

DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN  
DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA  
CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS.

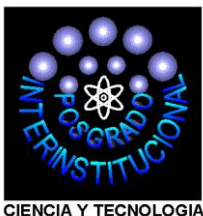
**TESIS**

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO  
DE

**MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA EN  
LA ESPECIALIDAD DE METROLOGÍA**

PRESENTA

Gerardo Campos Contreras



Santiago de Querétaro, Qro., México, 18 de Octubre del 2017



Director de Posgrado  
PICYT – CIDESI  
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial del alumno **Gerardo Campos Contreras**, una vez leída y revisada la Tesis titulada **“DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS”**, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de **Maestro en Ciencia y Tecnología** en la opción terminal de **Metrología** durante el Examen de Grado correspondiente.

Y para que así conste firmo la presente a los 16 días del mes de Octubre del año dos mil diecisiete.

Dr. Luis Del Llano Vizcaya  
Tutor Académico



CIENCIA Y TECNOLOGÍA

Director de Posgrado  
PICYT – CIDESI  
Querétaro

Los abajo firmantes, miembros del Jurado del Examen de Grado del alumno **Gerardo Campos Contreras**, una vez leída y revisada la Tesis titulada “**DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS**”, aceptamos que la referida tesis revisada y corregida sea presentada por el alumno para aspirar al grado de **Maestro en Ciencia y Tecnología** en la opción terminal de **Metrología** durante el Examen de Grado correspondiente.


Y para que así conste firmamos la presente a los 16 días del mes de Octubre del año dos mil diecisiete.



Dr. José Luis Sánchez Gaytán  
Presidente



M. C. Agustín Pérez Maldonado  
Secretario



Dr. Luis Del Llano Vizcaya  
Vocal



CENTRO DE INGENIERÍA Y DESARROLLO INDUSTRIAL

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN TECNOLÓGICA

**AUTORIZACIÓN**  
**PUBLICACIÓN EN FORMATO ELECTRÓNICO DE TESIS**

Fecha: 2017-10-18

El que suscribe

Alumno (a) .....Gerardo Campos Contreras.....

CURP .....CACG850327HMNMNR05..... CVU.....

ORCID ...0000-0002-0032-2144.....

Correo electrónico (opcional) gerardo27campos@gmail.com

Egresado (a) de Posgrado Interinstitucional en Ciencia y Tecnología -  
CIDESI.....

Autor de la Tesis titulada  
...DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO  
ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS.....

Por medio del presente documento autorizo<sup>1</sup> en forma gratuita y permanente a que la Tesis arriba citada sea divulgada y reproducida para publicarla mediante almacenamiento electrónico que permita el acceso al público a leerla y conocerla visualmente, así como a comunicarla públicamente en Página Web. La única contraprestación que condiciona la presente autorización es la del reconocimiento del nombre del autor en la publicación que se haga de la misma.

Atentamente

-----Gerardo Campos Contreras-----  
Nombre y firma del tesista

<sup>1</sup> Ley Federal de Derechos de Autor

Para obtener tu ORCID regístrate en: <https://orcid.org/register>

## **DEDICATORIAS**

Primeramente doy gracias a dios que me permitió cerrar este ciclo de mí vida y me prepara para nuevos retos, y dedico mi trabajo a mis padres que gracias a ellos he alcanzado mis metas, a Karla y Lía que me han dado motivación en la realización del trabajo aquí plasmado.

## **AGRADECIMIENTOS**

- A Luis de Llano por guiarme y mostrarme el camino a seguir en el tema de mi tesis.
- A Felipe González por darme la oportunidad de crecer profesionalmente y creer en mí.
- A Mario D. Díaz por permitirme usar el laboratorio y facilitar la experimentación.
- A mis compañeros de trabajo por el apoyo otorgado.
- Al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial que es mi segunda casa y me da la oportunidad de crecer.

## RESUMEN

La presente tesis se basa en demostrar que se puede utilizar un dispositivo fácil de manipular y que transmita eficientemente la vibración del excitador de vibraciones al patrón y a su vez al acelerómetro bajo calibración.

La metodología utilizada se basó en evaluar el dispositivo que propuso el CENAM y a partir de este, se modificaron sus dimensiones y sus configuraciones para después generar siete modelos de dispositivos que van a ser sometidos a simulación de barrido de frecuencias utilizando el software SolidWorks. Los resultados obtenidos de la simulación nos mostraron las frecuencias de resonancia, siendo las que nos interesan en dirección del eje vertical del excitador de vibraciones.

Una vez finalizada la simulación de los siete dispositivos, se seleccionaron los dispositivos que presentaron mejor comportamiento y que la frecuencia de resonancia esté por afuera del intervalo de medida utilizado por el laboratorio.

Finalmente se fabricó el dispositivo más viable y se realizó una validación utilizando el estadístico error normalizado. Los dispositivos a comparar son; el dispositivo que propone el CENAM y el dispositivo más viable del análisis realizado en la simulación.

## **ABSTRACT**

The present thesis is based on demonstrating that if a device that is easy to manipulate and that transmits the vibration of the vibration exciter to the standards and in turn to the accelerometer under calibration can be used.

The methodology used is based on evaluating the device proposed by CENAM and from there, modify its dimensions and configuration and then generate seven models of devices that are going to be subjected to simulation of frequency using the software SolidWorks. The results obtained from the simulation will show us the resonance frequencies, being the ones that interest us in the direction of the vertical axis of the vibration exciter.

Once the simulation of the seven devices is completed, the devices that perform the best behavior or the resonance frequency outside the measurement range used by the laboratory are selected.

Finally, the most viable device is fabricated and a validation is performed using the normalized error statistic. The devices to be compared are those proposed by CENAM and the most viable device of the simulation analysis.



ÍNDICE

<b>DEDICATORIAS .....</b>	<b>V</b>	<b>CAPÍTULO 4 RESULTADOS .....</b>	<b>37</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>VI</b>	<b>4.1 Resultados de simulación .....</b>	<b>37</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>VII</b>	<b>4.1.1 Modelado cero .....</b>	<b>37</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>VIII</b>	<b>4.1.2 Modelado uno .....</b>	<b>39</b>
<b>CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>	<b>4.1.3 Modelado dos .....</b>	<b>41</b>
<b>1.1 Antecedentes.....</b>	<b>1</b>	<b>4.1.4 Modelado tres .....</b>	<b>42</b>
<b>1.2 Definición del problema.....</b>	<b>1</b>	<b>4.1.5 Modelado cuatro.....</b>	<b>44</b>
<b>1.3 Justificación .....</b>	<b>2</b>	<b>4.1.6 Modelado cinco .....</b>	<b>46</b>
<b>1.4 Objetivos .....</b>	<b>3</b>	<b>4.1.7 Modelado seis.....</b>	<b>48</b>
<b>1.4.1 Objetivo General.....</b>	<b>3</b>	<b>4.1.8 Modelado siete .....</b>	<b>49</b>
<b>1.4.2 Objetivos Específicos .....</b>	<b>3</b>	<b>4.2 Concentrado de los resultados</b>	
<b>1.5 Hipótesis .....</b>	<b>3</b>	<b>de la simulación .....</b>	<b>50</b>
<b>CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO ....</b>	<b>4</b>	<b>4.3 Resultado de los dispositivos</b>	
<b>2.1 Parámetros de la vibración.....</b>	<b>4</b>	<b>fabricados.....</b>	<b>51</b>
<b>2.2 Movimiento armónico simple ..</b>	<b>5</b>	<b>4.3.1 Dispositivo 3 .....</b>	<b>52</b>
<b>2.3 Tipos de vibraciones.....</b>	<b>8</b>	<b>4.3.2 Dispositivo 6 .....</b>	<b>53</b>
<b>2.4 Transductores de vibraciones</b>	<b>9</b>	<b>4.4 Validación de los resultados de</b>	
<b>2.5 Aspectos importantes.....</b>	<b>9</b>	<b>las mediciones .....</b>	<b>54</b>
<b>2.5 Mesurando .....</b>	<b>17</b>	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>59</b>
<b>2.6 Estimación de incertidumbre</b>	<b>19</b>	<b>5.1 Conclusiones de la simulación</b>	
<b>2.7 Procedimiento de calibración</b>	<b>23</b>	<b>.....</b>	<b>59</b>
<b>CAPÍTULO 3 DESARROLLO</b>		<b>5.2 Conclusiones de la validación</b>	
<b>EXPERIMENTAL .....</b>	<b>27</b>	<b>del dispositivo.....</b>	<b>60</b>
<b>3.1 Metodología .....</b>	<b>27</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	
<b>3.2 Plan de simulación.....</b>	<b>35</b>	<b>.....</b>	<b>63</b>

<b>ANEXOS .....</b>	<b>65</b>	<b>Ilustración 14. Muestra como</b>	
<b>Glosario.....</b>	<b>65</b>	<b>conectar mediante un cable BNC-</b>	
		<b>BNC .....</b>	<b>30</b>
<b>ILUSTRACIONES</b>		<b>Ilustración 15. Muestra la Conexión</b>	
<b>Ilustración 1. Sensibilidad .....</b>	<b>10</b>	<b>del cable Microsoft de salida de</b>	
<b>Ilustración 2. Rango de frecuencia</b>		<b>tensión a cada acelerómetro....</b>	<b>30</b>
<b>.....</b>	<b>11</b>	<b>Ilustración 16. Muestra la conexión</b>	
<b>Ilustración 3. Aplicación de</b>		<b>de salida de tensión del conjunto</b>	
<b>acelerómetros en base a su</b>		<b>acelerómetro patrón .....</b>	<b>31</b>
<b>tamaño .....</b>	<b>11</b>	<b>Ilustración 17. Muestra cómo se</b>	
<b>Ilustración 4. Regla general de</b>		<b>conectan ambas salidas</b>	
<b>masa.....</b>	<b>12</b>	<b>eléctricas en paralelo al</b>	
<b>Ilustración 5. Condiciones</b>		<b>osciloscopio .....</b>	<b>32</b>
<b>ambientales .....</b>	<b>13</b>	<b>Ilustración 18 Modelado 0 .....</b>	<b>38</b>
<b>Ilustración 6. Tipos de montaje..</b>	<b>14</b>	<b>Ilustración 19 Frecuencia de</b>	
<b>Ilustración 7. Acelerómetros para</b>		<b>resonancia a 6 464,8 Hz.....</b>	<b>38</b>
<b>aplicaciones específicas .....</b>	<b>15</b>	<b>Ilustración 20 Modelado uno.....</b>	<b>40</b>
<b>Ilustración 8. Tipos de</b>		<b>Ilustración 21 Frecuencia de</b>	
<b>acelerómetros y sus partes.....</b>	<b>17</b>	<b>resonancia a 5 353,75 Hz.....</b>	<b>40</b>
<b>Ilustración 9. Esquema de</b>		<b>Ilustración 22 Modelado dos .....</b>	<b>41</b>
<b>calibración para transductores</b>	<b>24</b>	<b>Ilustración 23 Frecuencia de</b>	
<b>Ilustración 10. Esquema de</b>		<b>resonancia a 4 840,92 Hz.....</b>	<b>42</b>
<b>rotación del IBC para evaluar</b>		<b>Ilustración 24 Modelado tres.....</b>	<b>43</b>
<b>repetibilidad.....</b>	<b>26</b>	<b>Ilustración 25 Frecuencia de</b>	
<b>Ilustración 11. Dispositivo para la</b>		<b>resonancia a 6 247,15 Hz.....</b>	<b>44</b>
<b>calibración de acelerómetros ..</b>	<b>27</b>	<b>Ilustración 26 Modelado cuatro ..</b>	<b>45</b>
<b>Ilustración 12. Conjunto de</b>		<b>Ilustración 27 Frecuencia de</b>	
<b>monolitos.....</b>	<b>28</b>	<b>resonancia a 6 052,86 Hz.....</b>	<b>46</b>
<b>Ilustración 13. Arreglo para la</b>		<b>Ilustración 28 Modelado cinco ....</b>	<b>47</b>
<b>calibración de acelerómetros ..</b>	<b>29</b>	<b>Ilustración 29 Frecuencia de</b>	
		<b>resonancia a 4 658,15 Hz.....</b>	<b>47</b>

DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

<b>Ilustración 30 Modelado 6.....</b>	<b>48</b>	<b>Tabla 05 Construcción del</b>	
<b>Ilustración 31 Frecuencia de</b>		<b>modelado dos.....</b>	<b>41</b>
<b>resonancia a 15 970 Hz.....</b>	<b>49</b>	<b>Tabla 06 Construcción del</b>	
<b>Ilustración 32 Modelado 7.....</b>	<b>50</b>	<b>modelado tres .....</b>	<b>43</b>
<b>Ilustración 33 Frecuencia de</b>		<b>Tabla 07 Construcción del</b>	
<b>resonancia a 9 157,6 Hz y 9 920,9</b>		<b>modelado cuatro .....</b>	<b>44</b>
<b>Hz.....</b>	<b>50</b>	<b>Tabla 08 Construcción del</b>	
<b>Ilustración 34 Dispositivo tres, con</b>		<b>modelado cinco.....</b>	<b>46</b>
<b>capacidad para calibrar dos</b>		<b>Tabla 09 Construcción del</b>	
<b>acelerómetros .....</b>	<b>52</b>	<b>modelado seis .....</b>	<b>48</b>
<b>Ilustración 35 Dispositivo seis, con</b>		<b>Tabla 10 Construcción del</b>	
<b>capacidad para calibrar un</b>		<b>modelado siete.....</b>	<b>49</b>
<b>acelerómetros. ....</b>	<b>54</b>	<b>Tabla 11 Concentrado de</b>	
<b>Ilustración 36 Grafica de</b>		<b>resultados de la simulación .....</b>	<b>51</b>
<b>comportamiento entre el</b>		<b>Tabla 12 Resultados de la</b>	
<b>dispositivo cero y el tres .....</b>	<b>62</b>	<b>calibración del dispositivo tres</b>	<b>53</b>
		<b>Tabla 13 Resultados de la</b>	
		<b>calibración del dispositivo seis</b>	<b>54</b>
<b>TABLAS</b>		<b>Tabla 14 Validación de los</b>	
<b>Tabla 01. Tipos de transductores y</b>		<b>resultados del acelerómetro no.</b>	
<b>su señal.....</b>	<b>15</b>	<b>Serie 31333 .....</b>	<b>55</b>
<b>Tabla 02 Elementos a variar .....</b>	<b>35</b>	<b>Tabla 15 Validación de los</b>	
<b>Tabla 03 Construcción del modelo</b>		<b>resultados del acelerómetro no.</b>	
<b>cero .....</b>	<b>37</b>	<b>Serie 31379 .....</b>	<b>57</b>
<b>Tabla 04 Construcción del</b>		<b>Tabla 16 Mejores resultados de la</b>	
<b>modelado uno.....</b>	<b>39</b>	<b>simulación .....</b>	<b>60</b>

## **CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Antecedentes**

Las vibraciones mecánicas constituyen uno de los campos de la física más importantes. Prácticamente cualquier sistema tiene la capacidad de vibrar y la mayoría de ellos lo puede hacer libremente en distintas formas. Generalmente se dice que las vibraciones de los objetos pequeños son rápidas, mientras que las vibraciones de los objetos grandes son lentas (Muñiz, 2015).

El fenómeno físico de la vibración hace referencia a la relación entre la energía potencial y la energía cinética. Un sistema vibratorio debe tener un componente que almacene energía potencial y la libere como energía cinética en forma de movimiento de una masa; posteriormente el movimiento aplica energía cinética al componente que almacena energía potencial. La vibración puede ocurrir en muchas direcciones y puede ser el resultado de la interacción de muchos objetos (Newland, 1993).

Se conoce como vibración al movimiento oscilatorio alrededor de una posición de referencia, también como un movimiento repetitivo de objetos relativos a un marco estacionario de referencia o posición nominal que usualmente está en equilibrio (Muñiz, 2015).

### **1.2 Definición del problema**

En la calibración de acelerómetros por comparación directa contra otra acelerómetro patrón es utilizado un dispositivo para colocar el patrón y acoplar el

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS

instrumento bajo calibración componiendo un sistema rígido que permita una transmisión fiel de las vibraciones generadas por el excitador de vibraciones.

El dispositivo utilizado no es vendido por el fabricante, si no que ha sido el resultado de una transferencia por parte del Centro Nacional de Metrología y validado por ellos y no hay nada documentado sobre su comportamiento ni el porqué de su configuración.

Este dispositivo es muy reducido en espacio y dificulta la manipulación tanto del patrón como del acelerómetro bajo calibración; sumado a esto, solo permite la calibración de un acelerómetro a la vez.

### **1.3 Justificación**

Al lograr obtener un dispositivo alternativo al propuesto por la norma ISO 16063-21:2003 se pretende conseguir un dispositivo de transferencia de vibraciones versátil y de acceso amigable para el acelerómetro patrón ya que por lo reducido del espacio del diseño original al montarlo y desmontarlo puede llegar a dañar el acelerómetro patrón.

Al obtener un dispositivo de transferencia de vibración probado y versátil, se puede plantear la calibración simultánea de dos acelerómetros, reduciendo los tiempos de calibración por mitad de que toma actualmente.

Se obtendrá un estudio documentado del comportamiento del dispositivo que se encuentra actualmente en funcionamiento.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo General**

Proponer alternativas basadas en datos como la rigidez, la resonancia del dispositivo, como transmite la vibración del generador de frecuencias al patrón y al acelerómetro bajo calibración. Además de reducir el tiempo en la instalación del sistema de medición.

### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Encontrar en base a simulación el dispositivo que transmita de forma eficaz y eficiente la vibración del generador de frecuencias.
- Experimentar la calibración simultanea de dos acelerómetros.

## **1.5 Hipótesis**

Habrá una diferencia significativa al modificar el arreglo propuesto por la norma ISO 16063-21:2003 y el dispositivo que propuesto por el CENAM.

Se encontrará una diferencia significativa al colocar más de un acelerómetro bajo calibración en el dispositivo propuesto.

## CAPITULO 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Parámetros de la vibración

Las características que definen una vibración son la amplitud (**A**), la frecuencia (**f**), la frecuencia natural (**fn**) y la resonancia (Muñiz, 2015).

La amplitud (**A**), es el indicador de la severidad de la vibración, cuando mayor sea la amplitud mayor será la vibración del material ya que es la elongación máxima alcanzada por este (Muñiz, 2015).

La frecuencia (**f**), es el número de ciclos que pueden ser completados en un segundo. Su unidad de medida es el Hertz (Hz = 1/s), y su ecuación es:

$$f = \frac{1}{T}$$

Dónde: **T** es el periodo

La frecuencia natural (**fn**) de un sistema es aquella que tiene una tendencia o facilidad para vibrar; todo sistema posee una o varias frecuencias naturales de forma que al ser excitadas se producirá un aumento importante de vibración (Newland, 1993).

La Resonancia es un estado de funcionamiento en el que una frecuencia de excitación se encuentra cerca de una frecuencia natural de la estructura, cuando ocurre la resonancia los niveles de vibración que resultan pueden ser muy altos y pueden causar daños rápidamente (Muñiz, 2015).

El Periodo (**T**) es el tiempo que se tarda una onda para completar un ciclo, es decir, es el tiempo que transcurre entre dos puntos homólogos de la onda siendo su unidad de medida el segundo (Muñiz, 2015).

## 2.2 Movimiento armónico simple

Es un movimiento periódico y vibratorio en ausencia de fricción, producido por la acción de una fuerza recuperadora que es directamente proporcional a la posición, y que queda descrito en función del tiempo por una función senoidal que puede ser seno o coseno (Newland, 1993).

En este tipo de movimiento el cuerpo oscila de un lado al otro de su posición de equilibrio, en una dirección determinada, y en intervalos iguales de tiempo.

De la segunda ley de Newton

$$F = ma \tag{1}$$

Donde:

***F*** es igual a la Fuerza

***m*** es igual a la masa

***a*** es igual a la segunda derivada de (*x*) que es la distancia.

$$F = m \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} \tag{2}$$

El movimiento armónico simple es descrito por la ecuación 3 en donde la fuerza recuperadora proviene del propio desplazamiento.

$$F = -kx \tag{3}$$



Dónde  $k$  es una constante positiva,  $x$  es la elongación y el signo negativo (-) indica que en todo momento la fuerza que actúa sobre la partícula está dirigida hacia la posición de equilibrio; esto es, en dirección contraria a su elongación lo que significa que la atrae hacia la posición de equilibrio. Juntas la ecuación uno y tres dan la ecuación diferencial que describe el movimiento armónico simple.

$$m \frac{\partial^2 x}{\partial x^2} = -kx \quad (4)$$

Despejando a la segunda derivada de  $x$ .

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\frac{k}{m} x \quad (5)$$

La ecuación cinco es una ecuación diferencial que describe a cualquier sistema físico que al ser perturbado tiende a recuperar su posición de equilibrio con una fuerza proporcional a la perturbación sufrida.

La ecuación diferencial cinco se resuelve por la técnica tradicional de la conjetura donde describe que la solución puede ser una función seno con una amplitud ( $A$ ) y una frecuencia angular ( $\omega$ ). Debido al movimiento circular uniforme provocado por el fenómeno del movimiento armónico simple se obtuvo que la ecuación que describe a  $x$  sea:

$$x = A \sin \omega t \quad (6)$$

Aplicando la primera derivada:

DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

$$\frac{\partial x}{\partial t} = A \omega \cos \omega t \quad (7)$$

Aplicando la segunda derivada:

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -A \omega^2 \sin \omega t \quad (8)$$

Sustituyendo ( **$A \sin \omega t$** ) por ( **$x$** ):

$$\frac{\partial^2 x}{\partial t^2} = -\omega^2 x \quad (9)$$

Igualando la ecuación cinco con la ecuación nueve:

$$-\omega^2 x = -\frac{k}{m} x \quad (10)$$

Eliminación de terminos semejantes:

$$\omega^2 = \frac{k}{m} \quad (11)$$

Para el caso de la frecuencia en el muelle la frecuencia angular ( $\omega$ ) sera igual a:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (12)$$

Cuando más rígido sea el muelle, mayor será la frecuencia. Cuando mayor sea la masa menor será la frecuencia.

## 2.3 Tipos de vibraciones

### Vibración libre

Es la que ocurre cuando el sistema oscila bajo la acción de fuerzas inherentes al sistema mismo, es decir, cuando las fuerzas externas aplicadas son nulas. El sistema bajo vibración libre vibrará a una o más frecuencias naturales, las cuales son propiedades del sistema dinámico, establecidas por la distribución de masa y rigidez (Muñiz, 2015).

### Vibración forzada

Este tipo de vibración ocurre cuando existe una excitación de fuerzas externas al sistema, ósea, cuando la fuerza de excitación es oscilatoria, el sistema es obligado a vibrar a la frecuencia de excitación, si ésta coincide con una de las frecuencias naturales del sistema, se produce el fenómeno de resonancia y aquí ocurren las amplitudes máximas, que pueden conducir a la falla (Muñiz, 2015).

### Sistemas Amortiguados

Existen resistencias pasivas al movimiento del sistema, es decir, fuerzas o momentos que disipan y que amortiguan la acción de vibrar. Como la de una masa suspendida por un resorte que se opone al movimiento de caída libre de la masa. En los sistemas amortiguados la amplitud de la vibración va disminuyendo conforme a paso del tiempo (Muñiz, 2015).

### Sistemas no amortiguados

No existe resistencia pasiva al movimiento del sistema, por lo que la amplitud de las vibraciones no decae conforme al paso del tiempo (Muñiz, 2015).

## **2.4 Transductores de vibraciones**

Un transductor de vibración es un dispositivo que convierte el movimiento mecánico en una dirección dada en una cantidad que puede ser medida o grabada (Brüel & Kjær, 1998).

Las características del transductor de vibración que deben ser conocidas por el usuario son (Muñiz, 2015):

- Sensibilidad: Es la relación entre la amplitud del movimiento de entrada con respecto a la señal de salida.
- Intervalo de operación: En amplitud y frecuencia.
- Masa del acelerómetro.
- Principio de funcionamiento: La forma en que se genera la señal de salida.

Estas características pueden ser obtenidas a través de dos formas, una es por el fabricante y la otra es por los laboratorios de calibración.

## **2.5 Aspectos importantes**

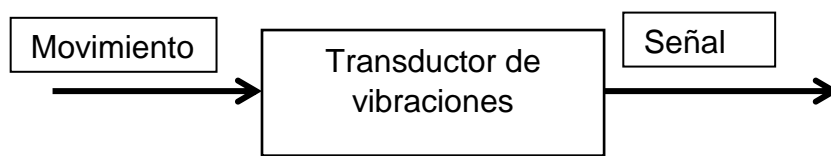
Seleccionar el transductor correcto para cada medición o aplicación particular es un punto importante en el proceso para obtener mediciones confiables sobre la vibración que se desea conocer.

Para la selección de un transductor se deben tomar en cuenta los puntos desarrollados a continuación.

## Sensibilidad

La sensibilidad de un transductor de vibración es la primera característica considerada. En un transductor se desea una sensibilidad alta para que la medición de la señal de salida sea más sencilla (Muñiz, 2015).

Dependiendo de la naturaleza de la señal de salida, se puede decir que la sensibilidad es en carga o tensión y de ello depende el acondicionamiento de la señal.



$$Sensibilidad = \frac{Amplitud\ de\ la\ señal}{Amplitud\ del\ movimiento}$$

**Ilustración 1. Sensibilidad.**

## Intervalo de operación

El intervalo de operación del transductor delimita su uso en frecuencia y amplitud siendo el intervalo de operación el que debe considerarse para determinar si se está usando correctamente el transductor.

La ilustración 2 muestra el cambio de la sensibilidad en función de la frecuencia. La sensibilidad de un transductor de vibraciones se incrementa en frecuencias próximas a su resonancia y no se recomienda su uso en esas frecuencias debido a que su comportamiento es impredecible (Muñiz, 2015).

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

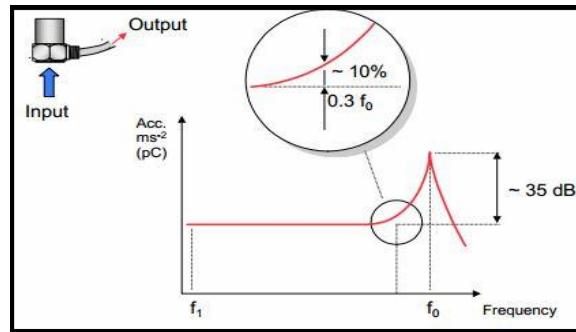


Ilustración 2. Rango de frecuencia.

Un transductor de mayor peso trabaja a frecuencias menores que un transductor de menor peso (Brüel & Kjær, 1998) ver ilustración 3.

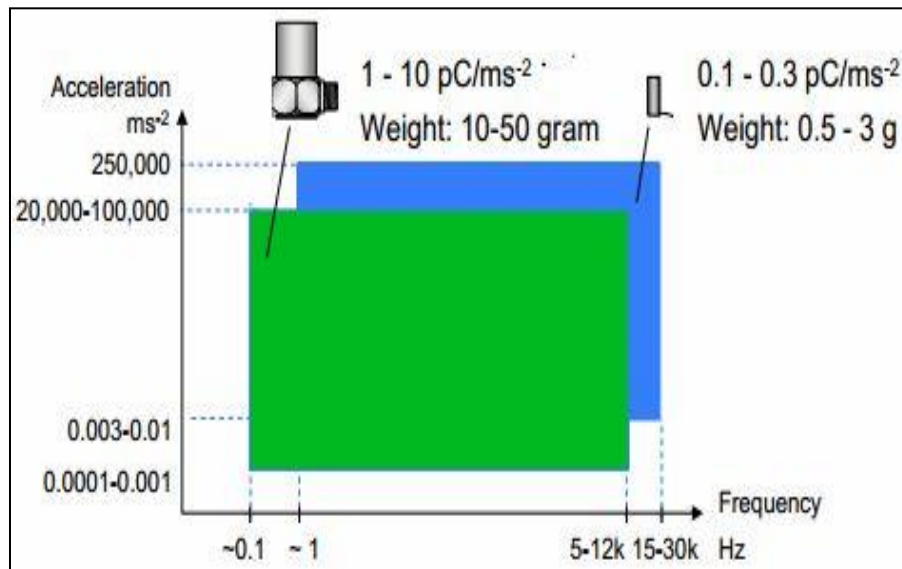


Ilustración 3. Aplicación de acelerómetros en base a su tamaño.

### Masa

La masa agregada a una estructura por el montaje de un transductor puede afectar las propiedades dinámicas de ésta, sobre todo cuando se efectúan mediciones en partes ligeras, es decir, agregar una masa significativa resulta en la alteración de las amplitudes y frecuencias de vibración.

Una regla general es que la masa del acelerómetro como se muestra en la ilustración 4 debe ser menor que un décimo de la masa del objeto a ser medido (A/S).

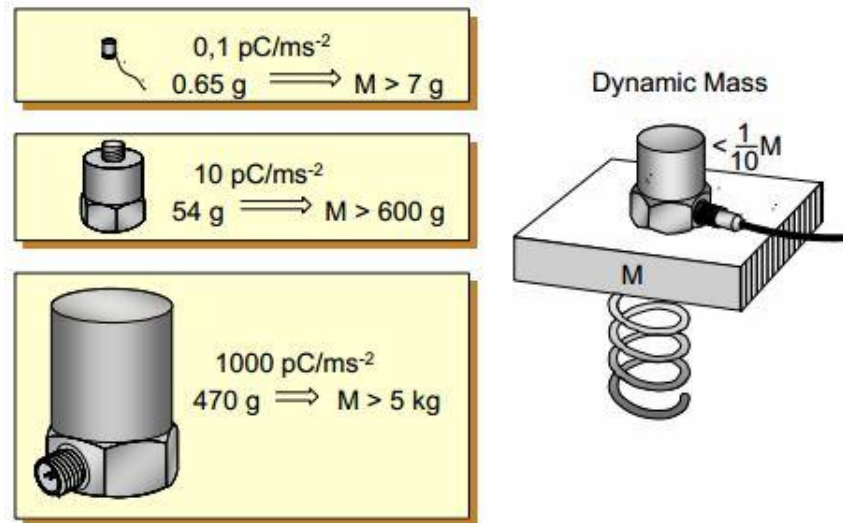


Ilustración 4. Regla general de masa.

### Condiciones ambientales de operación

Algunas condiciones de operación que pueden afectar la sensibilidad de los transductores de vibración son los siguientes y se muestran en la ilustración 5.

- Los esfuerzos en la base pueden deformar la carcasa del transductor y modificar el comportamiento del elemento sensible del transductor.
- Generalmente los transductores están protegidos contra la humedad y la temperatura sin embargo pueden deteriorarse a causa de condiciones extremas.
- En la mayoría de los casos, la influencia del ruido puede ser despreciada.
- Los medios corrosivos exigen protección de los transductores.
- El magnetismo afecta la mayoría de transductores de vibración, sin embargo existen transductores que sufren una influencia despreciable del mismo.

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

- Los transductores de vibración pueden trabajar bajo radiación nuclear siempre y cuando no sean dosis extremas.

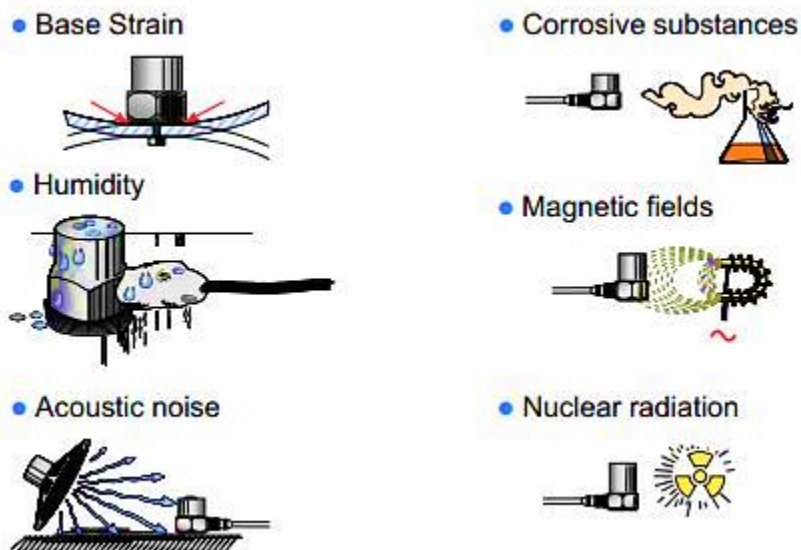


Ilustración 5. Condiciones ambientales.

### Montaje

El método de montaje del acelerómetro es uno de los factores más importantes para obtener lecturas confiables en la práctica de la medición de las vibraciones, como se muestra en la ilustración 6, donde en función de la frecuencia a medir se puede utilizar el tipo de sujeción.

Un montaje inadecuado puede estropear las mediciones de vibración reduciendo severamente el rango de frecuencia útil. El principal requisito es tener un cercano contacto mecánico entre la base y la superficie acelerómetro a la que se va a unir.



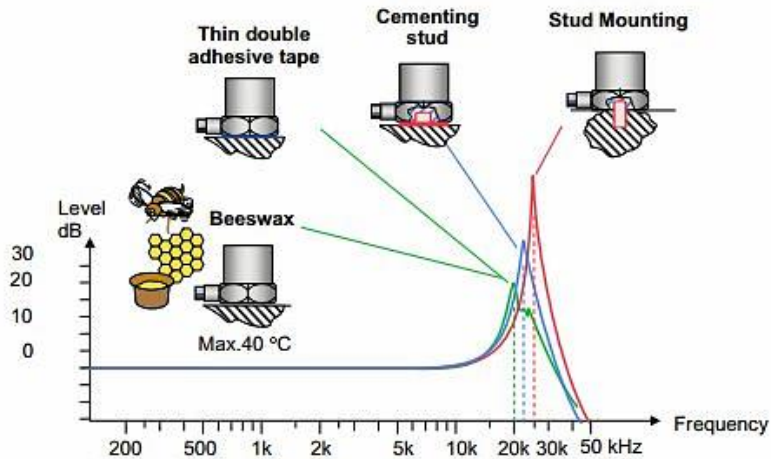


Ilustración 6. Tipos de montaje.

### Formas de montaje

- El montaje con cera es aplicado cuando no existe posibilidad de realizar una perforación en la superficie vibrante para fijarlo con un tornillo; se debe tener mucho cuidado en pegar bien el transductor de manera que no se desprende y verificar que no se incremente la temperatura más de 40 °C.
- El montaje con opresor se efectúa sobre la estructura de la máquina donde se hace un barreno y se utiliza un opresor para mantener juntas las superficies de la máquina y la base del transductor, es importante que el opresor tenga una longitud adecuada para que exista buen contacto entre la base del transductor y la superficie vibratoria.
- El montaje con pegamento es confiable y rápido, sin embargo hay que tener la herramienta adecuada para despegar el transductor.
- El montaje con cinta es rápido pero no tan confiable como el de pegamento.

### Características de la aplicación

Si se requiere utilizar el transductor de vibraciones para una aplicación especial se deben de considerar que este cumpla con el requisito específico indispensable de

DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

dicha aplicación. Ver en la Ilustración 7 algunos transductores para ciertas aplicaciones especiales.

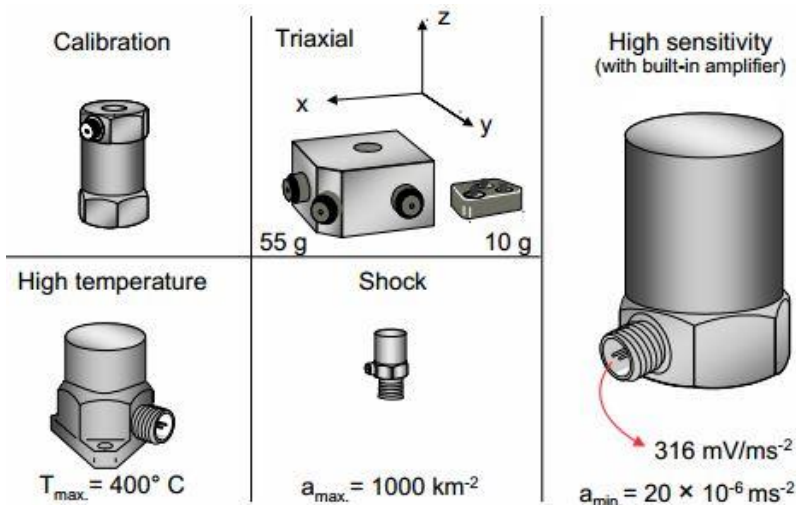


Ilustración 7. Acelerómetros para aplicaciones específicas.

**Tipos de transductores**

De manera general los transductores de vibración se clasifican de acuerdo a la magnitud que se mida y pueden ser alguno de los siguientes tipos, los cuales se muestran en la Tabla 1.

Tipo de transductor	Señal de salida		Uso
	Carga	Tensión	
De desplazamiento	pC/m	mV/m	Posición de una partícula que sigue un movimiento armónico simple. Y es determinado por la distancia $x$ a la posición de equilibrio.
De velocidad	pC/m/s	mV/v/s	Determina la variación de posición que tiene el cuerpo en cada instante de tiempo $t$ .
De aceleración	pC/m/s <sup>1</sup>	mV/m/s <sup>2</sup>	Determina la variación de velocidad que tiene el cuerpo en cada instante de tiempo $t$ .

Tabla 1. Tipos de transductores y su señal (Muñiz, 2015).

### **Transductor de desplazamiento**

El transductor de desplazamiento, conocido también como transductor "de corriente Eddy" o proxímetro, se utiliza normalmente para bajas frecuencias (por debajo de 1.000 Hz) en cojinetes de fricción de turbo-máquinas.

Los proxímetros se emplean para medir el desplazamiento radial o axial de ejes. Se instalan en las cubiertas de rodamientos o a su lado y detectan el desplazamiento del eje en relación a su posición de anclaje. Un sistema de captación de proximidad de tipo Eddy se compone del propio sensor y un acondicionador de señal. Su respuesta en frecuencia es excelente. No tienen un límite inferior de frecuencia de trabajo y se emplean en la medición tanto de vibración como de la posición axial de ejes (Muñiz, 2015).

### **Transductor de velocidad**

El transductor sísmico de velocidad se aplica a máquinas donde el eje transmite la vibración a la carcasa con poca amortiguación, es decir, las amplitudes de vibración en la carcasa son grandes (Muñiz, 2015). Se compone de un imán permanente ubicado en el centro de una bobina de hilo de cobre. Cuando la carcasa vibra, se crea un movimiento relativo entre el imán y el bobinado, induciéndose por la ley de Faraday (Sadiku, 2005) una tensión proporcional a la velocidad del movimiento.

### **Transductor de aceleración**

Este tipo de transductor genera una tensión eléctrica proporcional a la aceleración por presión sobre un cristal piezoeléctrico. Un acelerómetro piezoeléctrico puede captar con precisión señales entre 1 Hz y 15.000 Hz. Estos dispositivos son muy apropiados para tomar datos de vibración a alta frecuencia, donde aparecen grandes esfuerzos con desplazamientos relativamente pequeños. Algunos transductores especiales pueden medir frecuencias mucho más bajas y

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

también mucho más altas. La colecta de datos de vibración a altas frecuencias depende del medio de fijación del transductor a la máquina (A/S).

La construcción de los acelerómetros se muestra en la imagen 8.

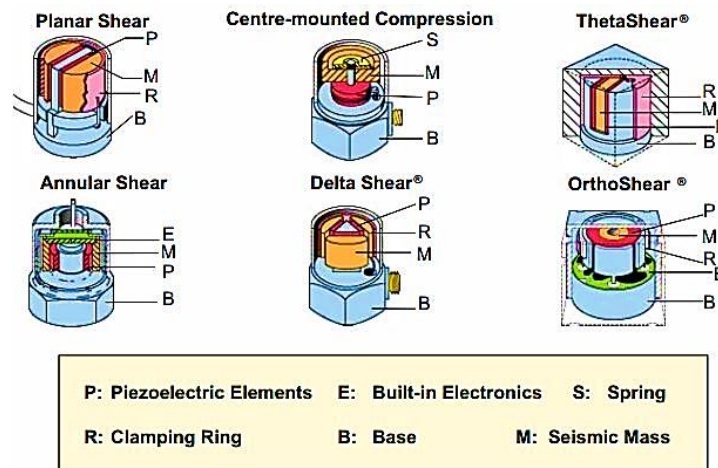


Ilustración 8. Tipos de acelerómetros y sus partes.

Los transductores también se clasifican en función de su aplicación como:

- Alta exactitud
- Uniáxica
- Triarí
- Alta sensibilidad
- Alta temperatura
- Impacto

### 2.5 Mesurando

El mesurando para la calibración de los transductores (Muñiz, 2015) se define como:

### Transductores de Aceleración:

$$S_2 = \frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}} S_1 \quad (13)$$

Dónde:

$S_2$  Sensibilidad del IBC a determinar, para cada una de las amplitudes programadas y cada frecuencia en  $\mu C/(m/s^2)$  o  $mV/(m/s^2)$

$\mu_1$  es la señal del patrón en mV

$\mu_2$  es la señal del patrón en mV

$S_{amp1}$  Sensibilidad del amplificador del patrón en  $mV/mV$  o  $mV/\mu C$

$S_{amp2}$  Sensibilidad del amplificador del IBC en  $mV/mV$  o  $mV/\mu C$

$S_1$  Sensibilidad del acelerómetro patrón en cada una de las frecuencias cuyas unidades son  $\mu C/(m/s^2)$  o  $mV/(m/s^2)$

### Transductores de Desplazamiento.

$$S_2 = \frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}} \omega^2 S_1 \quad (14)$$

Dónde:

$S_2$  Sensibilidad del IBC a determinar, para cada una de las amplitudes programadas y cada frecuencia  $\mu C/m$  o  $mV/m$

$\mu_1$  es la señal del patrón en mV

$\mu_2$  es la señal del patrón en mV

$S_{amp1}$  Sensibilidad del amplificador del patrón  $mV/mV$  o  $mV/\mu C$

$S_{amp2}$  Sensibilidad del amplificador del IBC  $mV/mV$  o  $mV/\mu C$

$S_1$  Sensibilidad del acelerómetro patrón en cada una de las frecuencias cuyas unidades son  $\mu\text{C}/(\text{m/s}^2)$  o  $\text{mV}/(\text{m/s}^2)$

$\omega = f2\pi$  es la velocidad angular para cada una de las frecuencias en  $1/\text{s}$

### Transductores de Velocidad

$$S_2 = \frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}} \omega S_1 \quad (15)$$

Dónde:

$S_2$  Sensibilidad del IBC a determinar, para cada una de las amplitudes programadas y cada frecuencia  $\mu\text{C}/(\text{m/s}^2)$  o  $\text{mV}/(\text{m/s}^2)$

$\mu_1$  es la señal del patrón en  $\text{mV}$

$\mu_2$  es la señal del patrón en  $\text{mV}$

$S_{amp1}$  Sensibilidad del amplificador del patrón  $\text{mV}/\text{mV}$  o  $\text{mV}/\mu\text{C}$

$S_{amp2}$  Sensibilidad del amplificador del IBC  $\text{mV}/\text{mV}$  o  $\text{mV}/\mu\text{C}$

$S_1$  Sensibilidad del acelerómetro patrón en cada una de las frecuencias cuyas unidades son  $\mu\text{C}/(\text{m/s}^2)$  o  $\text{mV}/(\text{m/s}^2)$

$\omega = f2\pi$  Es la velocidad angular para cada una de las frecuencias  $1/\text{s}$

### 2.6 Estimación de incertidumbre

El cálculo de la incertidumbre de medida se realiza según el tipo de transductor a usar, como se muestra a continuación (NMX-CH-140-IMNC-2002 , 2002):

Transductores de aceleración

La función para estimar la incertidumbre en conformidad a la ecuación (13),

$$f(\mu_1, \mu_2, S_{amp1}, S_{amp2}, S_1) = \frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}} S_1 \quad (16)$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbre a la ecuación (4)

$$u_{c_{S_2}} = \sqrt{c_{\mu_1}^2 u(\mu_1)^2 + c_{\mu_2}^2 u(\mu_2)^2 + c_{S_{amp1}}^2 u(S_{amp1})^2 + c_{S_{amp2}}^2 u(S_{amp2})^2 + c_{S_1}^2 u(S_1)^2} \quad (17)$$

Dónde:

$u(\mu_1)^2; u(\mu_2)^2; u(S_{amp1})^2; u(S_{amp2})^2; u(S_1)^2$  Son los valores de incertidumbre para cada una de las fuentes

Las siguientes expresiones corresponden a los coeficientes de sensibilidad de cada una de las fuentes de incertidumbre:

$$c_{(\mu_1)} = -\frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1^2 S_{amp2}} S_1$$

$$c_{(\mu_2)} = \frac{S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}} S_1$$

$$c_{(S_{amp1})} = \frac{\mu_2}{\mu_1 S_{amp2}} S_1$$

$$c_{(S_{amp2})} = -\frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}^2} S_1$$

$$c_{(S_1)} = \frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}}$$

Transductor de desplazamiento

La función para estimar la incertidumbre en conformidad a la ecuación (14),

$$f(\mu_1, \mu_2, S_{amp1}, S_{amp2}, S_1) = \frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}} w^2 S_1 \quad (18)$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbre a la ecuación (6)

$$u_{c_{S_2}} = \sqrt{c_{\mu_1}^2 u(\mu_1)^2 + c_{\mu_2}^2 u(\mu_2)^2 + c_{S_{amp1}}^2 u(S_{amp1})^2 + c_{S_{amp2}}^2 u(S_{amp2})^2 + c_w^2 u(w)^2 + c_{S_1}^2 u(S_1)^2} \quad (19)$$

Dónde:

$u(\mu_1)^2; u(\mu_2)^2; u(S_{amp1})^2; u(S_{amp2})^2; u(w)^2; u(S_1)^2$  Son los valores de incertidumbre para cada una de las fuentes.

Las siguientes expresiones corresponden a los coeficientes de sensibilidad de cada una de las fuentes de incertidumbre:

$$c_{(\mu_1)} = -\frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1^2 S_{amp2}} w^2 S_1$$

$$c_{(\mu_2)} = \frac{S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}} w^2 S_1$$

$$c_{(S_{amp1})} = \frac{\mu_2}{\mu_1 S_{amp2}} w^2 S_1$$

$$c_{(S_{amp2})} = -\frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}^2} w^2 S_1$$

$$c_{(w)} = -2 \frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}^2} w S_1$$



DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

$$c_{(S_1)} = \frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}} w^2$$

Transductores de Velocidad

La función para estimar la incertidumbre en conformidad a la ecuación (15):

$$f(\mu_1, \mu_2, S_{amp1}, S_{amp2}, S_1) = \frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}} w S_1 \quad (20)$$

Aplicando la ley de propagación de incertidumbre a la ecuación (8)

$$u_{c_{S_2}} = \sqrt{c_{\mu_1}^2 u(\mu_1)^2 + c_{\mu_2}^2 u(\mu_2)^2 + c_{S_{amp1}}^2 u(S_{amp1})^2 + c_{S_{amp2}}^2 u(S_{amp2})^2 + c_w^2 u(w)^2 + c_{S_1}^2 u(S_1)^2} \quad (21)$$

Dónde:

$u(\mu_1)^2; u(\mu_2)^2; u(S_{amp1})^2; u(S_{amp2})^2; u(w)^2; u(S_1)^2$  Son los valores de incertidumbre para cada una de las fuentes.

Las siguientes expresiones corresponden a los coeficientes de sensibilidad de cada una de las fuentes de incertidumbre:

$$c_{(\mu_1)} = -\frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1^2 S_{amp2}} w S_1$$

$$c_{(\mu_2)} = \frac{S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}} w S_1$$

$$c_{(S_{amp1})} = \frac{\mu_2}{\mu_1 S_{amp2}} w S_1$$

$$c_{(S_{amp2})} = -\frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}^2} w S_1$$

$$c_{(w)} = \frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}^2} S_1$$

$$c_{(S_1)} = \frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}} w$$

## 2.7 Procedimiento de calibración

### Condiciones del IBC

- Identificar la magnitud a medir, aceleración, desplazamiento y velocidad.
- Identificar el eje de principal o de trabajo del transductor (x) para los uni-axiales y (x, y, z) para los tri-axiales.
- Colocar el acelerómetro patrón en sus accesorios de montaje, tener cuidado de no sobrepasar el torque máximo.
- Colocar el IBC cara a cara con el acelerómetro patrón que está montado en sus accesorios, procurando que la unión entre ambos sea firme y estén alineadas para garantizar que ambos sientan el mismo estímulo en sus ejes principales” (Martinez Martinez, Corro Fuentes, & Diaz Orgaz, 2016).

### Condiciones del sistema de calibración

- “Verificar que se cumplan las condiciones ambientales en caso contrario registrar las mismas durante todo el proceso de calibración para realizar las correcciones correspondientes.
- Verificar que los equipos estén aterrizados para evitar ruido electromagnético que pueda influir en la estabilidad de la señal de patrón e IBC.
- Energizar por equipos.

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

- Montar el acelerómetro patrón dentro del dispositivo, mientras en la parte superior se sujeta firmemente el acelerómetro bajo calibración, posteriormente se acopla el conjunto con el excitador.
- Conectar el acelerómetro patrón y el IBC al amplificador y verificar mediante una prueba de excitación el buen estado de las conexiones y la correspondencia de la misma.
- Programar el amplificador de potencia de forma tal que las señales de salida del patrón y del IBC corresponda al mismo múltiplo o submúltiplo de magnitud a medir para minimizar errores en el análisis de los datos” (Martinez Martinez, Corro Fuentes, & Diaz Orgaz, 2016).

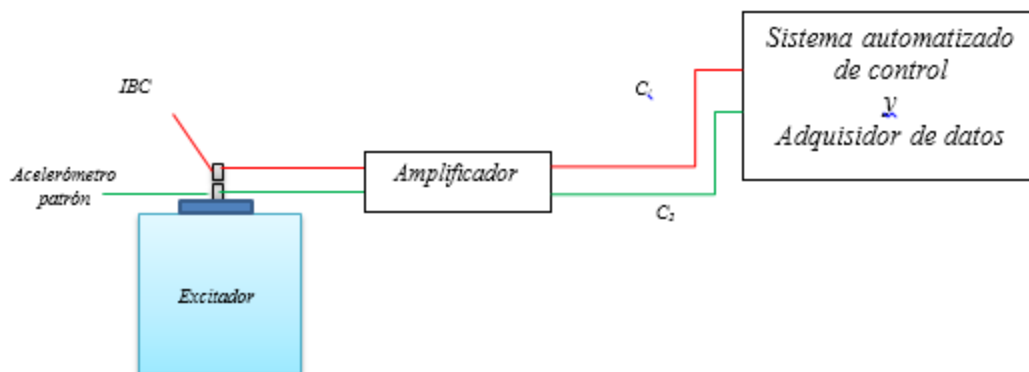


Ilustración 9. Esquema de calibración para transductores.

### Proceso de medición

Seleccionar la frecuencia, la amplitud de referencia y la amplificación de la señal a la cual se realizará la calibración (Martinez Martinez, Corro Fuentes, & Diaz Orgaz, 2016).

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS

- Amplitud: La selección de la amplitud depende del intervalo de uso y de la aplicación del transductor, la norma ISO 16063-27:2003, en su punto 5.1 recomienda se realicen mediciones en múltiplos de 10 m/s<sup>2</sup>.
- Frecuencia: Realizar un barrido de frecuencias en tercios de octavas (ISO 16063-27:2003)
- Amplificación: Programar el factor de amplificación de las señales del patrón y del IBC, de tal forma que sea el mismo múltiplo o submúltiplo de magnitud a medir para evitar errores al realizar el análisis de los datos
- Estimar el valor de la señal esperada por el patrón para cada frecuencia en la amplitud y sensibilidad del amplificador programada.

$$\mu_1 = \frac{S_1 S_{amp1} A}{\sqrt{2}} \quad (22)$$

Dónde:

$\mu_1$  Es tensión en REMS esperada a registrar por el patrón a la amplitud, sensibilidad programada.

$S_1$  Es la sensibilidad del acelerómetro patrón determinada en la calibración en cada frecuencia.

$A$  Es la amplitud programada.

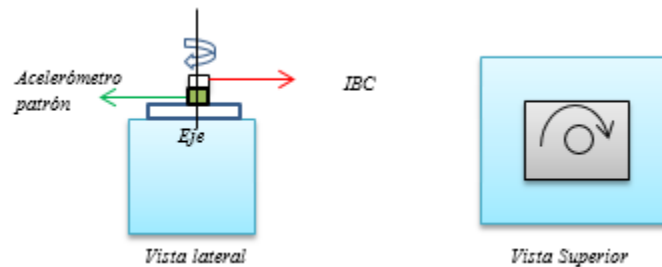
$1/\sqrt{2}$  Factor multiplicativo para obtener el valor de la señal senoidal de pico a pico a un valor de RMS.

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

Lo anterior es para garantizar la cadena de medición y verificar que los valores del proceso de medición son del mismo orden de lo esperado.

### Toma de lecturas.

“Se toman 10 lecturas en cada una de las frecuencias con el siguiente arreglo ABABABABABABABABABAB, repetir el proceso de toma de lecturas girando le IBC sobre su mismo eje, cada  $120^\circ$ , en el sentido de las manecillas de reloj para evaluar la reproducibilidad de las mediciones” (Martinez Martinez, Corro Fuentes, & Diaz Orgaz, 2016).



**Ilustración 10. Esquema de rotación del IBC para evaluar repetibilidad.**

Si se trata de un transductor tri-axial realizar el mismo procedimiento de toma de datos para cada eje de trabajo (x, y, z).

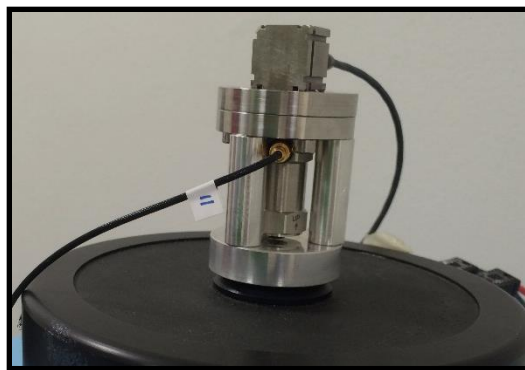
## CAPÍTULO 3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 3.1 Metodología

La metodología que se sigue es medir el dispositivo que se usa para la calibración de acelerómetros y hacer un modelado en SolidWorks para usarlo como referencia. El dispositivo consta de la siguiente estructura y visualmente en la ilustración 11.

- Una placa circular inferior de 40 mm de diámetro y altura de 10,26 mm.
- Tres postes huecos de 10,9 mm de diámetro y 30,96 mm de altura.
- Una placa circular intermedia de 40 mm de diámetro y altura de 6,15 mm.
- Una placa circular superior de 40 mm de diámetro y altura de 6,15 mm.

El dispositivo está compuesto de material de acero inoxidable 304 para las placas circulares y aluminio 1060 en los tres postes, teniendo un peso de 231,61 g.



**Ilustración 11. Dispositivo para la calibración de acelerómetros.**

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

En este dispositivo se encuentra alojado en la parte central el patrón de marca Brüel & Kjær tipo 8305 y en la parte superior el instrumento bajo calibración, que para efectos de ejemplo es un acelerómetro marca Brüel & Kjær tipo 4371. El sistema se encuentra sujeto a un excitador de vibraciones modelo 4808 de la misma marca.

El patrón tiene un alcance de calibración de 40 Hz a 10 kHz y una incertidumbre de medida máxima de  $0,021 \text{ pC}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$  con  $k=2$  según el certificado de calibración emitido por CENAM el 22 de junio del 2016, mientras el excitador de vibraciones tiene un alcance de 10 Hz a 20 kHz con un máximo desplazamiento de 8 mm, a una aceleración máxima de  $736 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  y es capaz de ejercer una fuerza máxima de 45 N (Brüer & Kjær).



**Ilustración 12 Conjunto de Monolitos.**

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

Tanto el dispositivo para la sujeción del patrón y el instrumento bajo calibración como el excitador de vibraciones están montados sobre un conjunto de dos monolitos de alta densidad separados por cuatro bolsas de aire con la finalidad de aislar las posibles vibraciones del suelo evitando ruidos en las mediciones como se ve en la ilustración 12.

El sistema funciona de la siguiente manera: según el procedimiento para la calibración de acelerómetros (Martinez Martinez, Corro Fuentes, & Diaz Orgaz, 2016):

1. Se coloca el acelerómetro patrón Brüel & Kjaer modelo 8305 atornillado sobre el excitador de vibraciones Brüel & Kjaer modelo 4808. Sobre este acelerómetro, se atornilla a su vez el sensor bajo calibración mediante un tornillo o adaptador adecuado a la rosca de cada uno de los transductores, ver ilustración 13.

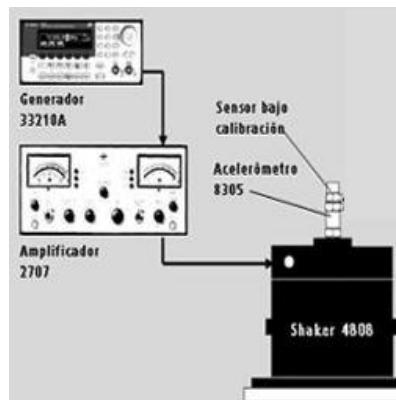


**Ilustración 13 Arreglo para la calibración de acelerómetros.**



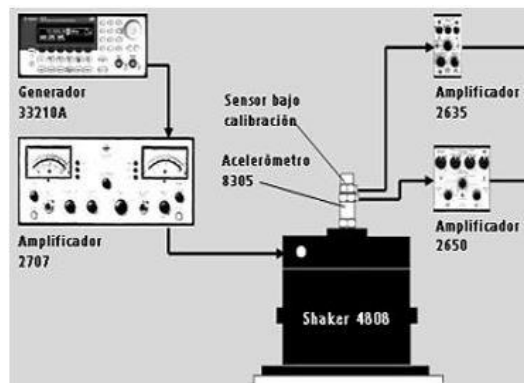
## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

2. En la Ilustración 14 se muestra como conectar mediante un cable BNC-BNC la salida frontal (Output) del generador de funciones arbitrarias Agilent modelo 33210A al conector trasero (Signal Input AC) del amplificador de potencia Brüel & Kjaer modelo 2707 y este último se conecta a su vez a través del conector posterior (Amplifier Output) al conector de entrada (Input) del excitador de vibraciones Brüel & Kjaer modelo 4808.



**Ilustración 14. Muestra como conectar mediante un cable BNC-BNC**

3. En la Ilustración 15 se muestra como Conectar el cable microdot de salida de tensión de cada acelerómetro a la entrada microdot de sus respectivos amplificadores de carga.



**Ilustración 15. Muestra la Conexión del cable Microsoft de salida de tensión a cada acelerómetro.**

4. En la ilustración 16 se muestra la salida de tensión del conjunto “acelerómetro patrón-amplificador de carga 1” ( $V_1$ ), se conecta a la entrada frontal del multímetro Hewlett-Packard modelo 34401A y la salida de tensión del conjunto “sensor bajo calibración-amplificador de carga 2” ( $V_2$ ) a la entrada posterior del mismo instrumento.

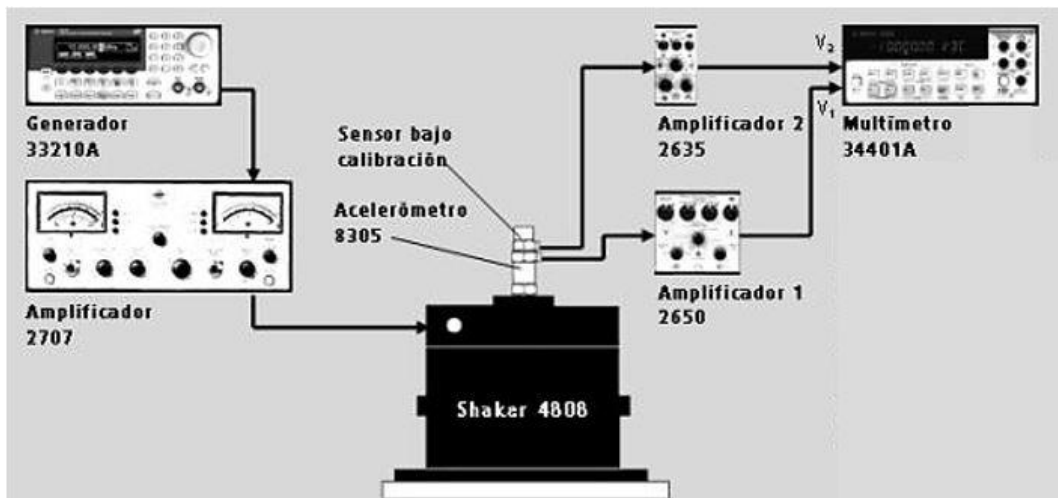
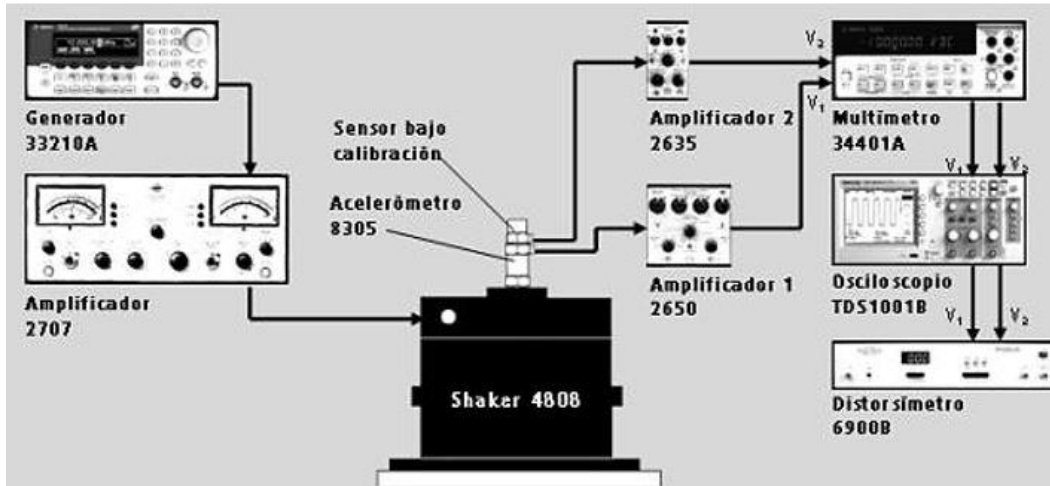


Ilustración 16. Muestra la conexión de salida de tensión del conjunto acelerómetro patrón.

5. En la ilustración 17 se muestra cómo se conectan ambas salidas eléctricas en paralelo al osciloscopio Tektronic, modelo TDS1001B. Conectando en el canal 1 del panel frontal la salida  $V_1$  y en el canal 2 del panel frontal la salida  $V_2$ . Ambas salidas se conectan en forma alternada durante la medición al Distorsímetro Kronhite Modelo 6900B debido a que posee una única entrada.

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS



**Ilustración 17. Muestra cómo se conectan ambas salidas eléctricas en paralelo al osciloscopio.**

6. Antes de medir cualquiera de las tensiones de alterna antes mencionadas, se debe configurar el setup del multímetro HP modelo 34401A seleccionando en el menú: frecuencia inferior de corte en 2 o 3 Hz, lectura slow de 6 dígitos.
7. En los amplificadores de carga utilizados a la salida de los acelerómetros, el que se calibra y el patrón, se seleccionan los controles en las siguientes posiciones:
  - a) Para amplificadores de carga B&K modelo 2635 Transducer sensitivity en 1,000 o 1,00; mVolt/Unit Out en 1,00; Lower Frequency Limit en 2 Hz y Upper Frequency Limit en 30 kHz.
  - b) Para amplificadores de carga B&K modelo 2650, los controles se utilizarán en las posiciones siguientes: Transducer Sensitivity en 1,000; Volt/Unit Out (Transducer Range) en 0,1 o 0,01 (1-11 pCmV/Unit Out); Lower Frequency Limit en 3 Hz y Upper Frequency Limit en 30 kHz.

8. Antes de encender el amplificador de potencia Brüel & Kjaer modelo 2707, verificar que los controles en el frente estén en las posiciones siguientes:

- Power: en Off
- Output Impedance: LOW
- Current Limit: 14 A rms
- Head Constant (NO DEBE TOCARSE NUNCA. Ha sido fijada al conectar el Excitador de Vibraciones
- Brüel & Kjaer 4808 en un valor de 2,8 inches/V/s)
- Displacement Limit: 0,8 mm
- Direct Current Output: Se ajusta por peso si se hace uso o no de un adaptador, para que el elemento móvil esté centrado verticalmente
- Amplifier Range: Debe estar en Reset
- Range A rms: 30
- Range V rms: 10

9. Encender el amplificador de potencia B&K modelo 2707 llevando la perilla Power a ON y luego a Load On. Si quedaran luces prendidas, se logra apagarlas girando la perilla Amplifier Gain de la posición 0 a RESET.

10. Llevar en el amplificador de potencia el Amplifier Gain a 8, valor de amplificación adecuado para este procedimiento.

11. Se seleccionan las frecuencias de la calibración, en bandas de tercio de octava (ISO 16063-21, 2003), preferentemente las de calibración del acelerómetro patrón y que siempre deberán incluir la frecuencia de referencia del acelerómetro patrón.

12. Dichas frecuencias se ingresan en el generador de funciones arbitrarias Agilent modelo 33210A seleccionando la opción "Sine" en el teclado frontal de selección de función, luego en pantalla la opción "Freq" con las teclas de menú y por último mediante el teclado numérico se ingresan los distintos valores de frecuencia.

13. Para cada una de esas frecuencias, se selecciona en pantalla la opción "Amp" del menú y luego mediante el teclado numérico se ingresa un valor de tensión en rms. Mediante el botón "Output" se habilita la salida del generador al amplificador de potencia B&K modelo 2707 y luego con la "Perilla" del panel frontal se generan niveles de amplitud en volts rms equivalentes a una señal de aceleración sinusoidal pico en  $m/s^2$ , preferentemente también los niveles empleados en la calibración del acelerómetro patrón. Verificando, antes y después de la medición, el nivel empleado en cada punto de frecuencia y chequeando que no superen el 10% de distorsión.

14. Se consignan los resultados obtenidos en una Tabla, donde  $f$  es la frecuencia de la señal generada por el generador de funciones arbitrarias Agilent modelo 33210A,  $V_1$  la tensión eléctrica a la salida del conjunto acelerómetro patrón-amplificador de carga 1;  $V_2$  la tensión eléctrica medida a la salida del conjunto sensor bajo calibración-amplificador de carga 2;  $S_1$  la sensibilidad del acelerómetro patrón y  $S_2$  la sensibilidad del sensor bajo calibración.

Una vez diseñado el dispositivo en Solid-Works, se genera una matriz con diferencias justificadas por la mejor manipulación del patrón y del equipo bajo calibración, así también se busca la viabilidad de calibrar 2 acelerómetros simultáneamente.

Al finalizar el modelado y la simulación de los dispositivos propuestos, se selecciona el de mejor resultado para realizarse físicamente y correr una prueba real de calibración. La selección la determina el dispositivo que no presente frecuencias de resonancia y que su manejo tanto del patrón como del instrumento bajo calibración sea de fácil manipulación.

Se utiliza la prueba de error normalizado (NMX-EC-17043-IMNC-2010, 2010) para determinar la consistencia de los resultados de la calibración.

### 3.2 Plan de simulación

A continuación se muestra en la tabla 2 los elementos del dispositivo para calibración de acelerómetros y los parámetros que se van a variar para encontrar la opción más viable.

Elemento	Variación
Placa inferior	Diámetro
	Altura
Placa intermedia	Diámetro
	Altura
Placa superior	Diámetro
	Altura
Postes	Diámetro
	Altura
	Número de postes
Accelerómetro bajo calibración	Número de acelerómetros bajo calibración

Tabla 2 Elementos a variar.

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS

Una vez modelados los dispositivos, se realiza un barrido de frecuencias en el intervalo de 40 Hz a 10 kHz y se realiza un concentrado de los resultados obtenidos, posteriormente se realiza un análisis de los resultados de la simulación y se selecciona los dispositivos más viables para fabricar y probar.

Ya con el modelo fabricado, se hacen pruebas reales de calibración en donde se pretende probar que es posible la calibración de más de un acelerómetro y que hay la posibilidad de tener un diseño de un dispositivo versátil y validado para la calibración de acelerómetros.

## CAPÍTULO 4 RESULTADOS

Se generaron 7 diferentes dispositivos para simular que a continuación se describen e ilustran.

### 4.1 Resultados de simulación

#### 4.1.1 Modelado cero

El modelado cero es el adquirido con el sistema de medición, este dispositivo es diseñado por el **Centro Nacional de Metrología (CENAM)** y tiene las dimensiones mostradas en la tabla 3.

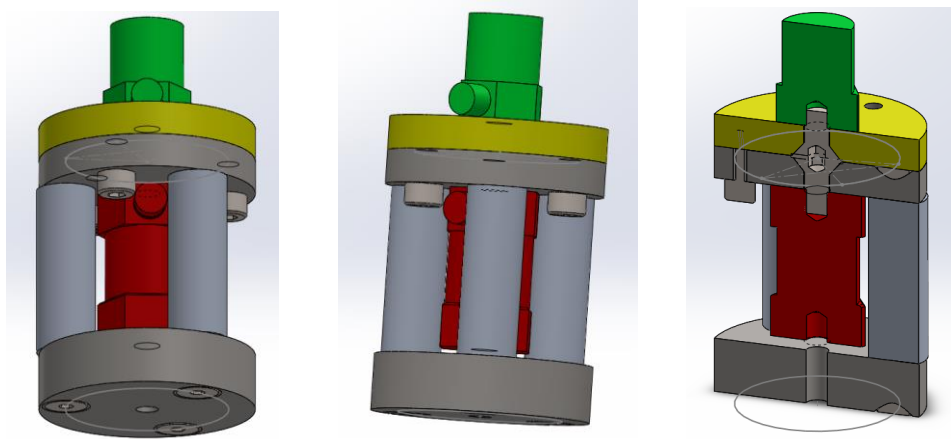
Elemento	Variación	Cota
Placa inferior	Diámetro	40,00 mm
	Altura	10,26 mm
Placa intermedia	Diámetro	40,00 mm
	Altura	6,15 mm
Placa superior	Diámetro	40,00 mm
	Altura	6,15 mm
Postes	Diámetro	10,90 mm
	Altura	30,96 mm
	Número de postes	3
Accelerómetro bajo calibración	Número de acelerómetros bajo calibración	1

Tabla 3 Construcción del modelado cero (0).



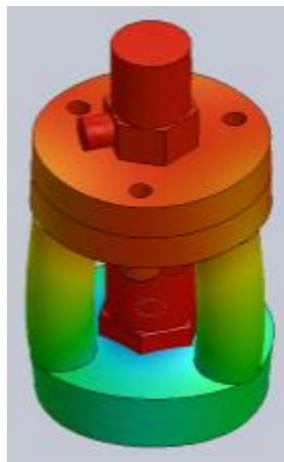
## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

En la ilustración 18 se muestra el diseño en SolidWorks del modelo 0.



**Ilustración 18 Modelado 0**

Como resultado del barrido de frecuencias se encuentra que el dispositivo cero tiene problemas a 6 464,8 Hz donde se encontró frecuencia de resonancia en el modo 6 del barrido, ver ilustración 19.



**Ilustración 19 Frecuencia de resonancia a 6 464,8 Hz.**

#### 4.1.2 Modelado uno

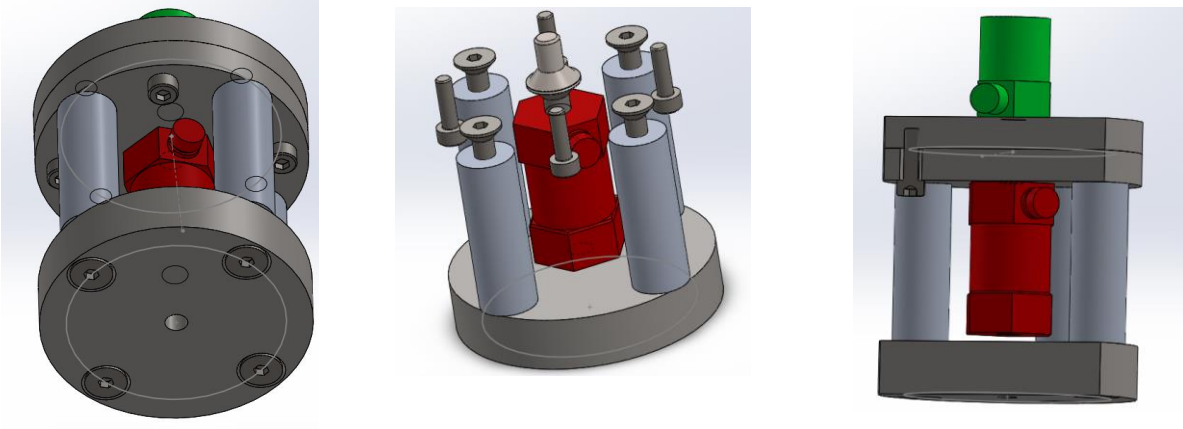
Al modelado uno se le modifica los parámetros del diámetro en la placa inferior, el diámetro de la placa intermedia y diámetro de la placa superior, así también se construye con 4 postes. Las dimensiones se muestran en la tabla 4.

Elemento	Variación	Cota
Placa inferior	<b>Diámetro</b>	50,00 mm
	Altura	10,26 mm
Placa intermedia	<b>Diámetro</b>	50,00 mm
	Altura	6,15 mm
Placa superior	<b>Diámetro</b>	50,00 mm
	Altura	6,15 mm
Postes	Diámetro	10,90 mm
	Altura	30,96 mm
	<b>Número de postes</b>	4
Acelerómetro bajo calibración	Número de acelerómetros bajo calibración	1

**Tabla 4 Construcción del modelado uno.**

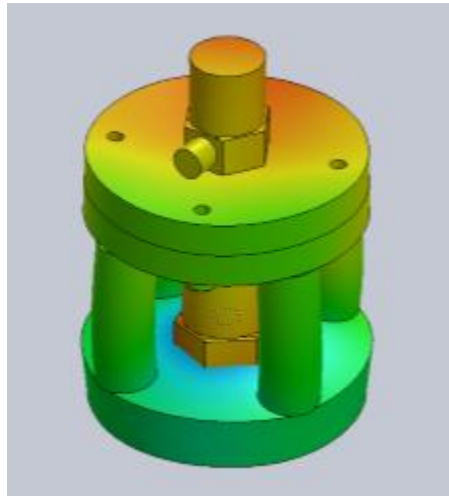
En la ilustración 20 se muestra el diseño en SolidWorks del modelo uno.

DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS



**Ilustración 20 Modelado uno.**

Como resultado del barrido de frecuencias se encuentra que el dispositivo uno tiene problemas y presenta frecuencia de resonancia a 5 353,75 Hz en el modo 6 del barrido como se ve en la ilustración 21.



**Ilustración 21 Frecuencia de resonancia a 5 353,75 Hz.**

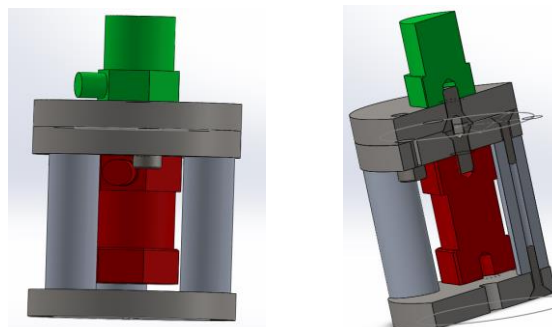
### 4.1.3 Modelado dos

Al modelado dos se modifica los parámetros de la altura en la placa inferior, el diámetro de los postes. Las dimensiones se muestran en la tabla 5.

Elemento	Variación	Cota
Placa inferior	Diámetro	40,00 mm
	<b>Altura</b>	6,15 mm
Placa intermedia	Diámetro	40,00 mm
	Altura	6,15 mm
Placa superior	Diámetro	40,00 mm
	Altura	6,15 mm
Postes	<b>Diámetro</b>	9,76 mm
	Altura	30,96 mm
	Número de postes	3
Accelerómetro bajo calibración	Número de acelerómetros bajo calibración	1

**Tabla 5 Construcción del modelado dos**

En la ilustración 22 se muestra el diseño en SolidWorks del modelo dos.



**Ilustración 22 Modelado dos.**

Como resultado del barrido de frecuencias se encuentra que el dispositivo dos presenta frecuencia de resonancia a 4 840,92 Hz en el modo 6 del barrido como se ve en la ilustración 23.

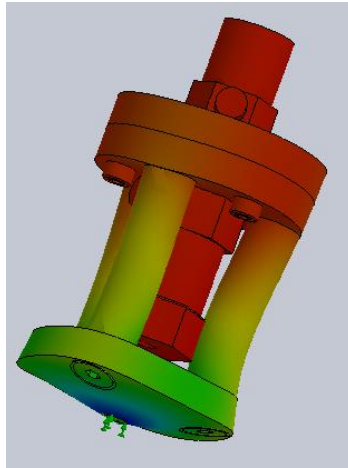


Ilustración 23 Frecuencia de resonancia a 4 840,92 Hz.

#### 4.1.4 Modelado tres

Al modelado tres se modifica los parámetros de número de acelerómetros a calibrar como se muestra en la tabla 6.

Elemento	Variación	Cota
Placa inferior	Diámetro	40,00 mm
	Altura	10,26 mm
Placa intermedia	Diámetro	40,00 mm
	Altura	6,15 mm
Placa superior	Diámetro	40,00 mm
	Altura	6,15 mm

DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

Postes	Diámetro	10,90 mm
	Altura	30,96 mm
	Número de postes	3
Acelerómetro bajo calibración	<b>Número de acelerómetros bajo calibración</b>	2

Tabla 6 Construcción del modelado tres.

En la ilustración 24 se muestra el diseño en SolidWorks del modelo tres.

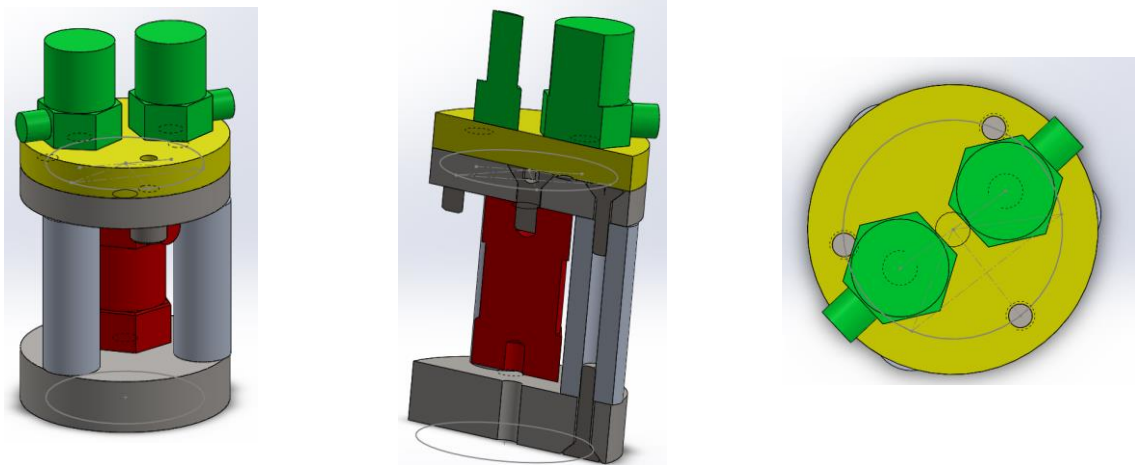


Ilustración 24 Modelado tres.

Como resultado del barrido de frecuencias se encuentra que el dispositivo tres tiene problemas y presenta frecuencia de resonancia a 6 247,15 Hz en el modo 6 del barrido como se ve en la ilustración 25.

DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

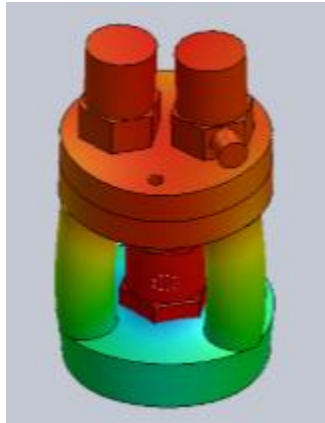


Ilustración 25 Frecuencia de resonancia a 6 247,15 Hz.

#### 4.1.5 Modelado cuatro

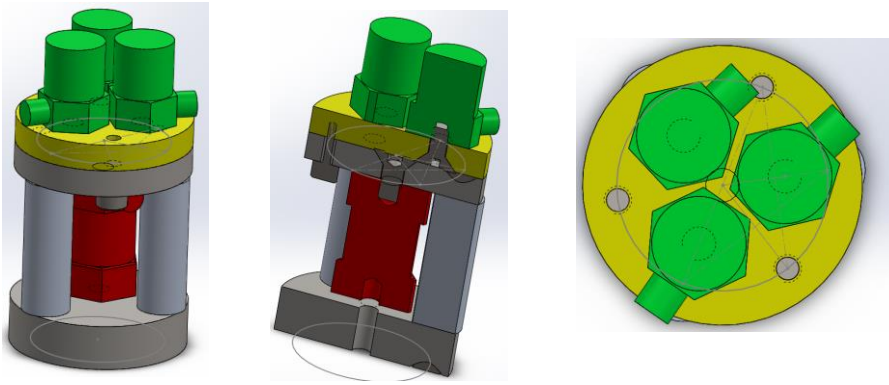
Al modelado cuatro se modifica los parámetros del número de acelerómetros a calibrar como se ve en la tabla 7.

Elemento	Variación	Cota
Placa inferior	Diámetro	40,00 mm
	Altura	10,26 mm
Placa intermedia	Diámetro	40,00 mm
	Altura	6,15 mm
Placa superior	Diámetro	40,00 mm
	Altura	6,15 mm
Postes	Diámetro	10,90 mm
	Altura	30,96 mm
	Número de postes	3
Acelerómetro bajo calibración	<b>Número de acelerómetros bajo calibración</b>	3

Tabla 7 Construcción del modelado cuatro

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

En la ilustración 26 se muestra el diseño en SolidWorks del modelo cuatro.



**Ilustración 26 Modelado cuatro.**

Como resultado del barrido de frecuencias se encuentra que el dispositivo cuatro tiene problemas y presenta frecuencia de resonancia a 6 052,86 Hz en el modo 6 del barrido como se ve en la ilustración 27.



DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

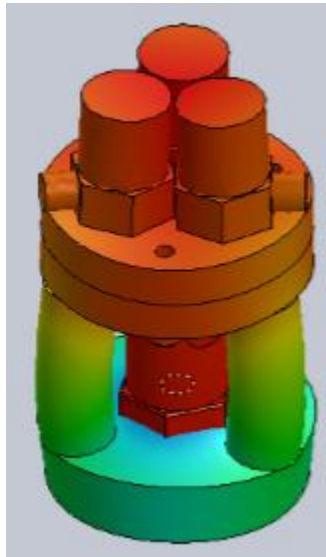


Ilustración 27 Frecuencia de resonancia a 6 052,86 Hz.

#### 4.1.6 Modelado cinco

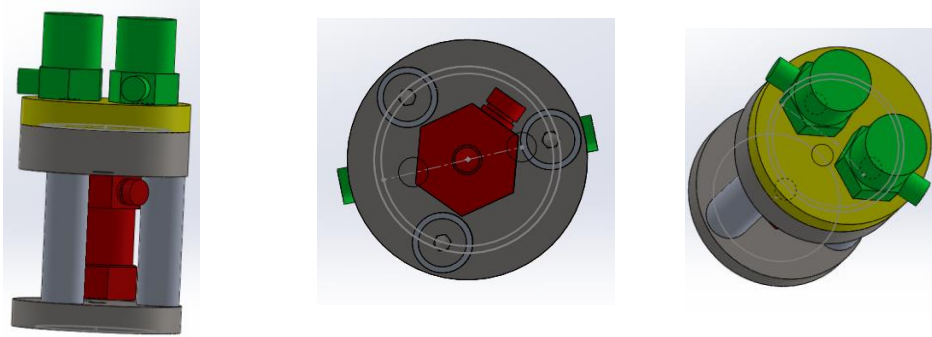
Al modelado cinco se modifica los parámetros de diámetro y altura de la placa inferior, diámetro de la placa intermedia, diámetro de la placa superior, diámetro y altura de los postes y número de acelerómetros a calibrar. Las dimensiones se muestran en la tabla 8.

Elemento	Variación	Cota
Placa inferior	<b>Diámetro</b>	38,85 mm
	<b>Altura</b>	6,15 mm
Placa intermedia	<b>Diámetro</b>	38,85 mm
	Altura	6,15 mm
Placa superior	<b>Diámetro</b>	38,85 mm
	Altura	6,15 mm
Postes	<b>Diámetro</b>	9,76 mm
	<b>Altura</b>	30,10 mm
	Número de postes	3
Acelerómetro bajo calibración	<b>Número de acelerómetros bajo calibración</b>	2

Tabla 8 Construcción del modelado cinco.

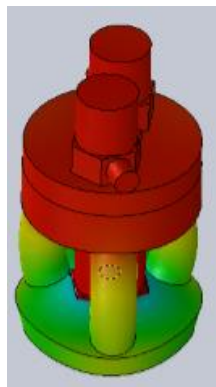
DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

En la ilustración 28 se muestra el diseño en SolidWorks del modelo cinco.



**Ilustración 28 Modelado cinco.**

Como resultado del barrido de frecuencias se encuentra que el dispositivo cinco tiene problemas y presenta frecuencia de resonancia a 4 658,15 Hz en el modo 6 del barrido como se ve en la ilustración 29.



**Ilustración 29 Frecuencia de resonancia a 4 658,15 Hz.**

#### 4.1.7 Modelado seis

Al modelado seis se modifica los parámetros quitando la estructura superior y dejando tanto el acelerómetro patrón como el acelerómetro bajo calibración en la misma base como se muestra en la tabla 9.

Elemento	Variación	Cota
Placa inferior	Diámetro	40,00 mm
	Altura	10,26 mm
Accelerómetro bajo calibración	Número de acelerómetros bajo calibración	1

Tabla 9 Construcción del modelado seis.

En la ilustración 30 se muestra el diseño en SolidWorks del modelo seis.

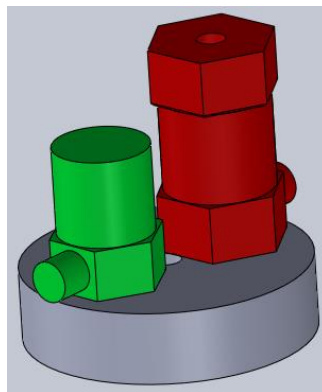


Ilustración 30 Modelado 6.

Como resultado del barrido de frecuencias se encuentra que el dispositivo seis presenta frecuencia de resonancia en el modo 6 fuera del intervalo de uso a los 15 970 Hz como se ve en la ilustración 31.

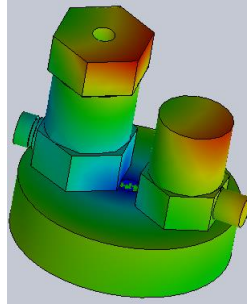


Ilustración 31 Frecuencia de resonancia a 15 970 Hz.

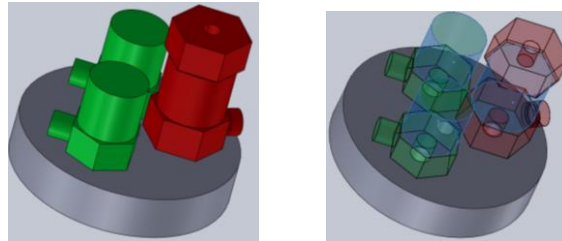
#### 4.1.8 Modelado siete

Al modelado siete se modifica los parámetros quitando la estructura superior y dejando tanto el acelerómetro patrón como dos acelerómetro bajo calibración en la misma base como se muestra en la tabla 10.

Elemento	Variación	Cota
Placa inferior	Diámetro	40,00 mm
	Altura	10,26 mm
Acelerómetro bajo calibración	<b>Número de acelerómetros bajo calibración</b>	2

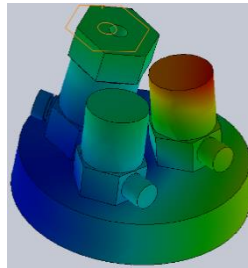
Tabla 10 Construcción del modelado siete.

En la ilustración 32 se muestra el diseño en SolidWorks del modelo siete.



**Ilustración 32 Modelado 7.**

Como resultado del barrido de frecuencias se encuentra que el dispositivo siete tiene problemas y presenta frecuencia de resonancia a 9 157,6 Hz, 9 920,9 Hz, en el modo 5 y 6 como se ve en la ilustración 33.



**Ilustración 33 Frecuencia de resonancia a 9 157,6 Hz y 9 920,9 Hz.**

#### **4.2 Concentrado de los resultados de la simulación**

Una vez obtenidos los resultados de la simulación se hace un análisis de ellos en conjunto como se muestra en la tabla 11.

DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

Modelo	Frecuencia de resonancia (Hz)	Número de acelerómetros bajo calibrar	Dispositivo 0 vs otros
0	6 464,80	1	0,0
1	5 353,86	1	1 110,9
2	4 840,92	1	1 623,9
<b>3</b>	<b><u>6 247,20</u></b>	<b>2</b>	<b><u>217,6</u></b>
4	6 052,90	3	411,9
5	4 658,10	2	1 806,7
<b>6</b>	<b><u>15 970</u></b>	<b>1</b>	<b>9 505,2</b>
<b>7</b>	9 157,6 Hz y 9 920,9 Hz	2	3 456,1

**Tabla 11 Concentrado de resultados de la simulación.**

En base a los resultados obtenidos de la simulación, se toma la decisión buscando un comportamiento similar al ya validado por CENAM y se propone un dispositivo simplificado para validar. El dispositivo tres permite la calibración de dos acelerómetros y es seleccionado al estar lo más cerca de la frecuencia de resonancia del dispositivo validado por CENAM. Siendo la segunda opción el dispositivo seis que permite la manipulación ágil de los acelerómetros y tener una frecuencia de resonancia por arriba del intervalo de uso del laboratorio. En base a esto se seleccionan los dispositivos tres y seis para hacer pruebas en laboratorio.

### **4.3 Resultado de los dispositivos fabricados**

Las calibraciones se repitieron según el procedimiento de calibración, haciendo tres repeticiones en 0 °, 120 ° y 240 ° (Martinez Martinez, Corro Fuentes, & Diaz Orgaz, 2016), y a su vez se corroboraron las mediciones obtenidas

### 4.3.1 Dispositivo 3

Una vez fabricado el dispositivo tres para realizar la prueba, se somete a mediciones utilizando el patrón Brüel & Kjær tipo 8305 y se coloca en la parte superior dos acelerómetros bajo calibración marca Brüel & Kjær tipo 4371 como se muestra en la ilustración 34 para ser calibrados en conjunto.



**Ilustración 34 Dispositivo tres, con capacidad para calibrar dos acelerómetros.**

Los resultados obtenidos de la calibración de los acelerómetros bajo calibración son:

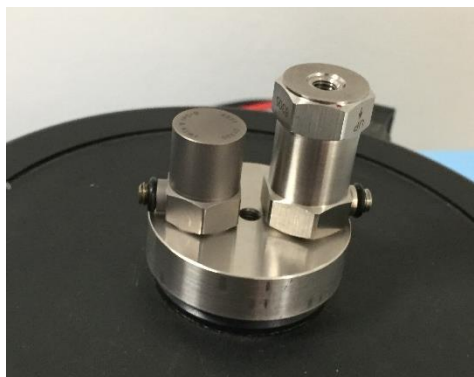
DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

No. serie	31333		31379	
	Sensibilidad	U k=2	Sensibilidad	U k=2
Frecuencia	pC/ms <sup>2</sup>	% L	pC/ms <sup>2</sup>	% L
40	1,01	0,49	1,01	0,50
50	1,01	0,51	1,01	0,51
80	1,01	0,55	1,01	0,49
100	1,0	1,1	1,00	0,61
160	1,01	0,45	1,00	0,40
200	1,00	0,42	1,00	0,40
400	1,0	1,2	1,0	1,1
500	1,0	6,6	1,0	8,7
800	1,0	2,5	1,0	1,5
1 000	0,99	0,41	0,99	0,37
2 000	0,99	0,57	0,99	0,49
4 000	1,0	2,2	1,0	2,2
5 000	1,0	3,1	1,0	3,4
7 000	1,0	1,1	1,0	1,1
9 000	1,0	1,4	1,0	1,7
10 000	1,0	2,9	1,0	2,1

Tabla 12 Resultados de la calibración del dispositivo tres.

#### 4.3.2 Dispositivo 6

Una vez fabricado el dispositivo seis para realizar la prueba, se somete a mediciones utilizando el patrón Brüel & Kjær tipo 8305 y se coloca un acelerómetro bajo calibración marca Brüel & Kjær tipo 4371 como se muestra en la ilustración 35.





**Ilustración 35 Dispositivo seis, con capacidad para calibrar un acelerómetros.**

Los resultados obtenidos de la calibración del instrumento bajo calibración son:

No. serie	31333		31379	
	Sensibilidad	U k=2	Sensibilidad	U k=2
Frecuencia	pC/ms <sup>2</sup>	% L	pC/ms <sup>2</sup>	% L
40	1,02	0,51	1,01	0,52
50	1,02	0,65	1,02	0,65
80	1,01	0,51	1,01	0,60
100	1,00	0,47	1,00	0,74
160	0,94	0,44	0,94	0,89
200	1,29	0,38	1,29	0,48
400	0,99	0,40	0,99	0,43
500	1,08	0,44	1,08	0,76
800	1,04	0,37	1,05	0,64
1 000	1,03	0,39	1,04	0,76
2 000	0,94	0,42	0,94	0,38
4 000	0,73	0,67	0,73	0,75
5 000	1,32	0,42	1,32	0,57
7 000	0,4	2,3	0,4	2,2
9 000	11,4	2,6	11,41	2,64
10 000	15,6	2,8	15,66	2,78

**Tabla 13 Resultados de la calibración del dispositivo seis.**

#### 4.4 Validación de los resultados de las mediciones

Una vez realizadas las calibraciones con cada uno de los dispositivos, se hace la validación de los resultados obtenidos mediante la técnica de error normalizado (NMX-EC-17043-IMNC-2010, 2010).

DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

Se concentran los resultados para el acelerómetro marca Brüel & Kjær tipo 4371 y serie 31333 a continuación:

Dispositivo	Referencia			X1			X2			Error normalizado	
	Dispositivo 0 (CENAM)			Dispositivo 3 (dos acelerómetros)			Dispositivo 6 (patrón e IBC)				
Id-Serie:	31333			31333			31333				
Modelo:	4371			4371			4371				
Frecuencia	Sensibilidad	U k=2	U k=2	Sensibilidad	U k=2	U k=2	Sensibilidad	U k=2	U k=2	Ref vs. X1	Ref vs. X2
Hz	$\mu\text{C}/\text{ms}^2$	% L	$\mu\text{C}/\text{ms}^2$	$\mu\text{C}/\text{ms}^2$	% L	$\mu\text{C}/\text{ms}^2$	$\mu\text{C}/\text{ms}^2$	% L	$\mu\text{C}/\text{ms}^2$	En	En
40	1,02	0,47	0,004 77	1,01	0,49	0,005 02	1,02	0,51	0,005 19	0,096 6	0,507 3
50	1,01	0,48	0,004 85	1,01	0,51	0,005 15	1,02	0,65	0,006 63	0,060 9	0,232 1
80	1,01	0,47	0,004 78	1,01	0,55	0,005 58	1,01	0,51	0,005 13	0,134 3	0,422 4
100	1,01	0,68	0,006 83	1,0	1,1	0,011 44	1,00	0,47	0,004 72	0,211 7	1,134 2
160	1,01	0,40	0,004 06	1,01	0,45	0,004 53	0,94	0,44	0,004 11	0,027 8	11,829 3
200	1,00	0,39	0,003 94	1,00	0,42	0,004 26	1,29	0,38	0,004 88	0,017 9	45,570 9
400	1,00	0,38	0,003 84	1,0	1,2	0,011 64	0,99	0,40	0,003 94	0,029 1	2,033 7
500	1,00	0,44	0,004 39	1,0	6,6	0,067 05	1,08	0,44	0,004 80	0,275 8	13,070 3
800	0,99	0,38	0,003 74	1,0	2,5	0,024 94	1,04	0,37	0,003 87	0,037 9	9,331 3
1 000	0,99	0,36	0,003 61	0,99	0,41	0,004 09	1,03	0,39	0,003 99	0,078 6	7,288 5
2 000	0,99	0,37	0,003 62	0,99	0,57	0,005 60	0,94	0,42	0,003 98	0,150 5	9,350 9
4 000	0,99	0,54	0,005 36	1,0	2,2	0,021 43	0,73	0,67	0,004 90	0,088 5	35,937 3
5 000	1,00	0,49	0,004 83	1,0	3,1	0,030 21	1,32	0,42	0,005 51	0,483 9	44,852 0
7 000	1,0	1,0	0,010 39	1,0	1,1	0,010 36	0,4	2,3	0,009 65	1,613 4	40,841 9
9 000	1,0	1,0	0,010 45	1,0	1,4	0,013 63	11,4	2,6	0,300 20	2,807 6	34,575 5
10 000	1,0	2,0	0,020 50	1,0	2,9	0,028 42	15,6	2,8	0,440 27	1,863 9	33,165 9

**Tabla 14 Validación de los resultados del acelerómetro no. Serie 31333.**

Una vez calibrado el acelerómetro modelo 4371 con serie 31333 en el dispositivo cero, tres y seis se concentran los resultados en la tabla 14. El tratamiento que se les da es por medio de error normalizado (NMX-EC-17043-IMNC-2010, 2010) para validar los resultados y su consistencia en relación a la referencia que es el dispositivo cero.

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS

Se observa que el dispositivo 3 es consistente en el intervalo de medida de 40 Hz a 5 kHz y de 7 kHz a 10 kHz no es consistente. Lo que significa que este dispositivo es muy viable en el intervalo de medida donde es consistente.

En tanto el dispositivo 6 solo es consistente en el intervalo de medida de 40 Hz a 80 Hz. Lo que significa que no es viable utilizar este dispositivo por su corto intervalo de medida donde puede ser utilizado.

Por otro lado los datos que están por arriba de 1 o sea, no consistentes se pueden adjudicar a un balanceo desigual de masa.

DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

Se concentran los resultados para el acelerómetro marca Brüel & Kjær tipo 4371 y serie 31379 a continuación:

Dispositivo	Referencia			X1			X2			Error normalizado	
	Dispositivo 0 (CENAM)			Dispositivo 3 (dos acelerómetros)			Dispositivo 6 (patrón e IBC))				
Id-Serie:	31379			31379			31379				
Modelo:	4371			4371			4371				
Frecuencia	Sensibilidad	U k=2	U k=2	Sensibilidad	U k=2	U k=2	Sensibilidad	U k=2	U k=2	Ref vs. X1	Ref vs. X2
Hz	pC/ms <sup>2</sup>	% L	pC/ms <sup>2</sup>	pC/ms <sup>2</sup>	% L	pC/ms <sup>2</sup>	pC/ms <sup>2</sup>	% L	pC/ms <sup>2</sup>	En	En
40	1,01	0,60	0,006 05	1,01	0,50	0,005 04	1,01	0,52	0,0052	0,042 5	0,276 6
50	1,01	0,50	0,005 07	1,01	0,51	0,005 19	1,02	0,65	0,0066	0,226 7	0,876 5
80	1,01	0,47	0,004 73	1,01	0,49	0,004 98	1,01	0,60	0,0061	0,098 2	0,058 0
100	1,01	0,44	0,004 46	1,00	0,61	0,006 10	1,00	0,74	0,0074	0,598 4	0,908 9
160	1,00	0,44	0,004 40	1,00	0,40	0,004 06	0,94	0,89	0,0084	0,139 4	6,761 2
200	1,00	0,43	0,004 36	1,00	0,40	0,003 98	1,29	0,48	0,0062	0,075 6	37,889 3
400	1,00	0,39	0,003 86	1,0	1,1	0,011 02	0,99	0,43	0,0043	0,232 4	2,128 6
500	1,00	0,40	0,003 95	1,0	8,7	0,088 43	1,08	0,76	0,0083	0,180 5	9,411 0
800	0,99	0,37	0,003 65	1,0	1,5	0,015 19	1,05	0,64	0,0067	0,310 6	7,143 1
1 000	0,99	0,37	0,003 63	0,99	0,37	0,003 66	1,04	0,76	0,0079	0,202 5	4,990 7
2 000	0,99	0,37	0,003 62	0,99	0,49	0,004 80	0,94	0,38	0,0036	0,221 4	10,316 9
4 000	0,99	0,55	0,005 48	1,0	2,2	0,021 83	0,73	0,75	0,0055	0,094 4	33,870 6
5 000	0,99	0,45	0,004 49	1,0	3,4	0,032 83	1,32	0,57	0,0075	0,667 6	37,367 4
7 000	1,0	1,1	0,010 51	1,0	1,1	0,010 45	0,4	2,2	0,009	1,235 7	40,991 8
9 000	1,0	1,1	0,010 94	1,0	1,7	0,016 13	11,41	2,64	0,301	2,178 3	34,501 7
10 000	1,0	2,1	0,020 93	1,0	2,1	0,020 60	15,66	2,78	0,436	1,891 6	33,537 5

**Tabla 15 Validación de los resultados del acelerómetro no. Serie 31379.**

Una vez calibrado el acelerómetro modelo 4371 con serie 31379 en el dispositivo cero, tres y seis se concentran los resultados en la tabla 15. El tratamiento que se les da es por medio de error normalizado (NMX-EC-17043-IMNC-2010, 2010) para validar los resultados y su consistencia en relación a la referencia que es el dispositivo cero.

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS

Se observa que el dispositivo 3 es consistente en el intervalo de medida de 40 Hz a 5 kHz y de 7 kHz a 10 kHz no es consistente. Lo que significa que este dispositivo es muy viable en el intervalo de medida donde es consistente.

En tanto el dispositivo 6 solo es consistente en el intervalo de medida de 40 Hz a 100 Hz. Lo que significa que no es viable utilizar este dispositivo por su corto intervalo de medida donde puede ser utilizado.

Por otro lado los datos que están por arriba de 1 o sea, no consistentes se pueden adjudicar a un balanceo desigual de masa.

## CONCLUSIONES

Basado a los resultados obtenidos en la simulación y la validación de los dispositivos, se concluye que es posible utilizar bajo ciertas condiciones un dispositivo auxiliar para la calibración de acelerómetros que permita una manipulación ágil y segura en el proceso cotidiano.

Se observa la posibilidad de desarrollar nuevos dispositivos en la calibración de acelerómetros que sean capaces de funcionar en intervalos más amplios, permitan la calibración de múltiples acelerómetros y una manipulación versátil del equipo bajo calibración.

### 5.1 Conclusiones de la simulación

Se modelan siete dispositivos con el software Solid-Works a los cuales se varían dimensiones y número de acelerómetros bajo calibración buscando un dispositivo que no presente frecuencia de resonancia o si tuviera alguna frecuencia de resonancia que se encuentre fuera del intervalo de medida que usa el laboratorio.

De los siete dispositivos evaluados en la simulación, se seleccionan los dos más prometedores según el barrido de frecuencias al que fueron sometidos; el dispositivo tres permite la calibración de dos acelerómetros y se encuentra cerca de la frecuencia de resonancia encontrada en el dispositivo propuesto por el CENAM, mientras que dispositivo seis demuestra una ágil manipulación y no presenta frecuencia de resonancia en el intervalo de uso del laboratorio. En la tabla 16 se resumen las frecuencias de resonancia de los dispositivos que se construyeron y el número de acelerómetros que son capaces de ser calibrados en ellos.

Dispositivo	Frecuencia de resonancia (Hz)	Número de acelerómetros bajo calibrar
0 CENAM	6 464,80	1
<b>3</b>	<b>6 247,20</b>	<b>2</b>
<b>6</b>	<b>15 970</b>	<b>1</b>

**Tabla 16 Mejores resultados de la simulación**

Uno de los descubrimientos destacados del dispositivo propuesto por el CENAM pero que no se tiene documentado nada al respecto, es el descubrimiento de la frecuencia de resonancia a 6 464,80 Hz, y ahora se tiene la base del porque se opta por no calibrar acelerómetros en la frecuencia de 6 000 Hz teniendo un sustento confiable para el intervalo que el laboratorio utiliza. Este resultado motivo a materializar un dispositivo con una frecuencia de resonancia cercana al propuesto por el CENAM.

Por otro lado, se encontró en el barrido de frecuencias un dispositivo que mostraba experimentalmente, una frecuencia de resonancia a 15 970 Hz, fuera del intervalo de medida que utiliza el laboratorio. Y se selecciona para materializarlo también.

## **5.2 Conclusiones de la validación del dispositivo**

Una vez materializados los dispositivos tres y seis, se validan tomando como referencia el dispositivo cero propuesto por el cenam, siendo este dispositivo el utilizado para acreditar el laboratorio sumado al logro del resultado satisfactorio en el ensayo de aptitud.

El dispositivo tres presenta una frecuencia de resonancia experimental de 6 247,20 Hz, muy cercana al propuesto por el CENAM, con la ventaja que este nos permite la calibración de dos acelerómetros. Mientras que el dispositivo seis la frecuencia de resonancia se presenta hasta los 15 970 Hz que está por afuera del intervalo de medida acreditado en el laboratorio, pero solo nos permite la calibración de 1 acelerómetro.

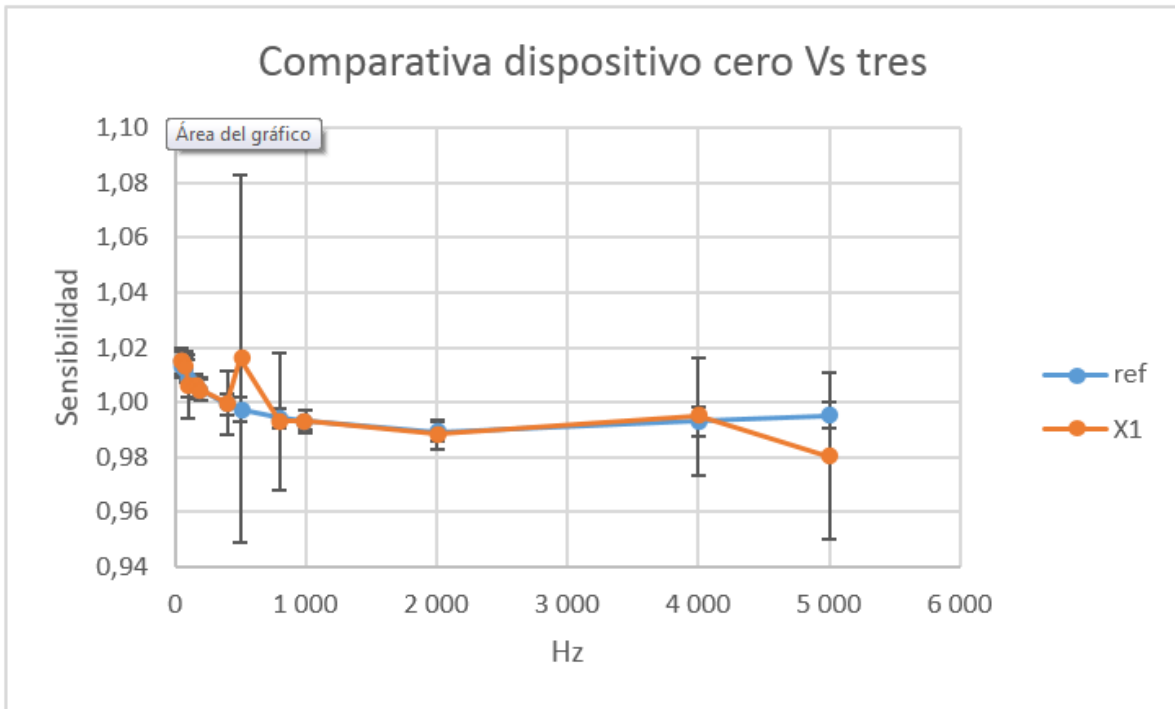
En la tabla catorce y quince se validan los resultados obtenidos utilizando el estadístico de error normalizado (NMX-EC-17043-IMNC-2010, 2010) de las calibraciones realizadas, mostrando viable utilizar el dispositivo tres en el intervalo

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

de 40 Hz a 5 000 Hz. Teniendo en consideración que la incertidumbre en el intervalo de 400 Hz a 800 Hz es alta debido a problemas de repetibilidad y a fuetes no estudiados en esta tesis que se pueden adjudicar al balanceo de los acelerómetros o a diferencias de masa de los acelerómetros, aún que en lo teórico ofrecen resultados favorables, en la experimentación se ve limitado el intervalo de uso. Obteniendo como mejor resultado en la experimentación el dispositivo tres ya que permite calibrar dos acelerómetros en el intervalo de medida mencionado.

Se muestra en la ilustración 36 el comportamiento y su incertidumbre de medida del dispositivo cero (referencia) y el dispositivo tres, siendo el resultado de la investigación, la fabricación de un dispositivo alternativo que nos permita la calibración de más de un acelerómetro. Es claro que existen incertidumbres de medida grandes que se pueden adjudicar a la reproducibilidad del dispositivo y pudieran atribuirse a un la diferencia de masas entre los acelerómetros bajo calibración.





**Ilustración 36 Grafica de comportamiento entre el dispositivo cero y el tres.**

Como trabajo futuro veo muy posible hacer un rediseño del dispositivo que nos permita un intervalo de uso más amplio y versatilidad al calibrar múltiples acelerómetros con un dispositivo. Como aportación relevante se tiene que el dispositivo usado pese a cumplir con la normativa para la calibración, se ve limitado en el intervalo de calibración al tener una frecuencia de resonancia dentro del intervalo de uso, por lo que es posible proponer un rediseño con las características de facilidad de montaje, calibración de más de un acelerómetro y libre de una frecuencias de resonancia dentro del intervalo de calibración.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A/S, B. &. (s.f.). *Vibration Measurement and Analysis*.

Alonso, M., & Finn, E. (1995). *Física*. Addison Wesley Iberoamericana.

Brüel & Kjær. (1998). *Lecture note 7676-12. Vibration transducers and signal conditioning*.

Brüel & Kjær. (s.f.). Type 8305. *Product Data*.

Brüel & Kjær. (s.f.). Vibration exciter type 4809. *Product data*.

Dimarogonas, A. (1996). *Vibration For Engineers*. New Jersey: Prentice Hall.

Inman, D. J. (1996). *Engineering vibration*. Prentice Hall.

ISO 16063-21. (2003). Methods for the calibration of vibration and shock transducer. Part: 21; Vibration calibration by comparison to a reference transducer. ISO.

Lafita, F., & Mata, H. (1968). *Introducción a la Teoría de las Vibraciones Mecánicas*. Ed. Labor.

Levi, E. (1991). *Elementos de Mecánica del Medio Continuo*. México: Limusa.

Martinez Martinez, S., Corro Fuentes, O., & Diaz Orgaz, M. (2016). Procedimiento para la calibración de transductores de vibraciones. Querétaro, México. Recuperado el 2017

DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

Muñiz, L. M. (18 de febrero de 2015). Conceptos básicos de vibraciones mecánicas. Querétaro, Querétaro, México.

Newland, D. E. (1993). *An introduction to random vibrations, spectral and wavelet analysis* (Third edition ed.). Addison Wesley longman Limited.

NMX-CH-140-IMNC-2002 . (2002). Guía para la expresión de incertidumbre en las mediciones. NMX.

NMX-EC-17043-IMNC-2010. (2010). Evaluación de la conformidad - Requisitos generales para los ensayos de aptitud. NMX.

NMX-Z-055-IMNC-2009. (2009). Vocabulario Internacional de metrología - Conceptos fundamentales y generales, términos asociados (VIM). NMX.

NOM-008-SCFI-2002 Sistema General de Unidades de Medida. (2002). México: Secretaría de Economía.

Sadiku, M. N. (2005). *Electromagnetismo* (segunda ed.). México: Compañía Editorial Continental.

Thompson, w. T. (s.f.). *Theory of vibration with applications* (Fourth edition ed.). prentice Hall.

Por la naturaleza de la tesis orientada al diseño del dispositivo a utilizar en la calibración de acelerómetros, no se cuenta con mayor bibliografía que aporte un modelado del dispositivo.

## ANEXOS

### Glosario

Acelerómetros: Transductores electromecánicos que generan una señal eléctrica cuando se someten a una vibración, la señal es directamente proporcional a la aceleración a la que se somete, en un rango limitado de frecuencia el cual define su intervalo de uso.

Amplitud (**A**): de un movimiento oscilatorio, ondulatorio o señal electromagnética es una medida de la variación máxima del desplazamiento.

Frecuencia (**f**): Es la magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico, como movimiento oscilatorio.

Generador de vibraciones controladas: es un generador de función senoidal que permite controlar el nivel de vibraciones en niveles seleccionados.

Periodo: intervalo de tiempo entre dos 2 puntos equivalente de una onda u oscilación.

Sensibilidad del transductor: se conoce a la relación entre el movimiento de entrada con respecto a la señal de salida.

Nota 1: La sensibilidad de un transductor es la primera característica y se desea que la sensibilidad sea alta para que la medición de la señal de salida sea más

sencilla. Dependiendo de la naturaleza de la señal de salida, la sensibilidad puede ser de carga o tensión

Transductor: Dispositivo que convierte el movimiento mecánico en una dirección dada en una cantidad que puede ser medida o grabada, sus características principales son sensibilidad, intervalo de operación en amplitud y frecuencia, masa y principio de funcionamiento para observar en que se genera la señal de salida.

Vibración: Movimiento oscilatorio alrededor de una posición de referencia.

Vibración libre: es la que ocurre cuando un sistema oscila bajo la acción e fuerzas inherentes al sistema mismo, es decir cuando las fuerzas externas aplicadas son nulas.

Vibración forzada: es la que ocurre cuando existen excitación de fuerzas externas al sistema. Cuando la fuerza de excitación, si ésta coincide con una de las frecuencias naturales del sistema, ocurre el fenómeno de resonancia y

Calibración: operación que bajo condiciones especificadas establece, en una primera etapa, una relación entre los valores y sus incertidumbres de medida asociadas obtenidas a partir de los patrones de medida, y las correspondientes indicaciones con sus incertidumbres asociadas y, en una segunda etapa, utiliza esta información para establecer una relación que permita obtener un resultado de medida a partir de una indicación (NMX-Z-055-IMNC-2009, 2009).

## DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS

Medición: Proceso que consiste en obtener experimentalmente uno o varios valores que pueden atribuirse razonablemente a una magnitud (NMX-Z-055-IMNC-2009, 2009).

Erro normalizado: Es una técnica que se utiliza para comparar a laboratorios y su resultado emitido. Nace de la necesidad de tener confianza constante en el desempeño de los laboratorios. No sólo es esencial para estos y sus clientes sino también para otras partes interesadas (NMX-EC-17043-IMNC-2010, 2010).

$$E_n = \frac{x - X}{\sqrt{U_{lab}^2 + U_{ref}^2}}$$

Si

$|E_n| \leq 1.0$  indica desempeño “satisfactorio” y no genera señal.

$|E_n| > 1.0$  indica desempeño “insatisfactorio” y genera una señal de acción.

Intervalo de medida: conjunto de los valores de magnitudes de una misma naturaleza que un instrumento o sistema de medida dado puede medir con una incertidumbre instrumental especificada, en unas condiciones determinadas.

Repetibilidad: precisión de medida bajo un conjunto de condiciones de repetibilidad (NMX-Z-055-IMNC-2009, 2009).

Precisión: proximidad entre las indicaciones o los valores medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas (NMX-Z-055-IMNC-2009, 2009).

Error de medida: diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia (NMX-Z-055-IMNC-2009, 2009).

Dispositivo: pieza utilizada para realizar mediciones, solo o asociado a uno o varios dispositivos suplementarios (NMX-Z-055-IMNC-2009, 2009).

Sistema de medida: conjunto de uno o más instrumentos de medida y frecuentemente otros dispositivos incluyendo reactivos e insumos varios, ensamblados y adaptados para proporcionar valores medidos dentro de intervalos especificados para magnitudes de naturalezas dadas (NMX-Z-055-IMNC-2009, 2009).

Ley de Faraday: un campo magnético variable en el tiempo producía una corriente eléctrica, mientras que un campo estático no produce flujo de corriente, pero un campo con variación en el tiempo produce un voltaje inducido en un circuito cerrado, que da lugar a un flujo de corriente (Sadiku, 2005).

### **Ejemplo**

Cálculo de la sensibilidad y su incertidumbre para el acelerómetro bajo calibración modelo 4371 número de serie 31333 en el punto de 50 Hz.

DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

No. Ecuación	Ecuaciones	Resultado	Unidades
13	$S_2 = \frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}} S_1$	1,01	pC/ms <sup>-2</sup>
17	$u_{cS_2} = \sqrt{c_{\mu_1}^2 u(\mu_1)^2 + c_{\mu_2}^2 u(\mu_2)^2 + c_{S_{amp1}}^2 u(S_{amp1})^2 + c_{S_{amp2}}^2 u(S_{amp2})^2 + c_{S_1}^2 u(S_1)^2}$	Se desglosa abajo	0,48 % L
	$c_{(\mu_1)} = -\frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1^2 S_{amp2}} S_1$		-0,007 611
	$c_{(\mu_2)} = \frac{S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}} S_1$		0,009 441
	$c_{(S_{amp1})} = \frac{\mu_2}{\mu_1 S_{amp2}} S_1$		0,010 155
	$c_{(S_{amp2})} = -\frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}^2} S_1$		-0,101 453
	$c_{(S_1)} = \frac{\mu_2 S_{amp1}}{\mu_1 S_{amp2}}$		8,053 361
$u(\mu_1)$	$u(Cal) = \frac{U}{k}$	0,069 743	
	$u(Rep) = \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot t$		
	$u(Res) = \frac{a}{2\sqrt{3}}$		
$u(\mu_2)$	$u(Cal) = \frac{U}{k}$	0,055 644	
	$u(Rep) = \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot t$		
	$u(Res) = \frac{a}{2\sqrt{3}}$		
$u(S_{amp1})$	$u(Cal) = \frac{U}{k}$	0,049 920	
	$u(Res) = \frac{a}{2\sqrt{3}}$		
$u(S_{amp2})$	$u(Cal) = \frac{U}{k}$	0,004 997	
	$u(Res) = \frac{a}{2\sqrt{3}}$		
$u(S_1)$	$u(Cal) = \frac{U}{k}$	0,000 189	
*Repetibilidad del IBC BQ			0,000 049



DISEÑO, ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE DISPOSITIVO ALTERNATIVO PARA LA CALIBRACIÓN DE ACCELERÓMETROS

*Reproducibilidad del laboratorio BS	0,001 579
--------------------------------------	-----------

\*La contribución de repetibilidad y reproducibilidad son adicionales al modelo de incertidumbre. La contribución de repetibilidad es por mediciones repetidas durante la calibración. La contribución por reproducibilidad se calcula evaluando la variabilidad del laboratorio.