

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS DE VIBRACIONES PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PICOSATELITE HEXASAT DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN ESPACIAL, CIE, DE LA ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

Marco Antonio González Silva
Carrera de Ingeniería Mecánica
ESPE
Sangolquí, Ecuador
marcogs16@hotmail.com

Francisco Javier Paredes Mera
Carrera de Ingeniería Mecánica
ESPE
Sangolquí, Ecuador
frank.1989.jp@gmail.com

RESUMEN – La Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE ha puesto en marcha el programa Geoespacial cuyo objetivo actual es la investigación y desarrollo de picosatélites de autoría ecuatoriana. Se han desarrollado hasta el momento tres proyectos. Los dos primeros consistieron en la fabricación de un prototipo estructural de un picosatélite tipo “CubeSat”, tomando en cuenta fundamentos de diseño y simulaciones con software computacional, fabricación y conducción de pruebas y ensayos mecánicos. El tercer proyecto aportó con la fabricación de un nuevo prototipo de picosatélite llamado “HexaSat”. En la etapa de pruebas se simulan las condiciones a las que se exponen los picosatélites durante el lanzamiento y puesta en órbita. En este sentido, el presente proyecto fue orientado a la construcción de un banco de vibraciones para la conducción de pruebas experimentales con el picosatélite. En estas pruebas se verificó si o no los satélites miniaturizados, resisten las vibraciones recreadas de los dos escenarios críticos antes mencionados. Los resultados de las pruebas indican que los prototipos no cumplen con la norma ECSS, aunque la aprobación de los mismos, dependerá de la autoridad encargada del lanzamiento de los picosatélites.

Palabras claves – programa geoespacial; picosatélite; HexaSat; pruebas experimentales; banco de vibraciones

ABSTRACT - The Army Forces University ESPE has stated a Geospatial Program through the performance of research and development of Ecuadorian picosatellites. To this point, there have been developed three projects. The first two were related to the manufacturing of a structural picosatellite prototype named "CubeSat". Those projects dealt with fundamentals of design and computer software simulations, fabrication and performing mechanical tests and experiments. The third project incorporated the manufacture of a new picosatellite prototype called "HexaSat". In the testing and experimental stage, conditions at which the picosatellites will be exposed during the launching and in orbit are simulated. In this sense, this project was aimed to the construction of equipment that develops vibrations in order to conduct experimental tests with the picosatellite. Throughout the tests, it was verified whether or not the miniaturized satellites withstand the recreated vibrations for the two aforementioned critical scenarios. Results show that test results indicate the prototypes do not meet the ECSS standard, although the final approval will depend on the launching authority of the picosatellites.

Keywords – Geospatial program; picosatellite; HexaSat; experimental evidence; equipment for vibrations

I. INTRODUCCIÓN

Los picosatélites son satélites miniaturizados destinados a la investigación espacial, con fines científicos, educativos y de innovación y desarrollo tecnológico, que reflejan diferentes características en su forma y construcción, permitiendo desarrollar un producto estructural de diseño simplificado y bajo costo.

La reducción en aspectos fundamentales de peso y tamaño en los picosatélites son de suma importancia, debido a que la masa de un satélite es directamente proporcional al costo de lanzamiento.

Durante la fase de lanzamiento tenemos aceleraciones y vibraciones mecánicas que actúan de manera severa en la estructura de un picosatélite, por lo que el material de éste debe soportar y amortiguar las vibraciones.

Los materiales utilizados con mayor frecuencia, por su baja densidad y alta resistencia son: aluminio y sus aleaciones, magnesio, berilio, titanio, fibras de kevlar y materiales compuestos.

El desarrollo del proyecto anterior consistió en el diseño, fabricación y pruebas de un prototipo estructural de un picosatélite, de autoría ecuatoriana, tipo HexaSat (fig. 1); utilizando consideraciones estructurales como condiciones extremas a las que el prototipo será sometido.

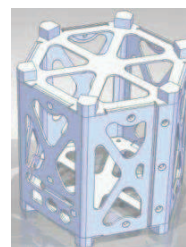


Figura 1. Prototipo estructural HexaSat

Se construyó un total de seis prototipos, mediante el proceso de electro-erosión CNC por hilo de tungsteno cuyo material principal fue el aluminio 1050, espesor 1.2 mm, con

un peso promedio aproximado de 0.162 kg; realizando en estos picosatélites ensayos estáticos, de fatiga y térmicos con cargas críticas hasta la falla [1].

Para la realización de ensayos vibratorios en picosatélites, los bancos de vibraciones son necesarios para simular las condiciones a las que serán sometidos estos prototipos. Existen diferentes alternativas de diseño y construcción de bancos de pruebas de mencionadas en la tabla 1:

Tabla 1. Características de distintos bancos de vibraciones

Tipo de banco de vibración	Frecuencia (Hertz)	Máxima Velocidad (cm/s)	Máxima Aceleración (g)	Máxima Fuerza (N)
Hidráulico	0.1-500	125	20	450000
Inercial	2-50	125	20	4500
Electromagnético	2-10000	125	100	2000

Para la construcción del banco de vibraciones, se tomará en cuenta el rango de frecuencias de operación, el cual será de 20 a 2000 Hertz [2].

El banco de vibraciones electromagnético, es el más empleado en los ensayos dinámicos, debido al amplio rango de frecuencias que puede excitar. Este mecanismo utiliza un agitador electrodinámico, también conocido como excitador electromagnético (fig. 2).

Cuando pasa corriente a través de una bobina colocada en un campo magnético, se produce una fuerza F (Newtons) proporcional a la corriente i (Amperios) y la intensidad de flujo magnético B (Teslas, kilogramo.segundo⁻².Amperio⁻¹), la cual acelera el componente colocado en el plato vibratorio.

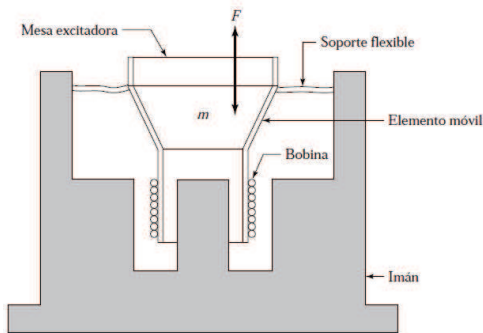


Figura 2. Esquema de un excitador electromagnético [3].

El excitador electromagnético aprovecha el campo magnético creado mediante un electroimán o un imán permanente para generar vibración, al hacer pasar una corriente eléctrica por una bobina situada en medio del campo magnético.

II. METODOLOGÍA

A. Cálculo de la fuerza electromagnética

Para el cálculo de la fuerza electromagnética, se debe conocer el peso que se va a levantar. El picosatélite a ensayarse, se sabe que tiene un peso no mayor a 1 kg [4]; por lo que se diseñará un banco que levante objetos de hasta 10 kg, con el propósito de levantar el peso adicional que puedan tener los picosatélites y para usar el banco en pruebas con objetos más pesados y que cumplan con el propósito

$$F_e = B * l * \eta * i \quad (1)$$

La ecuación (1) corresponde a la fuerza electromagnética, en la cual B , es la intensidad del campo magnético generado por imanes permanentes de Neodimio (1,17 Teslas); l , es el perímetro de la bobina (0.48 metros); η , es el número de vueltas de la bobina (125); i , es la corriente (1.5 Amperios); obteniendo una fuerza electromagnética de 90 N.

B. Simulación y análisis del banco de vibraciones

Con el software ANSYS se realiza el análisis armónico del banco de pruebas de vibraciones, para determinar las aceleraciones, velocidades y desplazamientos generados por la fuerza electromagnética, así como para encontrar la frecuencia natural del sistema y los esfuerzos generados.

Se debe tener en cuenta los valores de frecuencia de vibración estipulados anteriormente para este banco. El agitador va a realizar una prueba de vibración randómica (random vibration).

El sólido en 3D (fig. 3), se lo genera con el software Autodesk Inventor, para posteriormente exportarlo al programa ANSYS.

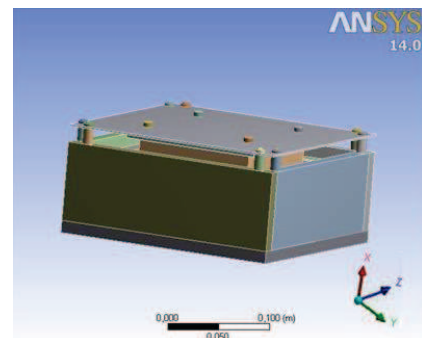


Figura 3. Geometría del sólido

Para realizar el análisis armónico por medio de elementos finitos con la ayuda del software ANSYS, se determina el dominio a analizar, en este caso la región más crítica del

banco, el plato vibratorio. La discretización del dominio se muestra en la fig. 4.

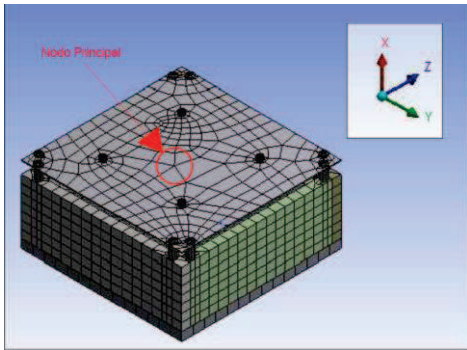


Figura 4. Discretización del banco de vibraciones

Se considera para el análisis armónico, que la placa vibra en un solo grado de libertad y con una fuerza externa ejercida por el campo magnético; la ecuación que rige este movimiento será:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (2)$$

Donde M viene dado por las propiedades de la masa del material, C por el factor de amortiguamiento, K por la constante de rigidez, F por la fuerza externa que es inducida por la bobina.

Donde tenemos que la matriz de rigidez es:

$$[K_c]\{x_c\} = \{F_c\}$$

Las condiciones de borde están dadas para los extremos y centro de la placa.

En los extremos no hay desplazamiento, por lo que la placa estará en reposo respecto al centro, es decir

$$x = \dot{x} = \ddot{x} = 0. \quad (3)$$

En el nodo principal, ubicado en el centro, se tiene una fuerza de 90 N, y un rango de frecuencia de 20 a 2000 Hertz.

Para encontrar la frecuencia natural del sistema se emplea la gráfica amplitud-frecuencia (fig. 5), en la cual se tiene que la frecuencia natural de banco de vibraciones es de 812 Hertz.

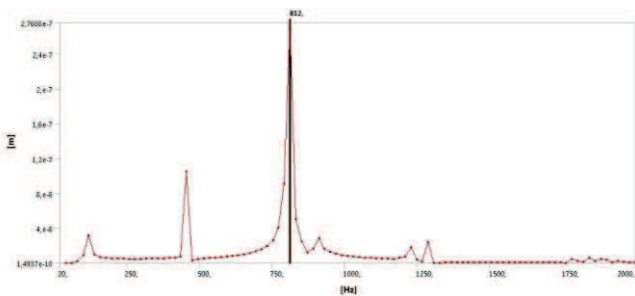


Figura 5. Gráfica Amplitud vs Frecuencia

El esfuerzo máximo (σ) es de $2,68 \times 10^8$ Pa en su punto más crítico, cuando se trabaja en 812 Hz, la frecuencia a la que entra en resonancia, como se muestra en la fig. 6.

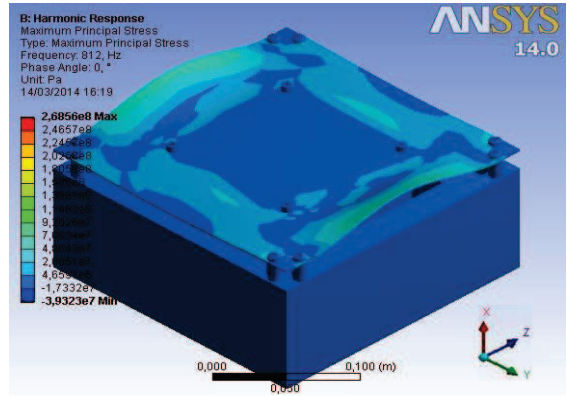


Figura 6. Esfuerzo principal máximo en el banco

Al ser el plato vibratorio el elemento más crítico del banco por ser el elemento móvil del sistema, se tiene distintos desplazamientos para diferentes frecuencias como se observa en la tabla 2.

Tabla 2. Flexión del plato vibratorio para diferentes frecuencias

δ (metros)	Frecuencia (Hertz)
2,16E-05	200
1,20E-05	400
2,41E-05	600
9,31E-04	812
4,52E-05	1000
1,57E-05	1200
8,87E-06	1400
7,69E-06	1600

La flexión máxima del plato vibratorio ocurre a 812 Hz (frecuencia natural) y es de $9,31 \times 10^{-4}$ metros (fig. 7).

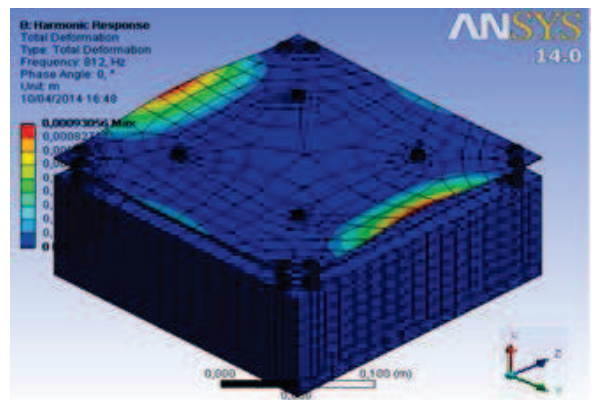


Figura 7. Flexión del plato vibratorio con el software ANSYS

C. Especificaciones de diseño

Tabla 3. Especificaciones de diseño del banco de vibraciones

SUBSISTEMA	CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES	MATERIALES	GRÁFICO
Electromagnético	Fuerza electromagnética de 9 Kg. Imán de Neodimio de flujo magnético mínimo de 1 Tesla.	Acero, duralón, cobre y neodimio	
Amplificación	Oscilaciones entre 20 y 2000 Hz	Amplificador operacional, Micro-controlador	
Etapas de Potencia	Se necesita que resistan unos 450 Watts	Transistores	
Fuente de Poder	Dos fuentes una de 46 VAC y otra de 12 VDC	Transformador	
Acelerómetro	Rango de medida de 0 a 2 gravedades	Acelerómetro	

D. Construcción

Al culminar las etapas de simulación y especificaciones de diseño se procede a la construcción del banco de vibraciones con los elementos seleccionados, con los distintos procesos de fabricación que intervienen como torneado, fresado, perforado, roscado, empernado, soldado, etc. Posteriormente se realiza el ensamblaje del banco con todos sus elementos mecánicos y electrónicos.

E. Pruebas de vibración

Una vez concluida la construcción del banco de vibraciones y realizadas las pruebas de conformidad del equipo, se procede a realizar los ensayos con el picosatélite HexaSat, sujetando el prototipo, en la posición que se desee analizar (ejes ortogonales), en el plato vibratorio y encendiendo el banco.

La prueba a realizar es una vibración aleatoria (random vibration), para posteriormente, de acuerdo al análisis de resultados, validar el picosatélite de acuerdo a la norma ECSS (European Cooperation for Space Standardization), que se muestran en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Tolerancias permitidas [2]

Test Parameters	Tolerances
6. Random vibration	
Amplitude (PSD, frequency resolution better than 10Hz)	
20 Hz – 1000 Hz	-1 dB / +3 dB
1000 Hz – 2000 Hz	±3 dB
Random overall g.r.m.s	±10 %

Tabla 5. Niveles de prueba de calificación y duración [2]

N°	Test	Levels	Duration	Number of applications
5	Random vibration	Maximum expected spectrum +3 dB on PSD values	1 minute	On each of 3 orthogonal axes
If margins higher than 3 dB are specified by the Launcher Authority, they apply.				

III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las pruebas realizadas en el picosatélite HexaSat, nos muestran los siguientes datos obtenidos por el acelerómetro en la fig. 8.

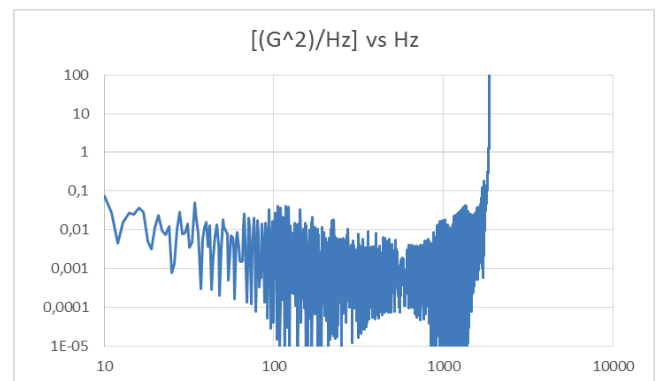


Figura 8. Gráfica (G^2 /Hertz) vs Hertz

Al analizar los datos obtenidos se procede a realizar la tabla 6, la cual permitirá validar el picosatélite.

Tabla 6. Resultados del picosatélite HexaSat

FREQ (Hz)	ASD (G ² /Hz)	dB	OCT	dB/OCT	AREA	Grms
20,00	0,0100	*	*	*	*	*
100,00	0,0500	6,99	2,32	3,01	2,40	1,55
800,00	0,0500	0,00	3,00	0,00	37,40	6,12
2000,00	0,0100	-6,99	1,32	-5,29	63,84	7,99

Con los datos obtenidos, se procede a realizar la gráfica random vibration [5] del picosatélite, como se muestra en la figura 9.

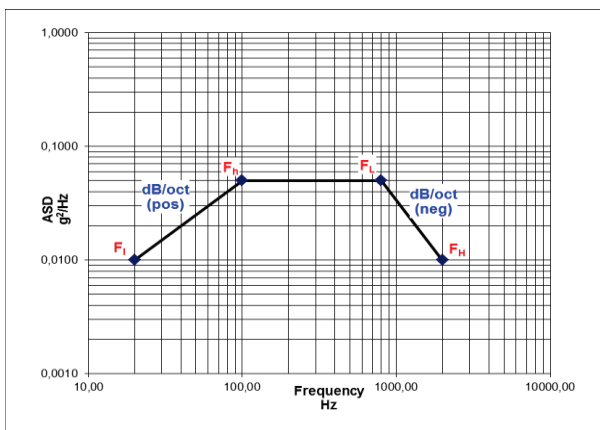


Figura 9. Gráfica Random Vibration del picosatélite HexaSat

IV. CONCLUSIONES

- Al comparar las especificaciones de la ECSS con los resultados obtenidos en la Random Vibration, se obtiene que el picosatélite HexaSat no cumple con la norma, puesto que se estipula que se debe tener valores comprendidos entre 3 y -3 dB y los resultados obtenidos son de 6 y -6 dB, aunque la aprobación dependerá de la autoridad encargada del lanzamiento del picosatélite.
- Se diseñó un banco que alcanza una fuerza electromagnética de 90 N, lo cual es suficiente para trabajar con los picosatélites HexaSat de entre 0,1 y 1 kg de peso.
- La frecuencia natural del banco de vibraciones es de 812 Hertz, obtenida en el software ANSYS y se observa que la amplitud va aumentando hasta llegar a la frecuencia natural y luego vuelve a disminuir.
- El elemento más crítico analizado es el pato vibratorio, ya que al ser el elemento móvil se encuentra sujeto a los desplazamientos más amplios y riesgosos, como resultado se obtiene una amplitud de $9,31 \times 10^{-4}$ metros a la frecuencia natural.

V. REFERENCIAS

- [1] Báez, A., & Rodríguez, O. (Junio de 2013). *Repositorio Digital ESPE*. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/6830/1/T-ESPE-047221.pdf>
- [2] ECSS, E. S. (Junio de 2012). *The European Cooperation for Space Standardization, ECSS*. Obtenido de ECSS: <http://www.ecss.nl/>.
- [3] Rao, S. S. (2012). *Vibraciones Mecánicas*. México: Pearson Educación, Prentice Hall.
- [4] ITU, Unión Internacional de Telecomunicaciones (2012). *Reglamento de Radiocomunicaciones, Resoluciones y Recomendaciones*. Ginebra, Suiza: ITU. Obtenido de <http://picosatellites1.blogspot.com/>
- [5] NASA, R. S. (2009). *FEMCI NASA The Book*. Obtenido de Finite Element Modeling Continuous Improvement: <http://femci.gsfc.nasa.gov/femcibook.html>
- [6] Reitz, Milford, & Christy. (1996). *Fundamentos de la Teoría Electromagnética*. EUA: Addison-Wesley Iberoamericana S.A., Cuarta Edición
- [7] Smallwood, D. O., Harris, C. M., & Piersol, A. G. (2002). *Harris' Shock and Vibration Handbook*. McGraw-Hill Companies, Quinta Edición.