la frecuencia se presenta los análisis clásicos mediante el algoritmo *FFT* y en bandas de 1/3 de octava, además del análisis mediante el modelo auto regresivo para determinar las zonas en el dominio de la frecuencia en los que se concentra la energía de la señal.

## Capítulo 6

# Reconocimiento de patrones y red neuronal

### 6.1. Introducción

Hoy en día es posible adaptar un algoritmo automático e inteligente capaz de reconocer medidas de vibración, por ejemplo, mediante características de la forma de onda de la señal en el dominio del tiempo o de la frecuencia en conjunto con parámetros estadísticos.

Las redes neuronales artificiales son un ejemplo de esta tecnología de análisis, utilizadas exitosamente en diversas áreas. El algoritmo tipo retro-propagación es la más popular y ha sido aplicada en el 80% de los casos con alto éxito [33].

### 6.2. Corpus de vibraciones

El corpus de la exposición a vibraciones en cuerpo humano está conformado por señales de vibración recolectadas durante 1 segundo, los cuales fueron obtenidos durante cuatro jornadas de medición distintas dentro de un mismo centro de trabajo, con el propósito de caracterizar la exposición típica durante el uso de las herramientas y equipos que son fuentes de vibraciones mecánicas hacia los trabajadores.

Se hace mención que aunque los tiempos de medición recomendados son de 2 a 5 minutos, se decidió tomar secciones de 1 segundo debido a que en las actividades evaluadas los usuarios de las herramientas y/o equipos realizan labores muy rápidas, como por ejemplo una perforación con taladro o corte de metal, que se observó que pueden ser rápidas.

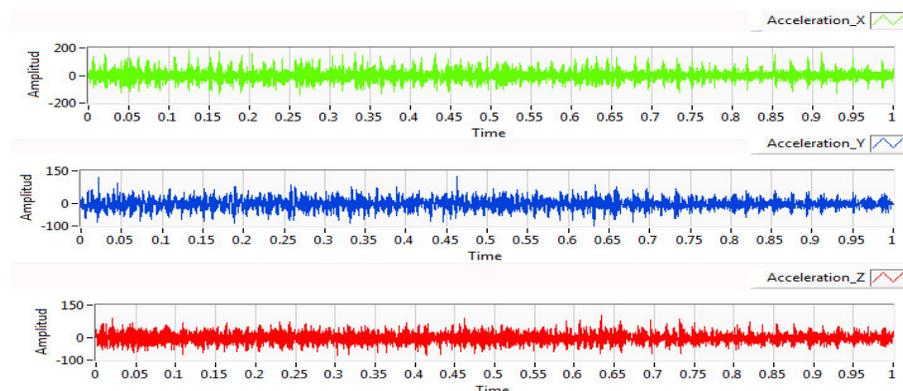


Figura 6.1 - Señales en los ejes X, Y, Z. Cortadora.

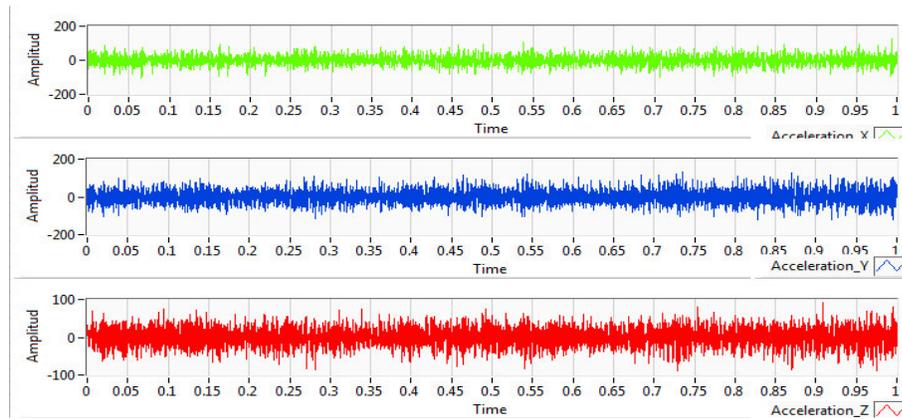


Figura 6.2 - Señales en los ejes X, Y, Z. Pulidor.

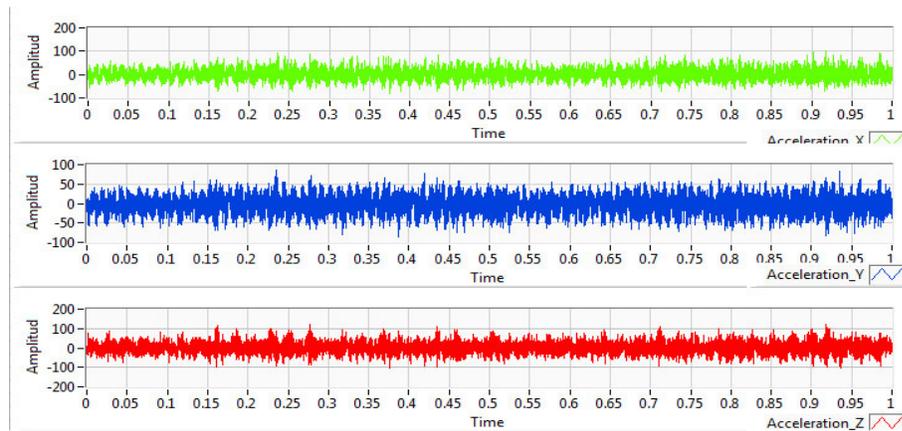


Figura 6.3 - Señales en los ejes X, Y, Z. Taladro.

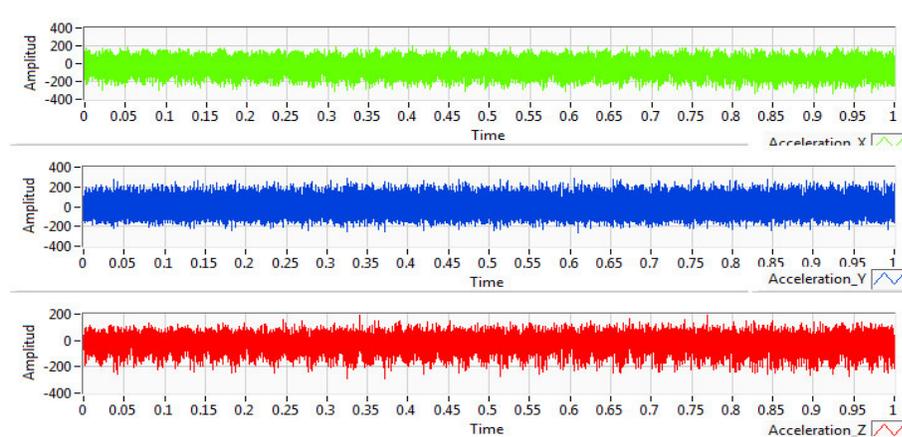


Figura 6.4 - Señales en los ejes X, Y, Z. Taladro rotomartillo.



Equipo evaluado:

**Tabla 6.1:** Relación de equipo y herramienta evaluado

Equipo / herramienta	Marca - Modelo	Especificaciones
<b>Cortadora</b>	Bosch – GCO-142	2000W – 3500 rpm
<b>Talado c/ Rotomartillo</b>	Bosch – GMB 13-2	320w – 500 a 1000 rpm
<b>Mototool</b>	Bosch	300W
<b>Cortadora (Chopsaw)</b>	DeWalt B28700 –B13 14”	2000W
<b>Pulidor Recto (Portable Grinder)</b>	---	500 W
<b>Caladora</b>	DW313 - Jigsaw	300 W

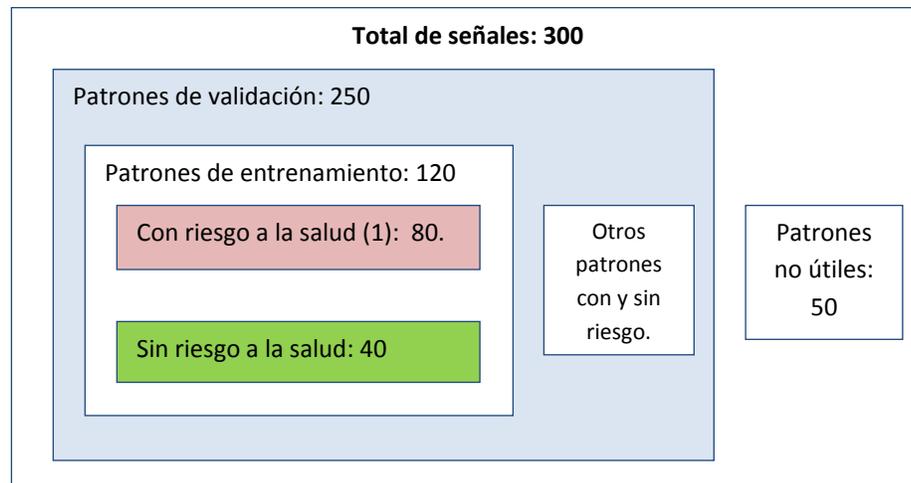
### 6.3. Creación de los patrones representativos para posibles alteraciones a la salud.

Los puntos primordiales en este sentido son la extracción de parámetros y el entrenamiento y reconocimiento.

La creación de patrones representativos incluye rasgos característicos que puedan ser utilizados para la detección del grado de probabilidad de afectación a la salud. Se siguió la siguiente metodología:

- Obtener un corpus de calidad
- Aplicar pre procesamiento necesario al corpus
- Seleccionar, diseñar y programar algoritmos y métodos que se utilizarán para la extracción de parámetros a utilizar para el reconocimiento. En este caso se determinó utilizar el valor total de la aceleración r.m.s. ponderada en frecuencia, así como los componentes del modelo autor regresivo en frecuencia (30 coeficientes).
- Entrenar el sistema. Se optó por el uso de una red neuronal tipo perceptrón multicapa, debido a que está demostrada su eficiencia en trabajos similares de reconocimiento de ruido y vibraciones, además de su facilidad de uso.
- Verificar el grado (%) de aceptación del sistema (reconocimiento). Se realiza mediante la observación y análisis de los patrones que son efectivamente clasificados y/o reconocidos.

Se tienen alrededor de 300 señales almacenadas las cuales se dividen de la siguiente forma:



**Figura 6.5** - Conjuntos de patrones utilizados.

Los patrones de prueba (1) son señales de vibración que contienen características para el daño a la salud:

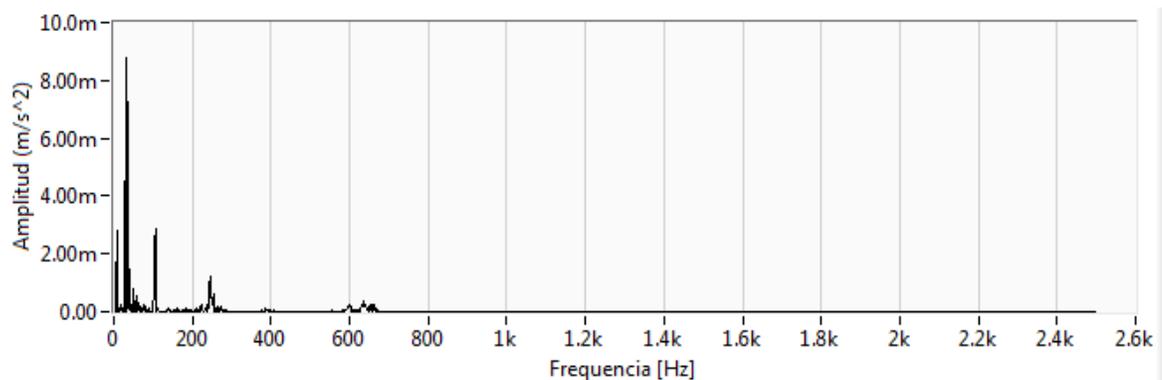
1. Sin riesgo
2. Bajo Riesgo.
3. Alto riesgo.

Los patrones de validación son señales de vibración almacenados y clasificados por marca y modelo. Incluyen señales con y sin características de daño a la salud.

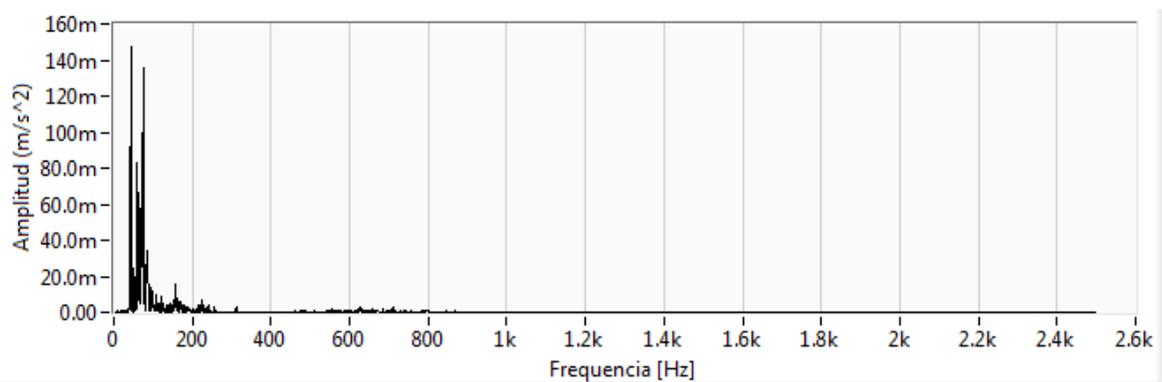
Otros patrones no se utilizan por contener ruido o eventos deseados en la señal.

Esta clasificación de posible riesgo a la salud está hecha con base en las características espectrales que tienen obtenidas mediante del modelo auto regresivo, y del valor RMS total de la aceleración. Las características del contenido espectral dependen del tipo de herramienta utilizada, y en menor medida del tipo de uso que se le brinde a la herramienta. Esta tipo de clasificación también obedece al hecho de que no existe una relación cuantitativa entre las señales de vibraciones y los efectos específicos a la salud humana, por lo que se trata de obtener rasgos características generales de señales que pueden ocasionar algún efecto a la salud.

a)



b)



**Figura 6.6** - Espectros en frecuencia de una pulidora con a) Sin riesgo a la salud, b) Con Alto riesgo a la salud.

#### 6.4. Arquitectura de la red neuronal utilizada

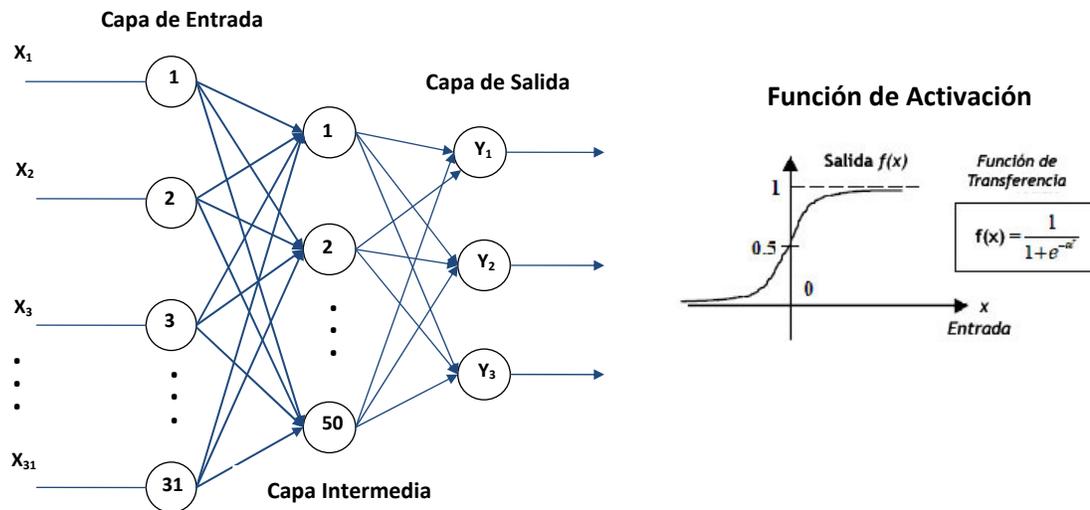
La red neuronal artificial que se utilizó en este proyecto se basa en la arquitectura de *FeedForward / BackPropagation* en un perceptrón multicapa.

La importancia de esta arquitectura consiste en su capacidad de auto adaptar los pesos de las neuronas de las capas intermedias para aprender la relación que existe entre un conjunto de patrones dados como ejemplo y sus salidas correspondientes. Este tipo de red es altamente aplicada en el reconocimiento de patrones ya que su algoritmo de adaptación de las variables mediante su entrenamiento le permite identificar y clasificar señales incluyendo aquellas que nunca le han sido presentadas [34].

## 6.5. Topología

Una vez que se tuvieron los patrones listos, se agruparon de acuerdo a las categorías mencionadas anteriormente y se eligieron los más representativos de cada clase. Cabe señalar que a lo largo de este trabajo se realizaron varias pruebas y modificaciones a la topología de la red neuronal, obteniéndose y modificándose con diversas cantidades de neuronas intermedia, probándose su rendimiento con los patrones de prueba 2 y se escogía la de mejor desempeño. Esta red neuronal y la interfaz de usuario fueron programadas en MATLAB®.

Después de todas las pruebas se llegó a la siguiente topología:



**Figura 6.7** Topología de la red neuronal utilizada en el reconocimiento de patrones

Cómo se muestra en la Figura 6.6, la red neuronal utilizada contiene:

- Una capa de entrada con 31 neuronas:
  - Acepta patrones conformados por 30 valores provenientes del vector de coeficientes LPC (5.2.3) más un valor de aceleración ponderada en frecuencia total de la señal de vibración.
- Una capa intermedia con 50 neuronas.
- Una capa de salida con 3 neuronas.

### 6.5.1. Entrenamiento

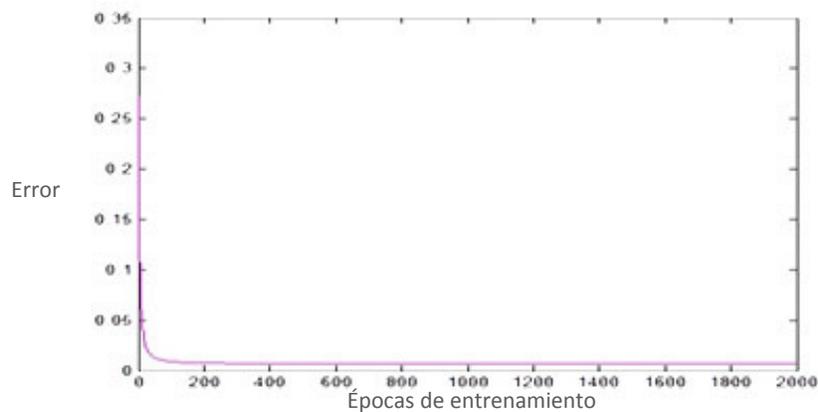
Para el entrenamiento de la red neuronal se crearon 30 patrones de cada tipo de herramienta y de probabilidad de riesgo a la salud, de acuerdo a lo descrito en la siguiente tabla:

**Tabla 6.2:** Numero de patrones generados para el entrenamiento

Equipo / herramienta	Riesgo	No de Patrones
<b>Cortadoras</b>	Sin riesgo	10
	Bajo Riesgo	10
	Alto Riesgo	10
<b>Talado c/ Rotomartillo</b>	Sin riesgo	10
	Bajo Riesgo	10
	Alto Riesgo	10
<b>Mototool</b>	Sin riesgo	10
	Bajo Riesgo	10
	Alto Riesgo	10
<b>Pulidor Recto (Portable Grinder)</b>	Sin riesgo	10
	Bajo Riesgo	10
	Alto Riesgo	10

Los instrumentos que no aparecen con respecto de la tabla 6.1 son debido a que no se cuentan con suficientes muestras para poder ser evaluados. Las cortadoras, debido a sus especificaciones similares, se contemplan dentro de una misma categoría.

Durante el entrenamiento se llegó a un mínimo de error de 0.01 en un total de 2000 épocas, cómo se muestra:



**Figura 6.8** Desarrollo del entrenamiento de la red neuronal



## 6.6. Resumen del capítulo

A través de este capítulo, se describió el diseño de una red neuronal artificial usada en una etapa del desarrollo de este proyecto, basada en una arquitectura tipo *backpropagation*, desarrollada y programada con la herramienta computacional MATLAB<sup>®</sup>™ para el diseño, entrenamiento y operación para diagnóstico de posibles alteraciones a la salud.

Dado el tamaño de las muestras de entrada, se pudo proponer una arquitectura inicial, que mediante varias pruebas de ajuste y entrenamiento, se pudo perfeccionar hasta adquirir aquella que generara resultados satisfactorios y que permitiera cumplir los objetivos planeados.



## Capítulo 7

### Pruebas y resultados

#### 7.1. Puntos de medición

Las pruebas se realizaron en un taller de fabricación de dispositivos metálicos tales como casetas, ductos y módulos, en donde los trabajadores principalmente utilizan láminas de acero, aluminio, perfiles metálicos y herramientas eléctricas realizando actividades como corte, doblado, perforado, remachado y soldado de piezas metálicas. Para esta la evaluación de la exposición de vibración en este tipo de ambientes, la norma nacional NOM-024-STPS 2001 indica las recomendaciones que se deben considerar al ubicar los puntos de medición en centros de trabajo.

##### 7.1.1. En cuerpo completo

Los puntos de medición se localizaron en el plano de sustentación de los trabajadores. En cada punto se localizaron los tres ejes ortogonales X, Y y Z para la colocación del acelerómetro triaxial. El tiempo de medición fue de un minuto y se registró y almacenó la respuesta en el tiempo así como en frecuencia.

Se obtuvieron  $a_x$ ,  $a_y$  y  $a_z$ , donde

Eje x es la dirección de espalda a pecho

Eje y es la dirección de lado derecho a izquierdo.

Eje z es la dirección de los pies o parte inferior a la cabeza.

##### 7.1.2. En extremidades superiores

Los puntos de medición se ubicaron en las asas o manijas y manuales de las herramientas y equipo a evaluar. En cada punto se localizaron los tres ejes ortogonales X, Y y Z lo mas cercanamente posible al punto de contacto de las vibraciones con la mano de acuerdo con el sistema de coordenadas biodinámicas y basicéntricas para la colocación del acelerómetro triaxial. El tiempo de medición recomendado es de 2 a 5 minutos.



## 7.2. Metodología de la medición

1. Obtener información del lugar de medición así como de las actividades de los puestos de trabajo a evaluar (Tiempo de exposición y herramientas de trabajo.)
2. Armar la cadena de medición Acelerómetro triaxial 3093B1 – Cable – Modulo de adquisición de datos NI 9234 – computadora portátil.
3. Verificación del sistema de acuerdo a 7.2.1.
4. Colocar el acelerómetro triaxial de acuerdo a lo especificado en 7.1.1 y 7.1.2. Se debe tener especial cuidado en el manejo del acelerómetro y el cable de conexión a fin de que no sufran caídas o golpes, antes y/o durante la medición ya que pueden dañarse o introducir ruido en la señal, además de no intervenir en las actividades y/o seguridad del trabajador.
5. Una vez que se el trabajador se encuentra en condiciones de exposición a vibraciones, se inicia el sistema para almacenar las señales de vibración durante 1 minuto, comenzando la medición cuando el trabajador ha iniciado a operar la herramienta o equipo bajo evaluación.
6. Tomar fotografías de los puntos y condiciones de medición a la exposición a vibraciones.
7. Para cada medición almacenar la información más importante del evento: Fecha, hora, marca y modelo del equipo o herramienta bajo evaluación, puesto de trabajo, nombre del trabajador expuesto, valores de calibración y otros indicados en la NOM-024-STPS-2001 [14].
8. El sistema es capaz de proporcionar el valor de la exposición a la vibración al finalizar la medición así como el diagnóstico de si la exposición se encuentra o no dentro de los límites de la NOM-024-STPS-2001.
9. El sistema ofrece un diagnóstico de los efectos al confort y a la probabilidad de riesgo a la exposición. Los datos almacenados pueden ser procesados posteriormente por el sistema para análisis posterior.

*Nota:* El sistema también es capaz de proporcionar el valor de la exposición a vibraciones de acuerdo a la Norma local NADF-004-AMBT-2005 del Distrito Federal. Dichas mediciones se realizan en edificaciones. También se realizaron algunas pruebas para este tipo de exposición, pero no se reportan en este estudio ya que fueron en menor cantidad.

### 7.2.1. Verificación del sistema

La verificación del sistema o “calibración en sitio” que se refiere a la verificación de toda la cadena de medición conectada mediante el uso de un calibrador de vibraciones o patrón de referencia para evitar posibles desviaciones de los valores medidos. Para este trabajo se utilizó un calibrador con las siguientes características:

- Marca y modelo: Sinocera Piezotronics Inc. YE5501
- Amplitud de la aceleración de salida: 1g (RMS)  $9.81 \text{ m/s}^2 \pm 5\%$
- Frecuencia de salida: 160Hz  $\pm 1.5\%$  Constante
- Forma de onda de salida: Seno.

### 7.3. Medición

#### 7.3.1. Características de la medición

Se realizaron varias sesiones de medición principalmente de exposición a vibraciones en mano brazo (HAV) que son las que se reportan por aportar mayor cantidad de datos a la investigación:

Fechas: 23 de Marzo de 2011, 01, 08 y 15 de Abril de 2011.

Horario de las mediciones: 16:00 – 19:00.

Lugar de las mediciones: Taller ubicado en Ecatepec, Estado de México.



**Figura 7.1** - Medición en sitio (ambiente laboral)

### 7.3.2. Resultados

El sistema obtuvo un 90% de efectividad en el reconocimiento de herramientas de trabajo y un 75% en el reconocimiento de posibles alteraciones a la salud. Mide efectivamente todos los valores requeridos en las Normas correspondientes. Esto se comprobó en pruebas con un equipo CESVA SC310 con función de vibración.



**Figura 7.2 -** Medición en herramientas y equipos de trabajo

Izq. superior: Mototool. Der. Superior: Pulidor recto.

Izq. inferior: Pulidor. Der. Inferior: Cortadora.

Las figuras anteriores son algunas de las fotos tomadas para corroborar las mediciones realizadas por el sistema.



## Conclusiones

Se ha cumplido el objetivo de diseñar y programar un sistema que permite realizar mediciones correctas de la exposición de vibraciones mecánicas al cuerpo humano, siendo transmitidas ya sea por mano brazo o por cuerpo completo. Es un sistema diseñado bajo las especificaciones mencionadas por las Normas Internacionales ISO2631 1 y 2; ISO 5349-1 para la medición y evaluación de vibraciones de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-024-STPS 2001.

Se cumplió el objetivo de evaluar vibraciones mecánicas, que por sus características y tiempo de exposición, sobre personas, sean capaces de alterar la salud y el confort. El sistema permite evaluar vibraciones mecánicas, obtener sus características en el tiempo y frecuencia además de los principales indicadores de la exposición de vibraciones tanto para extremidades superiores como para cuerpo entero, y es capaz de realizar análisis espectrales (Bandas de 1/3 de octava, FFT y modelo auto regresivo).

Se cumplió el objetivo de Analizar señales de vibraciones mecánicas y extraer características importantes sobre la salud y el confort para personas expuestas. En la medida de los estudios realizados en el campo y la información disponible, el sistema puede establecer el grado de molestia (alteración al confort) en la categoría de "Aceptable", "Ligera molestia", "poco incómoda, incómoda", "muy incómoda" y "extremadamente incómoda" (este último únicamente para exposición en cuerpo completo). Por otro lado indica la posibilidad de daño a la salud en las categorías de "Sin riesgo", "Bajo Riesgo" y "Alto riesgo". También indica el límite de la exposición a la vibración con respecto a los valores medidos e indica el máximo permisible en función del tiempo de exposición, de acuerdo a la Normatividad mexicana vigente NOM-024-STPS-2001.

Es posible analizar señales ya almacenadas previamente sin alguna clase de procesamiento así como señales de mediciones en vivo, estas últimas pueden ser almacenadas y realizar su análisis posteriormente.

El sistema utiliza los rasgos característicos obtenidos de los procedimientos de evaluación de la exposición de vibraciones para obtener información sobre las posibles alteraciones a la salud y el confort, tanto por separado como en forma de conjuntos que crean patrones representativos de la exposición humana a vibraciones.

Se cumplió el objetivo de construir un modelo mediante una red neuronal para el reconocimiento de patrones de exposición humana a vibraciones. La identificación de los patrones en las señales de vibraciones se realiza mediante una red neuronal tipo perceptrón multicapa. De acuerdo a la información con la que se cuenta de las fuentes de vibración, el sistema es capaz de reconocer por arriba del 80% el tipo de de estos patrones únicamente para las herramientas evaluadas en las condiciones físicas y de trabajo en las que se realizó este estudio. Es necesario ampliar el estudio a



otros ambientes de trabajo en los que se encuentren herramientas similares y comparar con los resultados encontrados en este estudio.

Para el caso específico la evaluación de exposición a vibraciones en nuestro país, la ventaja principal de utilizar un instrumento virtual para esta aplicación es que incluye los dos procedimientos de evaluación que se incluyen en la Norma oficial NOM-024-STPS-2001 así como el procedimiento indicado en la Norma local NADF-004-AMBT-2004, por lo que puede ser utilizado por especialistas en el ramo. Otra ventaja es que se pueden agregar de manera sencilla otros tipos de análisis, por ejemplo análisis cepstral, para obtener mayor información de las señales. De igual manera el fácil implementar mejoras y actualizaciones del sistema.

Finalmente se realizaron pruebas de laboratorio y de campo para la evaluación del sistema.

Se cumplieron los objetivos del trabajo general y particulares y se demostró la hipótesis. El modelo computacional propuesto será de gran utilidad para la medición y análisis de la exposición de vibraciones en ambientes laborales.



## Trabajo futuro

Cómo trabajo futuro, se propone que el sistema se puede ampliar para evaluar distintas posturas de exposición, por ejemplo en transportes públicos ó evaluar la correlación entre la exposición a ruido y vibraciones producidos por una misma fuente; así cómo la aplicación de otras técnicas para la extracción de rasgos característicos, por ejemplo el uso de wavelets, o de técnicas de clasificación, por ejemplo lógica difusa o minería de datos.

También se propone la implementación de un sistema remoto de adquisición de datos para aquellas ubicaciones en las que sea complicado el acceso a los puntos de medición o en sistemas en los que el sujeto expuesto se encuentra en movimiento.

Se propone evaluar otros tipos de herramientas y maquinarias para obtener una mayor cantidad de información de tipos de señales de vibración.

Explorar nuevas formas de crear patrones así como combinar la información con más de una red neuronal u otros sistemas de clasificación. Así como explorar topologías de redes neuronales que se puedan adaptar fácilmente cuando se agreguen más categorías o se tengan más patrones de una misma categoría para mejorar el reconocimiento, sin necesidad de tener que re-entrenar la red o redes que se tengan.



## Referencias bibliográficas

- [1] A. CARRION, *Diseño de espacios arquitectónicos*, Primera ed. Barcelona, España: Edicions UPC, 1998.
- [2] C. DE SILVA, *Vibration: Fundamentals and Practice, Second Edition.*: CRC Press, 2006.
- [3] D. INMAN, *Engineering Vibration*, segunda ed. New Jersey: Prentice hall, 2001.
- [4] R. CONWAY, D. MEAGHER, G. ÓLAIGHIN A. GODFREY, *Direct Measurement of human movement by accelerometry.*, 2000.
- [5] BRÜEL & KJAER, *Human Vibrations.*: BRÜEL & KJAER, 1989.
- [6] N. J. MANSFIELD, *Human Response to Vibration.*: CRC Press, 2004.
- [7] AUSTIN BRADFORD-HILL, ""The Environment and Disease: Association or Causation?"" ,"  
*Proceedings of the Royal Society of Medicine*, vol. 58, no. 5, pp. 295-300, 1965.
- [8] M. J. GRIFFIN, *Handbook of Human Vibration.*: Academic Press, 1996.
- [9] LEBOEUF Y LINGS S, *Whole-body vibration and low back pain: a systematic, critical review of the epidemiological literature 1992-1999.*: Int. Arch Occup Environ Health, 2000, vol. 73.
- [10] International Organization for Standardization, "ISO 2041: Mechanical vibration, shock and condition monitoring - Vocabulary," 2009.
- [11] Metra Mess- und Frequenztechnik in Radebeul e.K., "Application Note: Piezoelectric Accelerometers IEPE Accelerometers," Radebeul, Germany, 2008.
- [12] DYTRAN Instruments Inc. (2011, Junio) Dytran Instruments Inc. [Online].  
<http://www.dytran.com/go.cfm/en-us/content/category/2/Accelerometers/x?SID=>
- [13] Xu Zhong-Ming, He Yansong Zhang Zhi-Fei, "Design of Measurement and Evaluation System for human exposure to mechanical vibration," no. 978-1-4244-3864-8/09, 2009.
- [14] SECRETARIA DEL TRABAJO Y PREVISION SOCIAL, "NORMA Oficial Mexicana NOM-024-STPS-2001, Vibraciones-Condicionde de seguridad e higiene en los centros," 2002.
- [15] International Organization for Standardization, *ISO 2631-1, Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements.*, 1997.



- [16] SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE, "NORMA AMBIENTAL PARA EL DISTRITO FEDERAL NADF-004-AMBT-2004 ," MÉXICO D.F., 2005.
- [17] H. PÉREZ-MEANA, *Advances in Audio and Speech Signal Processing: Technologies an Applications.:* Idea Group Pub., 2007.
- [18] ANDREAS E. KLEMPNOW Y VICENTE H. LESCANO JUAN J. PIÑEYRO, "Análisis de Señales: Aplicaciones en el Área de las Vibraciones Mecánicas".
- [19] M. CHOW, "Motor incipient fault detection using artificial neural network and fuzzy logic technologies," 1997.
- [20] R. SCHAFER A. OPPENHEIM, *Discrete-time Signal Processing.* New Jersey: Prentice-Hall, 1989.
- [21] B. GOLD L.R. RABINER, *Theory and Application of Digital Signal Processing.* New Jersey: Prentice-Hall, 1975.
- [22] DYTRAN INSTRUMENTS INC., "Dytran Piezoelectric and DC MEMS Sensor for Measurement and Monitoring," 2011.
- [23] DYTRAN Instruments Inc., "Accelerometer Mounting Considerations," Chatsworth, California. U.S.A., 2011.
- [24] PALOMINO MARÍN EVELIO, *La medición y análisis de Vibraciones en el diagnóstico de maquinas Rotatorias.* Cuba: División de Ingeniería de las Vibraciones y Diagnóstico, 2000.
- [25] SUSANA CAVIA, "Medida de las vibraciones Mano - Brazp".
- [26] L. NOTINI N.J. MANSFIELD, "Evaluation of Digital Implementations of Whole Body Vibration Frequency Weighting filters and the effect of filter phase response on whole-body Vibration metrics," 2004.
- [27] S.A. NAYFEH L.ZUO, "Low orden continuous - time filters for approximation of the ISO 2631-1 human vibration sensitivity weightings," *Journal of Sound and Vibration* , no. 265, pp. 459-465, 2002.
- [28] J.C. BURGOS DÍAS, J.C. GARCÍA-PRADA E. RIVAS TRUJILLO, "Methodology for Vibration Signal Processing of an On-load Tap Changer," in *Advances in Vibration Analysis Research.:* InTech, 2011.
- [29] BRÜEL AND KJAER, "Discrete Fourier Transform and FFT Analyzers," *Technical Review To advance Techniques in Acoustical, Electrical and Mechanical Measurement*, no. 1, 1979.



- [30] BRÜEL & KJAER, "Discrete Fourier Transform and FFT Analyzers," *Technical Review to advance Techniques in Acoustical, Electrical and Mechanical Measurement*, no. 1, 1979.
- [31] K. KUME, Y. IWATA S. MAEDA, "Evaluation of localized vibration using the method of category judgment," *Jpn Ind Management Assoc*, vol. 34, no. 2, pp. 200-205, 1983.
- [32] N. SHIBATA S. MAEDA, "Subjective Scaling of Hand-Arm Vibration," *Industrial Health*, no. 46, pp. 118-124, 2007.
- [33] TOMMY W.S. CHOW SITAU WU, "Induction Machine Fault Detection Using SOM - Based RBF Neural Networks," *Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 1, pp. 183 - 194, Febrero 2004.
- [34] V. MARTINEZ J. R. HILERA, *Redes Neuronales Artificiales, Fundamentos, Modelos y Aplicaciones.:* Alfaomega, 2000.
- [35] A. PAPOULIS, *The Fourier Integral and its applications*. New York: McGraw Hill Inc., 1962.
- [36] E. O. BRIGHAM, *The fast Fourier Transform*. New Jersey: Prentice Hall Inc, 1974.
- [37] ANN M. NAKASHIMA, "The effect of vibration on human performance and health: A review of recent literature.," Toronto, 2004.
- [38] N. ALEM, "Application of the New ISO 2631-5 to Health Hazard Assessment of Repeated Shocks in U.S. Army Vehicles," vol. 43, pp. 403-412, 2005.
- [39] E. GAGO, M. DADAMO A. TRINELLO, "Spectral Vibration Patterns by Symbolic Computation Systems," *Recent Advances in Applied Mathematics*, pp. 263-267, 2000.
- [40] L. P. SÁNCHEZ FERNÁNDEZ, "Interpolation With Splines and FFT in Wave Signals," *Research in Computing Science*, vol. 10, pp. 387-400, 2004.
- [41] L.P. SÁNCHEZ FERNÁNDEZ, "Measurement Error of Waves in research Laboratories," *Hydraulic Engineering in México*, vol. XIX, no. 2, pp. 101-106, 2004.
- [42] D.H. SHREVE, "Signal Processing for effective Vibration Analysis," 1995.
- [43] International Organization for Standardization, *ISO 2631-2: Mechanical vibration and shock evaluation of human exposure to whole body vibration Part 1: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz).*, 2003.



- 
- [44] W. WEI, *Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods*. Toronto: Adison Wesley, 1990.
- [45] J. TUMA, T. LAGÖ, K. AHLIN A. BRANDT, "Toolboxes for analysis of sound and vibration signals with matlab," 2005.
- [46] International Organization for Standardization, "ISO 5341-1: Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration. Part 1: General requirements.," 2001.
- [47] International Organization for Standardization, "ISO 5349-2: Mechanical vibration - Measurement and evaluation of human exposure to hand transmitted vibration. Part 2: Practical guidance for measurement at the workplace," 2001.
- [48] A. CUEVAS, "Sistema para el diagnóstico incipiente en fallas en motores de inducción," Instituto Politécnico Nacional, Tesis de posgrado 2008.
- [49] MAINSFIELD J. RIMELL A., "Design of Digital Filters for Frequency Weightings Required for Risk Assessments of Workers Exposed to Vibration," *Industrial Health*, no. 45, pp. 512-519, 2007.



## Anexo 1

# Fundamentos de Acústica y Vibraciones

### A1.1 Vibración libre

La vibración puede ocurrir en diferentes direcciones y puede ser el resultado de la interacción de varios objetos. Para simplificar, se representa el movimiento en una sola dirección de una partícula en un sistema de un *grado de libertad*. El modelo más sencillo para explicar la vibración con las características mencionadas, es un *sistema masa resorte*.

Si se ignora la masa del resorte, las fuerzas que actúan en el sistema consisten en la fuerza de gravedad, jalando hacia abajo, y la fuerza del resorte empujando hacia arriba. La fuerza  $F_1$  aplicada a la masa por el resorte es:

$$F_1 = -kx \quad \text{A1.1}$$

Donde  $k$  es la constante de proporcionalidad o resistencia del resorte (N/m),  
 $x$  es el desplazamiento del resorte expresada en metros (m).

La fuerza  $F_2$  generada por la masa, es proporcional a la aceleración,

$$F_2 = ma = m\ddot{x} = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad \text{A1.2}$$

La suma de las fuerza  $F_1$  y  $F_2$  es:

$$m\ddot{x} + kx = 0 \quad \text{A1.3}$$

Al resolver la ecuación se puede observar que si la masa se mueve a la posición  $A$  y se libera la energía potencial, oscilará de manera armónica en su *frecuencia natural*  $f_n$

$$x(t) = A \cos(2\pi f_n t) \quad \text{A1.4}$$

Cada sistema, tiene una o más *frecuencias naturales*, a las cuales vibrará cuando se aplica un desplazamiento, la frecuencia natural está dada por: *documentar*

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{A1.5}$$



## A1.2 Vibración libre con amortiguamiento

La respuesta ideal del sistema masa-resorte predice que el sistema oscilará indefinidamente, sin embargo, en la vida real la oscilación libre eventualmente se detiene por lo que es necesario complementar el sistema añadiendo un nuevo elemento, el cual puede modelarse mediante una masa, un resorte y un *amortiguador (compliance)*.

La fuerza que ejerce el amortiguador, es proporcional a la velocidad de movimiento de la masa, y se expresa por la constante  $c$  ó coeficiente de amortiguamiento (N s/m).

$$f_c = c\dot{x} = c \frac{dx}{dt} \quad \text{A1.6}$$

Sumando todas la fuerzas involucradas en el sistema masa-resorte-amortiguador:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad \text{A1.7}$$

Para resolver la ecuación, se asume que la solución de  $x(t)$  tiene la forma

$$x(t) = \alpha e^{\lambda t} \quad \text{A1.8}$$

Donde  $\alpha$  y  $\lambda$  son constantes distintas a cero, por determinar. Al substituir las diferenciaciones sucesivas en la ecuación 2.7 se obtiene

$$(m\lambda^2 + c\lambda + k)\alpha e^{\lambda t} = 0 \quad \text{A1.9}$$

Como  $\alpha e^{\lambda t}$  es diferente de cero, se obtiene la ecuación característica de la forma

$$m\lambda^2 + c\lambda + k = 0 \quad \text{A1.10}$$

Resolviendo la ecuación anterior se llega a dos soluciones

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \frac{1}{2m} \sqrt{c^2 - 4km} \quad \text{A1.11}$$

Como puede observarse, la solución depende de la cantidad de amortiguamiento, por lo que se obtienen tres tipos de respuesta: sub amortiguado, críticamente amortiguado y sobreamortiguado. El valor de la constante  $c$  para alcanzar la respuesta críticamente amortiguada es

$$c_c = 2\sqrt{km} \quad \text{A1.12}$$

Para caracterizar el nivel de amortiguamiento del sistema masa-resorte-amortiguador, se utiliza una constante denominada razón o factor de amortiguamiento, definida por

$$\zeta = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2\sqrt{km}} \quad \text{A1.13}$$



La solución al sistema se presenta a continuación en la que el factor exponencial indica que tan rápido el sistema llega a ser estable, por lo que entre más grande sea, mas rápido se detiene el sistema. La función coseno indica el factor de oscilación en la respuesta.

$$x(t) = X e^{\zeta \omega_n t} \cos(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n t - \Phi) \quad A1.14$$

Donde  $\omega_n = 2\pi f_n$  es la frecuencia natural del sistema expresado en radianes,

$\Phi$  es la fase y  $X$  es la magnitud inicial

Se hace notar que en la respuesta anterior, la frecuencia de oscilación es diferente a la frecuencia natural del caso no amortiguado. La frecuencia natural amortiguada  $f_{na}$  está dada por

$$f_{na} = \sqrt{1-\zeta} f_n \quad A1.15$$

### A1.3 Vibraciones Forzadas

Un sistema masa-resorte-amortiguador, presenta vibraciones forzadas, cuando se le aplica una fuerza externa del tipo

$$F = F_0 \cos(2\pi ft) \quad A1.16$$

Las fuerzas en el sistema

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \cos(2\pi ft) \quad A1.17$$

El estado estable o equilibrio dinámico de un sistema, es la respuesta que se obtiene después de un cierto tiempo. La solución al sistema, en estado estable se puede expresa como

$$x(t) = X \cos(2\pi ft - \Phi) \quad A1.18$$

Este resultado dice que la masa va a oscilar a la misma frecuencia  $f$  de la fuerza aplicada pero con un movimiento en la fase igual a  $\Phi$ .

La amplitud de la respuesta está dado por

$$X = \frac{F_0}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-2r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad A1.19$$

donde  $r$  es definido como la razón entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural del modelo resorte-masa-amortiguador.

$$r = \frac{f}{f_n} \quad A1.20$$

El movimiento en la fase  $\Phi$ , está dado por

$$\Phi = \arctan\left(\frac{2\zeta r}{1-r^2}\right) \quad \text{A1.21}$$

La gráfica de estas funciones, tiene el nombre de respuesta en frecuencia del sistema y es una de las características más importantes de las vibraciones forzadas. En la figura 2.3 se presenta la amplitud

normalizada dada por: 
$$\frac{Xk}{F_0} = \frac{1}{\sqrt{(1-2r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad \text{A1.22}$$

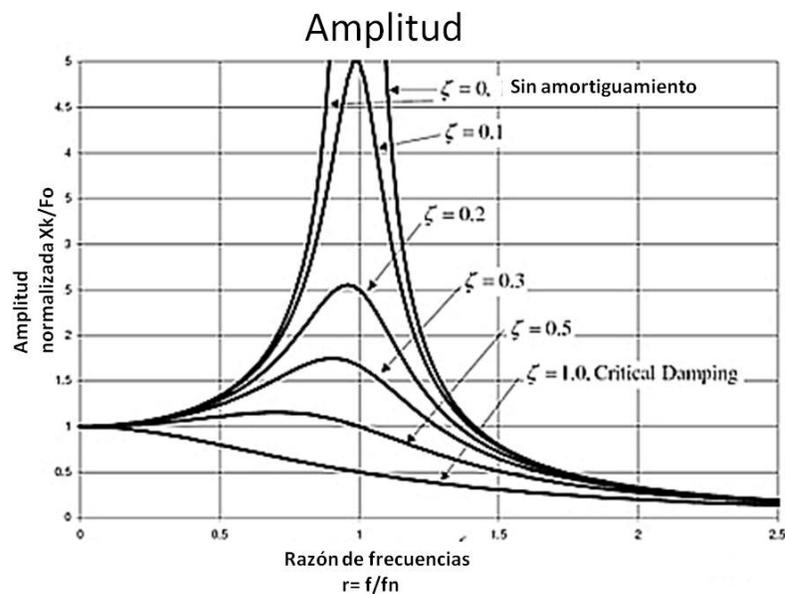


Fig. A1.1 Respuesta en frecuencia de vibración forzada. Respuesta en amplitud normalizada.

En la gráfica  $r = \frac{f}{f_n} = \frac{\omega}{\omega_n}$ ,  $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$  y  $\zeta = \frac{c}{2\sqrt{km}}$

En sistemas ligeramente amortiguado, cuando la frecuencia de excitación es cercana a la frecuencia natural ( $r \approx 1$ ), la amplitud de la vibración puede hacerse extremadamente alta. Este fenómeno es llamado *resonancia*, por lo que la frecuencia natural de un sistema es llamada *frecuencia de resonancia*.

De la figura anterior, la amplitud de la vibración  $X$  es directamente proporcional a la fuerza  $F_0$  con poco amortiguamiento, la vibración está en fase con la frecuencia de entrada cuando  $r < 1$  y a  $180^\circ$  cuando  $r > 1$ .



Cuando  $r \ll 1$ , puede deberse a que la frecuencia natural  $f_n$  es muy grande, o a que la frecuencia de excitación es relativamente baja. La amplitud de la deformación del resorte, en este caso, es únicamente  $F_0$ , en este momento, el efecto del amortiguamiento y de la masa son mínimos.

#### A1.4 Magnitud y cuantificación de las vibraciones mecánicas

Los desplazamientos oscilatorios de un objeto implican, alternativamente, una velocidad en una dirección y después una velocidad en dirección opuesta. Este cambio de velocidad significa que el objeto experimenta una aceleración constante, primero en una dirección y después en dirección opuesta. La magnitud de una vibración puede cuantificarse en función de su desplazamiento, su velocidad o su aceleración. A efectos prácticos, la aceleración suele medirse con acelerómetros. La unidad de aceleración es el metro por segundo al cuadrado ( $m/s^2$ ). La aceleración debida a la gravedad terrestre es, aproximadamente, de  $9.81 m/s^2$ .

La magnitud de una oscilación puede expresarse como la distancia entre los extremos alcanzados por el movimiento (valor pico-pico) o como la distancia desde algún punto central hasta la desviación máxima (valor pico). Con frecuencia, la magnitud de la vibración se expresa como el valor promedio de la aceleración del movimiento oscilatorio, normalmente el valor cuadrático medio r.m.s. o valor eficaz. Para un movimiento sinusoidal, el valor eficaz es el valor pico dividido por  $\sqrt{2}$ .

Cuando el cuerpo humano está en contacto con un dispositivo mecánico se desplaza de su punto de referencia. Por lo tanto, el desplazamiento es un parámetro que puede ser utilizado para describir la magnitud de la vibración. Sin embargo, las vibraciones también se pueden describir mediante la velocidad y la aceleración.

La forma y el periodo de la vibración ya sea que se utilice el desplazamiento, la velocidad o la aceleración como parámetro de medición. Únicamente las fases son distintas. En forma general, la vibración se mide mediante la aceleración.

#### A1.5 Respuesta en frecuencia del cuerpo humano

Las vibraciones mecánicas de una máquina son ocasionadas por los componentes en movimiento de una máquina. Cada componente en movimiento tiene una cierta frecuencia asociada al movimiento, por lo que la vibración total transmitida al cuerpo humano en contacto con una máquina consiste de diferentes frecuencias de vibración que ocurren simultáneamente. Este es un factor importante a tomar en consideración cuando se miden las vibraciones humanas debido a que el cuerpo humano no es igualmente sensible a todas las frecuencias de la vibración. Para esto, se debe considerar el cuerpo humano como un sistema mecánico. Este sistema es complicado debido a que

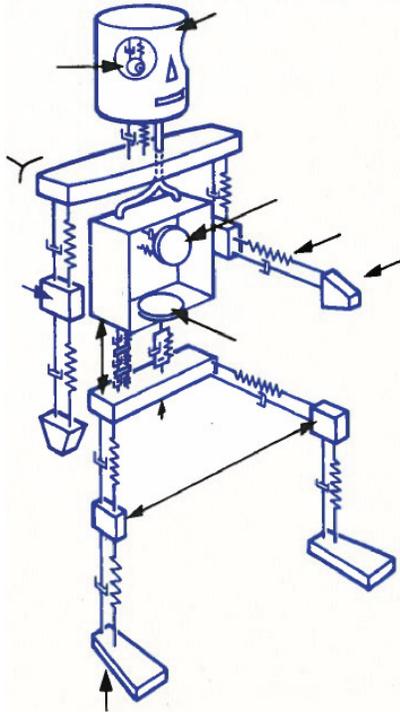


Fig. A1.2 Modelo mecánico simplificado del cuerpo humano

a) cada parte del cuerpo tiene su propia sensibilidad en intervalos distintos de frecuencia; b) el cuerpo humano no es simétrico; c) No hay dos personas que respondan de la misma manera a la vibración. Sin embargo se han desarrollado sistemas biomecánicos adecuados para simular la respuesta del cuerpo humano a la vibración.

La figura A1.2 muestra un muy simplificado modelo mecánico del cuerpo humano, donde cada sección se representa mediante una masa, un resorte y un atenuador. El cuerpo humano es un sistema fuertemente amortiguado y por lo tanto, cuando una parte es excitada a su frecuencia natural, resonará en un amplio intervalo de frecuencias en lugar de una sola frecuencia. El cuerpo humano no es simétrico y por lo tanto su respuesta a las vibraciones también depende de la dirección en que la vibración es aplicada.

Una de las limitaciones sobre la ponderación es asumir que las técnicas basadas en percepción (o valores de confort igual) pueden ser usadas para predecir daño físico. Este supuesto es una consideración importante porque, a diferencia de otros sistemas (ejemplo, visual o auditivo), la

localización anatómica, donde el daño físico puede ocurrir por vibración en todo el cuerpo, no es la misma donde están localizados los receptores fisiológicos. Por lo que hasta ahora, debe mantenerse el principio de que si se siente no saludable, probablemente es no saludable. Por esta razón se siguen buscando otros patrones de referencia.

## Anexo 2

### Curvas de Ponderación en frecuencia

A2.1 Curvas de ponderación de frecuencia para las principales ponderaciones para exposición a vibraciones en cuerpo completo.

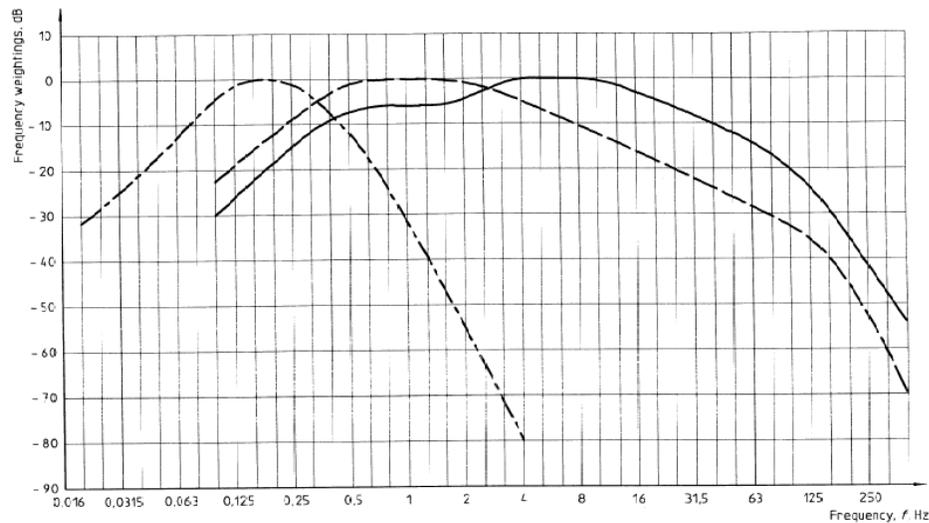


Figura A1.1 Curvas de ponderación  $W_k$ ,  $W_d$ ,  $W_f$

A2.2 Curvas de ponderación de frecuencia para las principales ponderaciones para exposición a vibraciones en cuerpo completo.

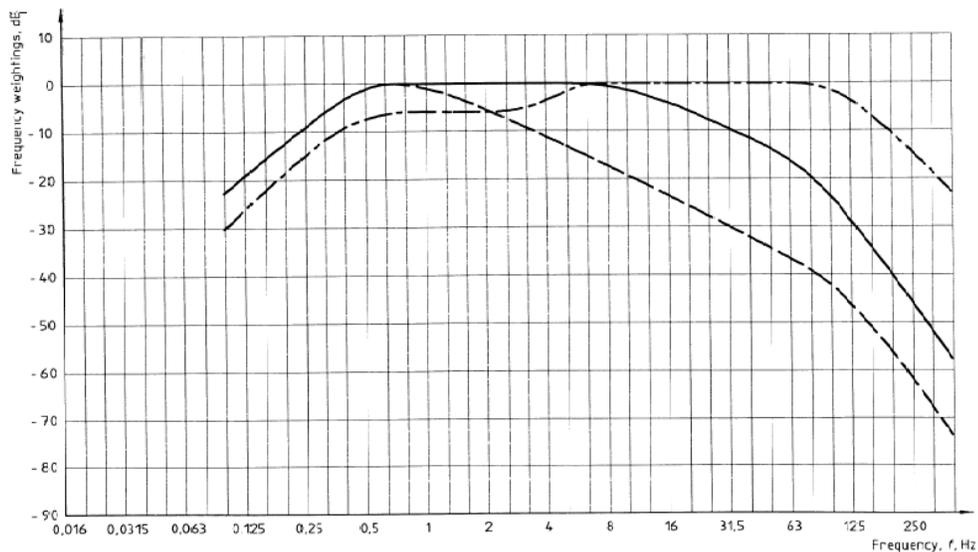


Figura A1.2 Curvas de ponderación  $W_c$ ,  $W_e$ ,  $W_j$

### A2.3 Curvas de ponderación de frecuencia para exposición a vibraciones en edificios.

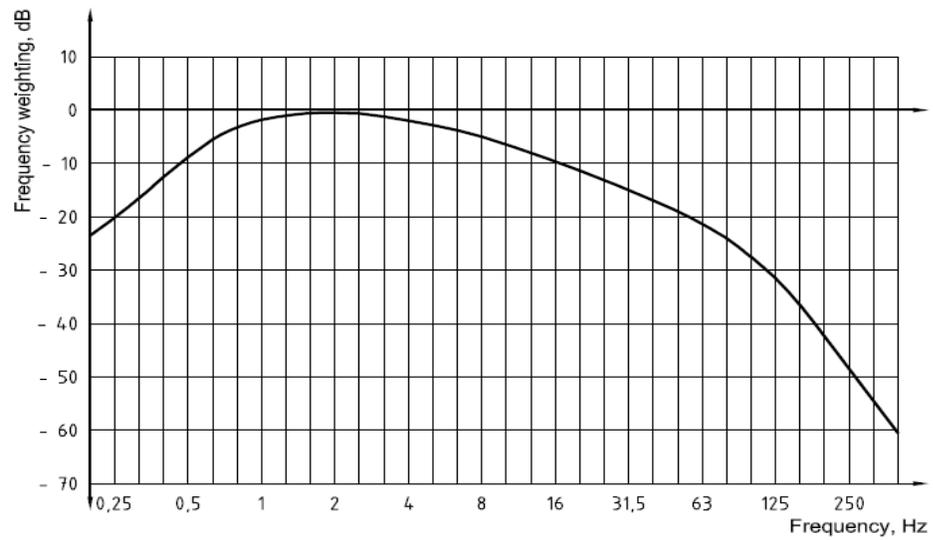


Figura A1.3 Curva de ponderación  $W_m$

### A2.4 Curvas de ponderación de frecuencia para exposición a vibraciones en extremidades superiores.

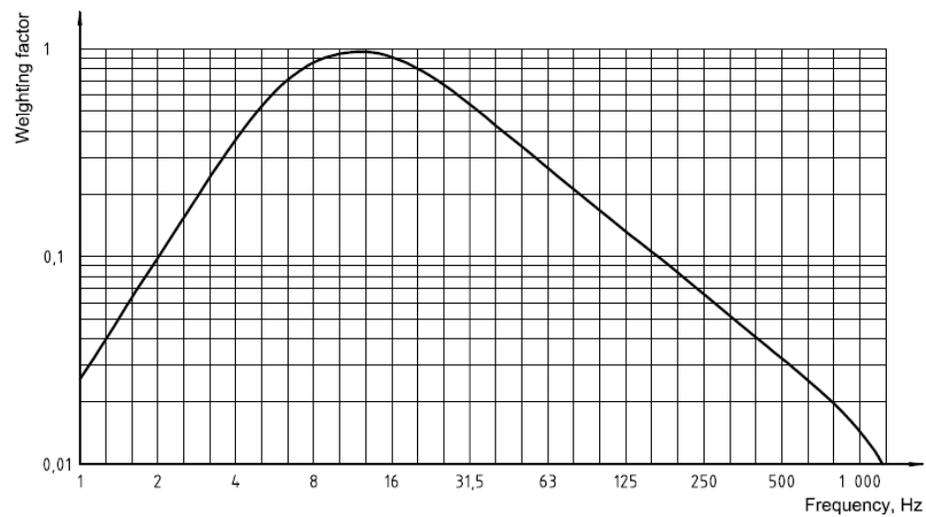


Figura A1.3 Curva de ponderación  $W_h$

# Anexo 3

## Información técnica acelerómetro

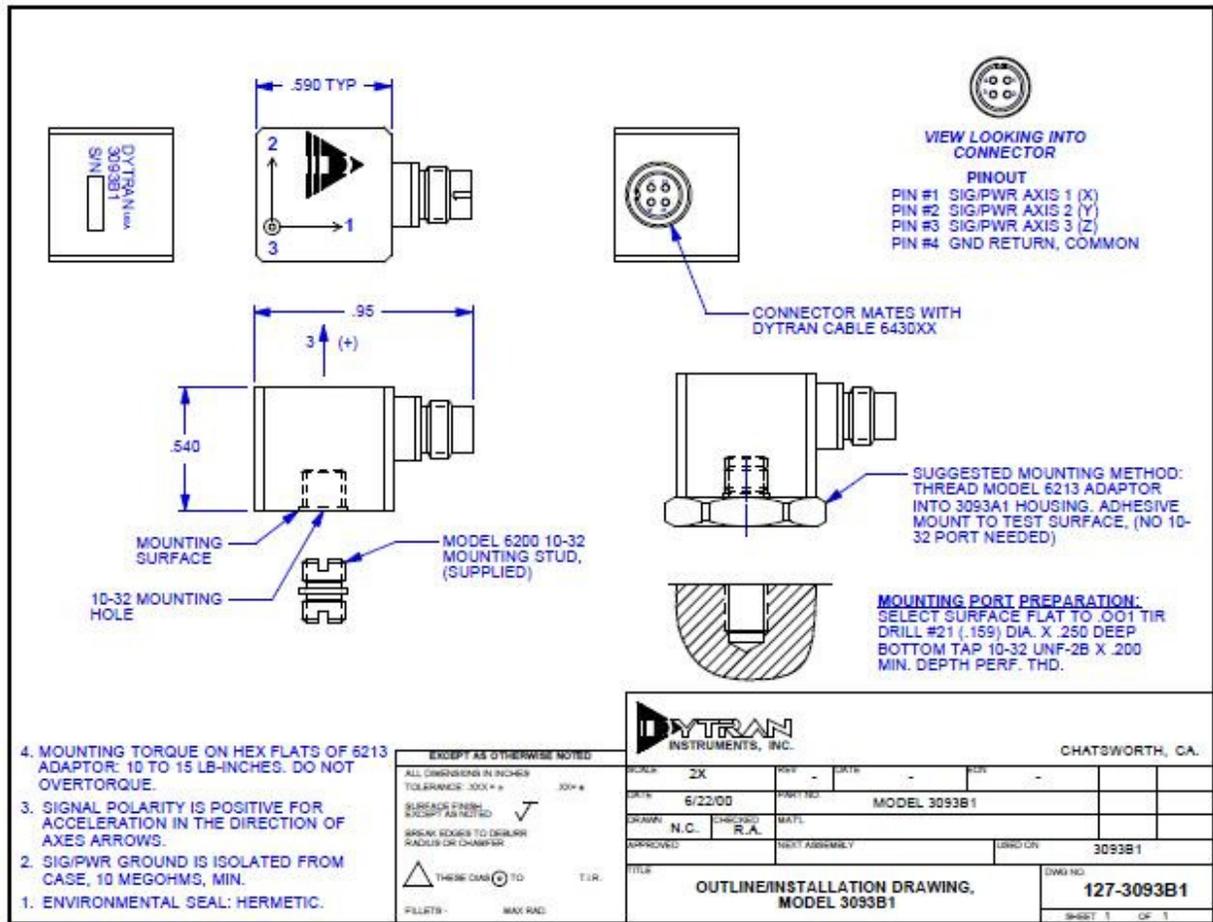


Figura A2.1 Especificaciones de diseño

