

Desarrollo de un Sistema Mecatrónico para Comparar y Calibrar Acelerómetros Triaxiales para un Laboratorio de Pruebas Dinámicas a Productos Espaciales

Development of a Mechatronic System to Compare and Calibrate Triaxial Accelerometers for a Laboratory of Dynamic Tests on Space Products

Helfry A. Betancourt R.

¹Resumen— El siguiente trabajo tiene por objeto desarrollar una plataforma para la comprobación y calibración de acelerómetros triaxiales para un laboratorio de pruebas dinámicas a productos espaciales, por el método de comparación basado en el estándar ISO 16063-21:2003, Ed. 1, Methods for the calibration of vibration and shock transducers -- Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer, desarrollando el equipo principal el excitador o sheker equipo mecánico y electrónico que permite la reproducción de una onda mecánica en frecuencia y amplitud conocidas, que sirven de base para la calibración de los acelerómetros en sus tres grados de libertad.

Palabras Claves—Acelerómetro, método por comparación, calibración, excitador.

Abstract. - The following work aims to develop a platform for the verification and calibration of triaxial accelerometers for a laboratory of dynamic tests to spatial products, by the method of comparison based on the standard ISO 16063-21: 2003, Ed. 1, Methods for the calibration of vibration and shock transducers - Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer, developing the main equipment the exciter or sheker mechanical and electronic equipment that allows the reproduction of a mechanical wave in known frequency and amplitude, which serve as a basis for the calibration of accelerometers in their three degrees of freedom.

Index Terms: Accelerometer, comparison method, calibration, exciter.

I. INTRODUCCIÓN

EL objetivo de este reporte es presentar el desarrollo de un sistema para la calibración de acelerómetros triaxiales, basado en el estándar ISO 16063-21:2003, Ed. 1, Methods for the calibration of vibration and shock transducers -- Part 21:

Vibration calibration by comparison to a reference transducer, en el desarrollo del excitador mecánico o sheker el cual permite inducir un movimiento dinámico que genera una aceleración para calibrar los acelerómetros en el país, disminuyendo la dependencia del exterior y abriendo la posibilidad de prestar servicios a otras entidades nacionales o internacionales, permitiendo el desarrollo de tecnología nacional apegada a estándares y certificaciones internacionales dándole la oportunidad al país de entrar en el mercado internacional con una competencia justa en la prestación de tales servicios.

II. CALIBRACIÓN DE ACELERÓMETROS POR COMPARACIÓN

Las calibraciones de estos acelerómetros se realizan en primer nivel con un equipo especializado de interferometría láser, con un costo elevado las calibraciones de segundo nivel se realizan por medio de la comparación entre un acelerómetro con calibración de primer nivel, esta son de menor costo y se realizan con equipos menos especializados a mayor cantidad de equipos por eso este método es el mayormente usado, los procedimientos y recomendaciones se encuentran normalizados por el estándar ISO 16063-21:2003, Ed. 1, Methods for the calibration of vibration and shock transducers -- Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer [1].

La calibración se realiza comparando un acelerómetro calibrado con el primer método por interferometría que es absoluta al cual se le adosa el segundo sensor a calibrar ambos son montados en un seque, mayormente electrodinámico que genera aceleraciones controlado por un generador de frecuencias senoidales, que luego son amplificadas en potencia e introducidas al excitador que las convierte en movimiento que al cambiar su velocidad genera la aceleración. La salida de los

Este trabajo fue presentado para su revisión en julio del 2016, en este momento se encuentra en la realización de actualización y mejoras, se espera que sea implementado y probado para su uso como calibrador y que dé pie a desarrollos de equipos más grandes para el desarrollo de Nanosat, actualmente el Autor

Helfry Betancourt, se encuentra Laborando para la Agencia Bolivariana para Actividades espaciales y se le puede contactar aparte del correo institucional por el correo helfryb@gmail.com.

sensores es transformada en corriente de acuerdo a la sensibilidad del acelerómetro esta corriente es acondicionada por un amplificador instrumental transformada a tensión para luego ser medida por un voltímetro simultáneamente a los dos sensores lo que permite que el operador realice un barrido de frecuencias de interés y comprobar que el sensor bajo prueba responde linealmente a la los voltajes generados por el sensor patrón.

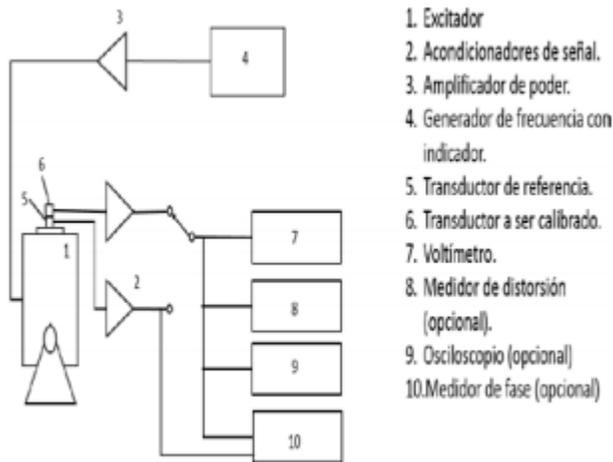


Fig. 1 diagrama del sistema de calibración por Comparación

A. NORMA ISO 16063-21:2003, ED. 1, Parte 21

Esta norma en su alcance describe la calibración rectilínea de transductores de vibración por comparación, también especifica los procedimientos de calibración por comparación entre un rango de frecuencias de 0,4 Hz a 10 KHz, así como sus condiciones ambientales de los laboratorios y los diferentes grados de incertidumbre para las mediciones.

Los estándares de referencia para esta norma son [1]:

- ISO 266, Acoustics — Preferred frequencies
- ISO 2041:1990, Vibration and shock — Vocabulary
- ISO 16063-1:1998, Methods for the calibration of vibration and shock transducers — Part 1: Basic concepts
- ISO 16063-11:1999, Methods for the calibration of vibration and shock transducers — Part 11: Primary
- Vibration calibration by laser interferometry
- Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, 1993).

Condiciones ambientales recomendadas por la norma en la realización de las calibraciones:

- Temperatura de la Sala (23 ± 10) °C
- Humedad relativa 75 % max. 90 % max.

B. Desarrollo de la Propuesta.

En la norma se muestra una serie de equipos necesarios para realizar esta calibración estos son:

- Excitador
- Acondicionadores de señal.
- Amplificador de poder.
- Generador de frecuencia con indicador.
- Transductor de referencia.
- Transductor a ser calibrado.
- Voltímetro.

- Medidor de distorsión (opcional).
- Osciloscopio (opcional)
- Medidor de fase (opcional)

De estos equipos, el laboratorio dispone de la mayoría como son los voltímetros y los acondicionadores de señal, lo que se traduce que para implementar la calibración de los acelerones se necesita de un excitador como equipo de mayor dificultad de obtención por lo que en un primer paso, se desarrolla el excitador.

C. Sheker o Excitador

Este equipo especializado basa su funcionamiento en un motor electrodinámico muy similar a un parlante electrodinámico, la diferencia esencial es que este no posee un cono para generar los cambios de presión que se traducen en sonidos sino que posee un cilindro metálico que transfiere el movimiento a una base, donde se colocan los acelerómetros, limitando su movimiento por un anillo que restringe el movimiento axial con un solo grado de libertad.

Por ser un motor electrodinámico lo rige el mismo principio mecánico y eléctrico de un parlante, para el desarrollo del dispositivo se realizó una analogía entre las variables de estado presentes en los sistemas mecánicos, y los sistemas eléctricos, consiguiendo a su vez equivalencia entre elementos mecánicos y elementos eléctricos.

TABLA I
VARIABLE DE ESTADO [2]

Tipo de Analogía	Sistema eléctrico	Sistema mecánico
Impedancia	Caída de tensión e(t)	Fuerza f(t)
	Flujo de corriente i(t)	Velocidad u(t)
Movilidad	Caída de tensión e(t)	Velocidad u(t)
	Flujo de corriente i(t)	Fuerza f(t)

Un motor electrodinámico lo comprende un imán fijo mayormente de ferrita y una bobina móvil que por efecto de la ley de Lenz, transforma los cambios de corriente en la bobina en movimiento.

De estas variables de estado se desarrolla un modelo eléctrico que simula el motor electrodinámico con el fin de diseñar el equipo, con lo que podemos dividir el equipo en dos partes evidentes la parte eléctrica que está definida por la ley de Ohm [3]:

$$U \rightarrow I \rightarrow Z \quad (1)$$

Y de forma general para todo tipo de onda utilizando la transformada de Laplace [3]:

$$U_{(s)} / I_{(s)} = Z_{(s)} \quad (2)$$

Donde la potencia eléctrica viene dada por:

$$P = V^2 / Z \quad (3)$$

y una parte mecánica donde la fuerza desarrollada por el motor electrostático B l es un parámetro definido como la integral de la densidad de flujo B en función de la longitud del hilo de la bobina que depende directamente de la posición de la bobina dentro del entre hierro formado por el imán la base y su tapa.

De donde la fuerza mecánica será [4]:

$$F = B l(x) i \quad (4)$$

Esta fuerza en función de la posición de la bobina dentro del campo magnético fijo.

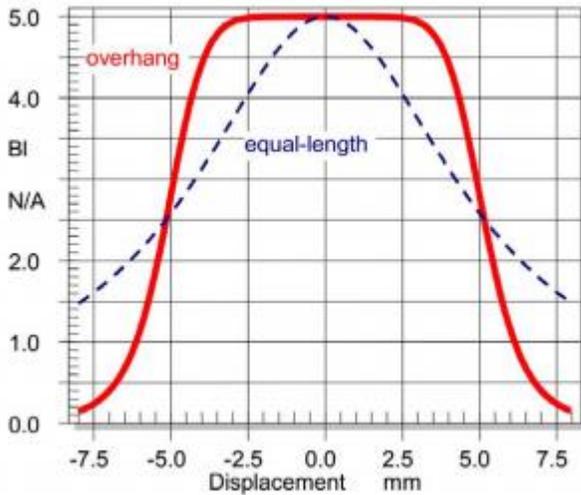


Fig. 1 valor TÍPICO del valor BL con respecto al desplazamiento [4]

Esta fuerza debe ser mayor a la fuerza de reposición mecánica del motor que ejercen los resortes recuperadores de la posición inicial [4].

$$F_s = K(x)x \quad (5)$$

Donde k es el coeficiente elástico del resorte. Este modelo eléctrico es el siguiente:

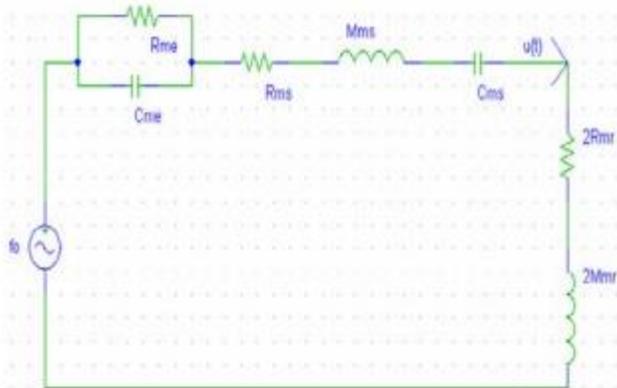


Fig. 2 Modelo eléctrico del motor electrodinámico [3]

De estas variables de estado se definen las ecuaciones que rigen el motor electrodinámico.

$$V_a(t) = L \frac{di(t)}{dt} + e_{bobina} \quad (6)$$

$$F(t) = B \cdot l \cdot i(t) \quad (7)$$

$$e_{bobina} = B \cdot l \cdot \frac{dx(t)}{dt} \quad (8)$$

$$F(t) = M \frac{d^2x(t)}{dt^2} + b \frac{dx(t)}{dt} \quad (9)$$

Donde $V_a(t)$ es la fuerza electromotriz (tensión aplicada a la bobina del motor), $i(t)$ es la corriente que circula por la bobina del motor, $F(t)$ es la fuerza de origen electromagnético ejercida sobre el pestillo, $e_{bobina}(t)$ es la fuerza contra electromotriz, y $x(t)$ es el desplazamiento del pestillo del motor electrodinámico. Considerando que la entrada es la tensión $V_a(t)$ y la salida el desplazamiento de la membrana del altavoz $x(t)$.

Fijando como potencia de entrada de 100W, sobre una bobina

de 8Ω en un rango de frecuencia de 500Hz a 1500Hz, un magneto fijo de 0,5T, L 100mH, calculamos los parámetros del motor electrodinámico:

$$V_{rms} \approx 28,3 \text{ v}$$

$$I_{rms} \approx 3,5 \text{ A}$$

Fuerza mecánica máxima del motor a con una señal sinodal de corriente a $\pi\pi \diamond 2$ con un valor pico de $3,5A * \sqrt{2}$

$$F \approx 3,087N$$

Considerando que la media de peso de los acelerómetros

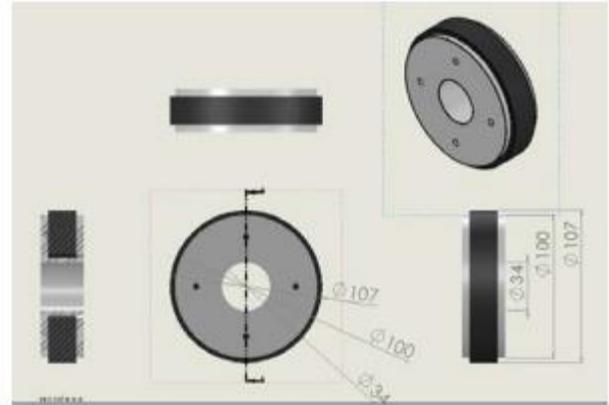


Fig. 3 Imán y base del motor Electrodinámico

comerciales es de 6gramos Comerciales es de 6 gramos encontramos que el motor electrodinámico esta sobre dimensionado para permitir el efectivo movimiento sobre los

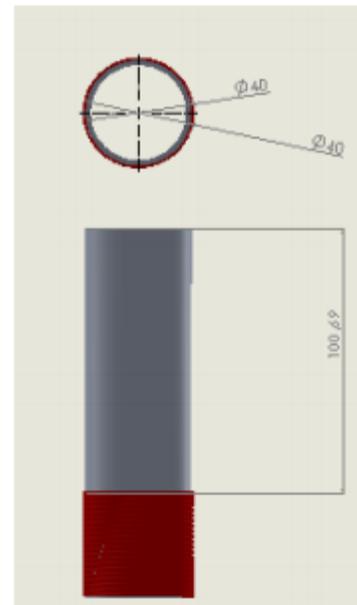


Fig. 4 Pestillo acelerómetros.

De esta manera diseñamos el motor electrodinámico del equipo con las siguientes medidas basados en las dimensiones del imán fijo que se una como base:

Dentro de este campo magnético fijo se mueve el pistilo que es la pieza donde se encuentra la bobina que por diseño referido tiene una inductancia de 100mH y cuya medidas son:

D. Funcionamiento

El motor electrodinámico consta de un campo magnético fijo generado por un circuito magnético basado en un imán permanece de material de ferrita dura que genera un campo de

0,5T donde se mueve una bobina de 8Ω y potencia de 100W estos se encuentran centrados por un mecanismo llamado araña

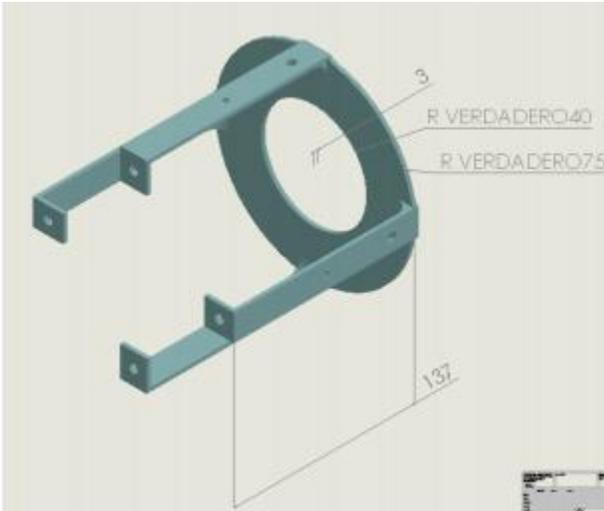


Fig. 5 Base araña que permite que la bobina vuelva a su punto central de forma mecánica por medio de resortes dispuestos para ello.

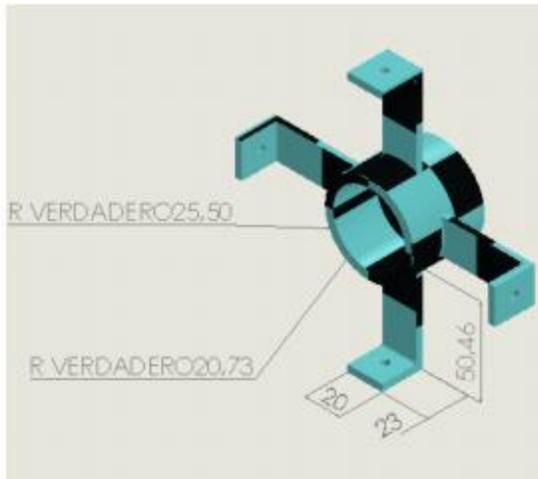


Fig. 6 Anillo de soporte

Como dice en el párrafo anterior el dispositivo llamado araña permite el correcto centrado del pestillo dentro del imán esta es



Fig. 7 Equipo terminado y ensamblado

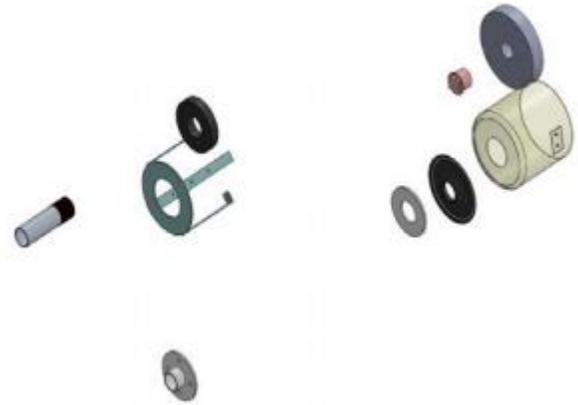


Fig. 8 Despiece del equipo

formada por 4 resortes que se vencen con una fuerza axial de 0,5N, que se encuentran enclávalos mecánicamente entre una base y el pestillo.

Dentro de esta araña se encuentra un anillo que da refuerzo a la estructura y restringe el movimiento de pestillo.

Estas son las piezas principales del equipo el cual montado queda de la siguiente manera:

E. *Calculo de la sencitividad segun el estandar iso 16063-21:2003, ed. 1, parte 21*

Para la calibración de por comparación que será la aplicada en este trabajo usamos el estándar: ISO 16063-21:2003, Ed. 1, Methods for the calibration of vibration and shock transducers -- Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transduce

Que nos entrega la fórmula para calcular la sencitividad del sensor bajo ensayo por dada por el montaje de la prueba:

$$S_{uut} = S_{ref} \times (G_{ref} \times V_{uut}) / (G_{uut} \times V_{ref})$$

De donde:

S_{uut} = sencitividad del sensor bajo prueba.

S_{ref} = sencitividad del sensor de referencia.

$$S_{uut} = S_{ref} \times (G_{ref} \times V_{uut}) / (G_{uut} \times V_{ref})$$

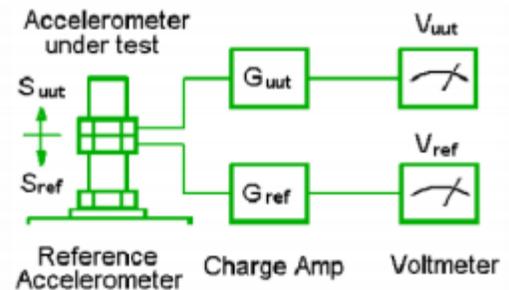


Fig. 9 Cálculo de sensibilidad [1]

G_{ref} = Ganancia del acondicionador de señales del sensor de referencia.

V_{uut} = Voltaje medido del sensor bajo prueba a la frecuencia especificada por el excitador

G_{uut} = Ganancia del acondicionador de señales del sensor bajo prueba.

V_{ref} = Voltaje medido del sensor de referencia bajo prueba

En la siguiente tabla se muestra las frecuencias usadas para la

TABLA II
FRECUENCIAS ISO 266

Frecuencia central Hz
31.5
40.0
50.0
63.0
80.0
100.0
125.0
160.0
200.0
250.0
315.0
400.0
500.0
630.0
800.0
1000.0
1250.0
1600.0
2000.0
2500.0
3150.0
4000.0
5000.0
6300.0
8000.0
10000.0

calibración de los acelerómetros según el estándar ISO 266 colocadas a un tercio de estándar aunque no son mandatorios se sugiere solo que las aceleraciones de resultante sean múltiplos de 10.

III. CONCLUSIONES

El objetivo fundamental de este documento ha sido presentar un diseño de un equipo excitador para la calibración de acelerómetros triaxiales basados en el estándar ISO 16063-21:2003, ED. 1, PARTE 21, el cual muestra y especifica los parámetros necesarios para este tipo de calibración.

Esta implementación fue pensada para utilizar la mayoría de equipos que se encuentran en existencia en el laboratorio de pruebas Dinámicas disminuyendo así la necesidad de inversión en equipos nuevos.

Una vez estudiado las la situación inicial dela problemática se evidencio que era de necesidad realizarla propuesta, los que nos llevó a delimitar el proyecto y reducirla a la implementación en el diseño del equipo principal del sistema de calibración por comparación de los acelerómetros triaxiales.

Podemos decir que con la fabricación de este equipo y la certificación de la propuesta, se podrá dar respuesta al laboratorio de pruebas dinámicas en cuanto a la calibración de los acelerómetros triaxiales, cuya inversión en dichos estudio y fabricación se verá recuperada en muy poco tiempo, no solo en divisas sino por la inmediatez del servicio con el plus de poder ofrecer este servicio a instituciones similares de la región.

REFERENCIAS

- [1] ISO 16063-21, Ed. 1, "ISO 16063-21:200 Methods for the calibration of vibration and shock transducers -- Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer," 2003.

- [2] V. G. BLASCO, «MODELADO ELÉCTRICO DE UN SISTEMA DE ALTA VOZ,» UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS, Madrid, 2007.
- [3] W. Klippel, «Las no linealidades de los altavoces – Causas, parámetros y Síntomas,» Dresden, Alemania, 2007.
- [4] B. Pueo Ortega. M.Romá Romero, «Electroacústica. Altavoces y micrófonos,» Pearson Prentice Hall, 2003.
- [5] Bruël & Kjaer, «Vibration Calibration Technique and basics of Vibration Measurement, » September, Singapore, 2011.



Helfry Betancourt Rosendo, Capitán de Corbeta de la Armada Bolivariana, Ingeniero en Telecomunicaciones egresado de la Universidad José Antonio Páez, con diplomados en Meca trónica y Control Electrónico Industrial. Trabajó en la Aviación Naval Venezolana en el Laboratorio de Electrónica ,instrumentación y servo mecanismos, actualmente se desempeña como Ingeniero en el diseño ensamblaje y pruebas de satélites en el Centro de Investigaciones Espaciales CIDE en el laboratorio de pruebas Acústicas perteneciente a la Agencia Bolivariana para actividades espaciales, para más información sobre otros temas escriba a hbetancourt@abae.gob.ve, helfryb@gmail.com