

## DISEÑO ÓPTIMO DE ESTRUCTURAS SATELITALES

**Camacho-Martínez. Fernando<sup>1\*</sup>, Velázquez-Villegas. Fernando<sup>2</sup>**

1: Programa de maestría y doctorado en Ingeniería  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)  
Ciudad Universitaria, C.P. 4500, México D.F:  
e-mail: fernando\_camachomt@comunidad.unam.mx

2: Centro de Alta Tecnología  
Facultad de Ingeniería  
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)  
Ciudad Universitaria, C.P. 4500, México D.F:  
e-mail: fernvel@unam.mx

**Palabras clave:** Optimización estructural, CubeSat, Estructuras, Satélites

**Resumen:** *En este trabajo se describe el diseño de la estructura principal (chasis) de un satélite de propósito específico con base en resultados optimización estructural topológica. El objetivo es reducir la masa de la estructura considerando como función objetivo del método de optimización que el valor para la frecuencia de los primeros modos de vibración sea máxima. Como segundo objetivo se planteó la simplicidad de fabricación de la estructura, para lo cual se utilizó como ejemplo el diseño de un CubeSat cuyas características principales son sus dimensiones de 100x100x100 mm y un peso total no mayor a un 1.3 kg que contempla la estructura principal, la carga útil y todos los componentes que se utilicen para su construcción.*

### 1. INTRODUCCIÓN

Recientemente la industria espacial ha presentado un crecimiento importante, involucrando cada vez a un número mayor de investigadores y académicos a los retos que se enfrentan en la búsqueda del conocimiento y la comprensión del espacio exterior.

Esto se ha reflejado en mejoras a todo tipo de dispositivos como sistemas de control, vehículos de transporte y vigilancia entre otros, que son propuestas de corporativos privados e instituciones educativas, éstas últimas se han enfocado a la creación y desarrollo satélites tomando como plataforma principal los CubeSat que dadas sus características estructurales, dimensionales y su bajo costo en comparación con otros satélites de mayor magnitud, presentan una gran oportunidad para la innovación y la generación de conocimiento.

Los CubeSat según las regulaciones del Cal Poly, deben contar con dimensiones de 10x10x10

[cm] y una masa no mayor a 1.3 [kg], tales requerimientos limitan de manera directa la misión para la que son diseñados y esto se debe a que necesitan acoplarse con la unidad P-POD (Poly Picosatellite Orbital Deployer) que se utiliza para su lanzamiento (Figura 1) [1].

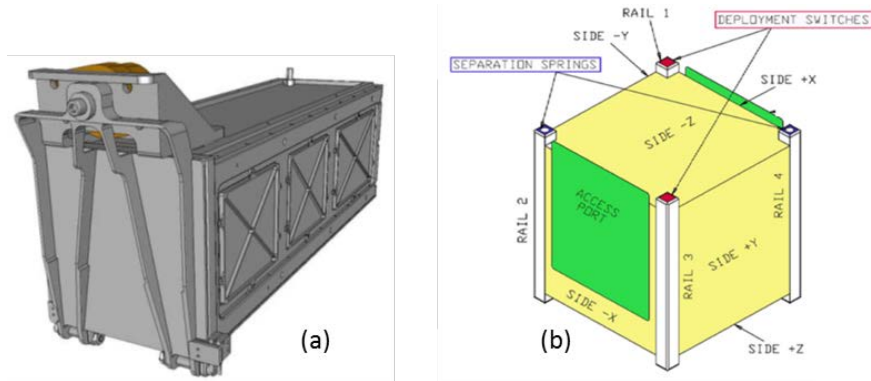


Figura 1. (a) P-POD (Poly Picosatellite Orbital Deployer) diseñado por el Cal Poly. (b) Esquema general del CubeSat del Cal Poly [1].

En la actualidad existen corporativos dedicados al desarrollo de dispositivos CubeSat los cuales cuentan con un catálogo de componentes comerciales utilizados en diversos tipos de misiones espaciales, siendo las categorías generales; la estructura principal estándar (chasis), la electrónica y el software, sin embargo, si se desea también es posible diseñar misiones con instrumentación propia o implementar algún experimento en el que se utilice otro tipo de carga útil con la única condición de que se adecue a la estructura principal comercial. Por esta razón es importante desarrollar la capacidad de diseñar una estructura principal propia de la que se pueda obtener el mejor desempeño posible para cada misión.

El diseño de la estructura en este trabajo se obtiene a partir de los resultados del proceso de optimización estructural topológica en el que se incrementó el valor para la frecuencia del primer modo de vibración utilizando una restricción de masa del 30 %. Estos resultados se utilizaron como punto de partida para realizar un diseño más ligero de la estructura en comparación con la de los modelos comerciales y que tenga un funcionamiento adecuado tomando en cuenta las solicitaciones que debe soportar durante una misión espacial.

## 1. PROCESO DE DISEÑO

Partiendo de los requerimientos antes mencionados para que un Cubesat pueda ser lanzado por el P-POD, el espacio de diseño se limita a un primer prototipo o diseño inicial de geometría cúbica de 10 [cm] de longitud en cada eje, el cual se conforma del ensamble de 6 placas con 1.7 [mm] de espesor de las cuales destacan sólo los orificios contemplados para cada unión atornillada en el modelo CAD (Figura 2).

Estos puntos de unión cumplen dos funciones; la primera es la unión entre las placas del prototipo para formar la estructura cúbica y la segunda es la unión de la carga útil con la estructura.

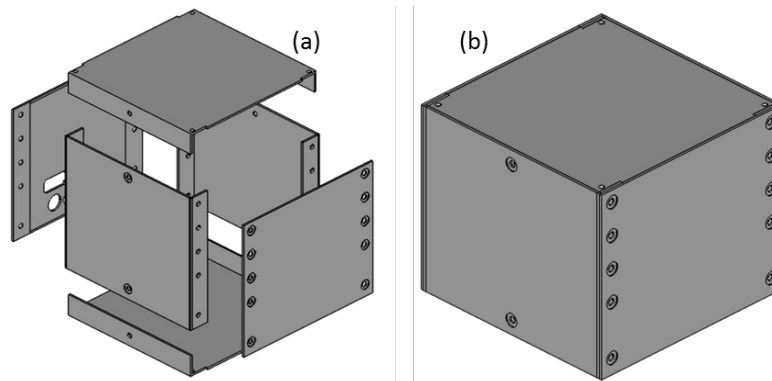


Figura 2. Modelo en CAD del diseño inicial de la estructura; (a) Vista de las 6 placas que componen la estructura inicial. (b) Vista de la Estructura inicial ensamblada.

## 2. ANÁLISIS MODAL

El análisis modal permite obtener las frecuencias y los modos propios de vibración de una estructura en un régimen determinado; de los resultados de este análisis podemos conocer la interacción de todos los componentes del CubeSat para cada uno de los modos de vibración encontrados. En este caso el régimen de vibraciones comprende de 20 a 2000 [Hz] [1] que son las frecuencias de vibración que se presentan desde el arranque del sistema de propulsión hasta que el medio de transporte se encuentra fuera de la atmósfera terrestre.

### 2.1 Resultados del análisis modal

Del análisis modal se obtuvieron los valores de frecuencia para los primeros modos de vibración, los cuales son los siguientes:

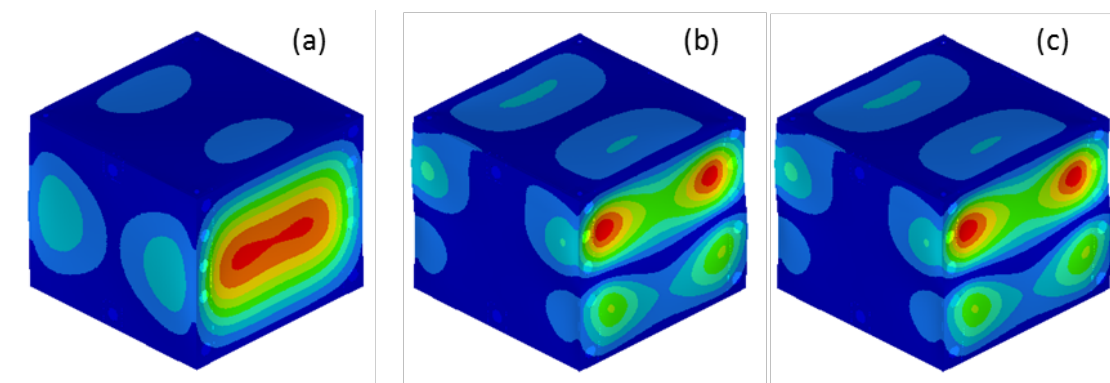


Figura 3. Resultados del análisis modal para el diseño inicial. (a) Modo 1, (b) Modo 2, (c) Modo 3.

Modos	Frecuencia [Hz]	Masa [kg]
(a) Modo 1	33.58	0.179
(b) Modo 2	57.47	
(c) Modo 3	75.41	

Tabla 1. Valor de frecuencia para los primeros tres modos de vibración y el valor de la masa para la estructura inicial.

### 3. OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL TOPOLÓGICA

La aplicación de la optimización estructural topológica tiene como función objetivo maximizar el valor de la frecuencia en la que se presenta el primer modo de vibración y por consiguiente el de los modos posteriores, las variables de diseño serán entonces las propiedades del material y se utilizará una restricción de máximo porcentaje de masa.

La optimización topológica se realizó para una restricción de masa del 30% de la masa total del prototipo inicial, de los cuales se obtienen resultados de densidad que se interpretan mediante una escala RGB normalizada con valores de 0 a 1 en la que los elementos que se muestran en rojo son aquellos que poseen un valor de densidad igual a 1 y los que se muestran en azul son aquellos con un valor igual a cero (Figura 4).

### 4. PROPUESTA DE REDISEÑO DE LA ESTRUCTURA

Los resultados de densidad se utilizaron como punto de partida para el rediseño de la estructura, la optimización topológica mostro que un mayor porcentaje de los elementos contaba con un valor de densidad de 0.5, además la concentración de estos elementos en algunas regiones permitió definir geometrías para el nuevo diseño.

Es Importante mencionar que la interpretación de los resultados y el rediseño de la estructura dependen en gran medida del diseñador, que basado en sus conocimientos y la experiencia obtenida decidirá las especificaciones finales de esta. De tal manera que el diseño de la nueva estructura es la siguiente:

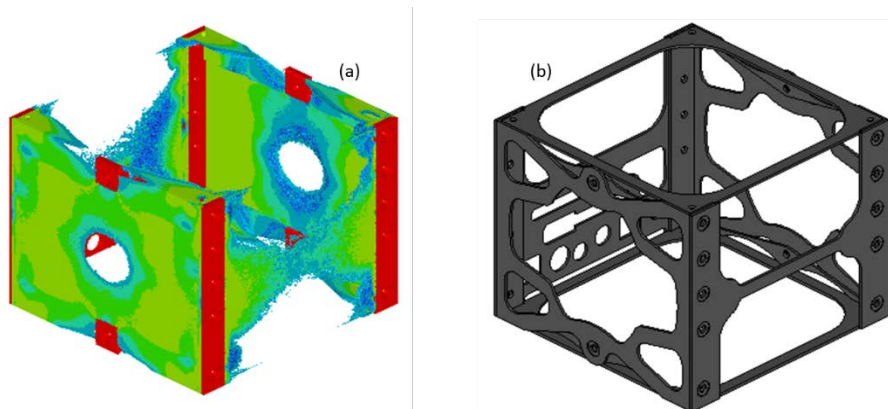


Figura 4. (a) Resultados de densidad de la optimización estructural topológica, (b) Rediseño de la estructura optimizada.

#### 4.1 Análisis modal para el diseño de la estructura optimizada

Como se puede observar existe una reducción de masa considerable entre la estructura inicial y el diseño de la estructura optimizada, sin embargo es un resultado esperado por el tipo de restricción utilizada durante la optimización topológica. Para validar el nuevo diseño es necesario repetir el análisis modal bajo las mismas condiciones que se utilizaron para la estructura inicial, ya que de esta forma podremos conocer si el valor de la frecuencia para el primer modo de vibración se elevó con respecto al obtenido en el análisis para la estructura inicial y así comprobar si se cumple con la función objetivo.

Los resultados del análisis modal para el nuevo diseño de la estructura optimizada son los siguientes:

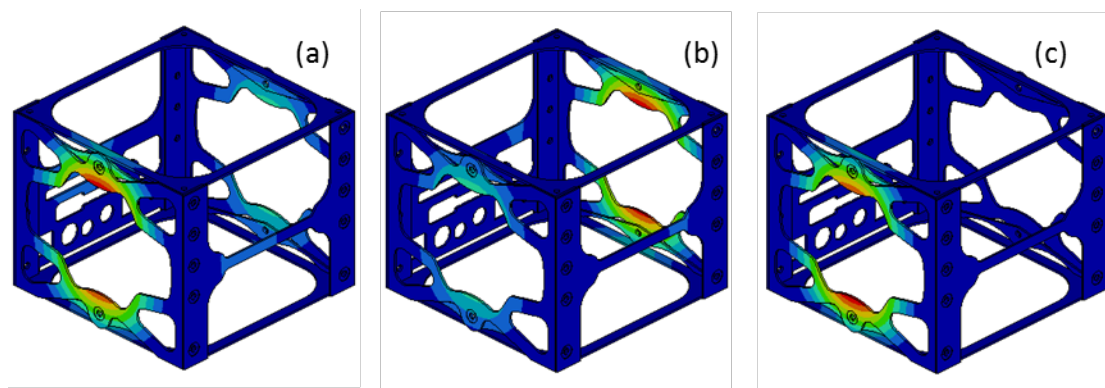


Figura 5. Resultados del análisis modal para el diseño de la estructura optimizada. (a) Modo 1, (b) Modo 2, (c) Modo 3.

Modos de vibración	Frecuencia [Hz]	Masa [kg]
(a) Modo 1	87.64	0.061
(b) Modo 2	87.76	
(c) Modo 3	89.52	

Tabla 2. Valor de frecuencia para los primeros tres modos de vibración y valor de la masa para el diseño de la estructura optimizada con modificaciones.

## 5. RESULTADOS

En la Tabla 3 se muestran los valores de frecuencia para el primer modo de vibración y la reducción de masa entre el diseño inicial y el rediseño final de la estructura, además, en la Figura 6 se puede observar el cambio de geometría de una estructura a otra.

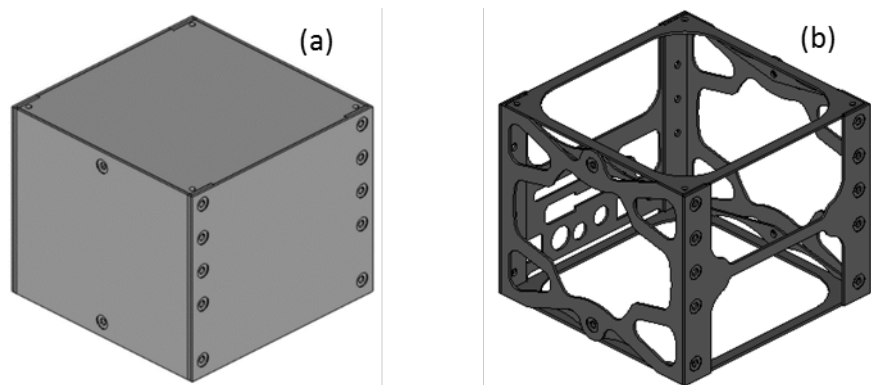


Figura 6. Comparación del diseño de las estructuras (a) inicial y (b) optimizada.

Diseño de la estructura	Frecuencia [Hz]	Masa [kg]
(a) Inicial	33.58	0.179
(b) Optimizada	87.64	0.061

Tabla 3. Resultados de masa y frecuencia para el primer modo de vibración para el diseño de las estructuras (a) inicial y (b) optimizada (Final).

## CONCLUSIONES

- El diseño de la estructura optimizada presento resultados satisfactorios en cuanto al análisis modal, elevando el valor de la frecuencia para el primer modo de vibración con respecto al valor obtenido para la estructura inicial, cumpliendo así con la función objetivo.
- Se puede observar que el valor de frecuencia para el primer modo de vibración se elevó 54[Hz] en comparación con el valor para el primer modo presentado en la estructura inicial.
- Realizar el rediseño de la estructura partiendo de los resultados de densidad para una restricción del 30% de masa permitió elevar el valor de la frecuencia en un 38.31 % y una reducción final de masa de 65.92 %.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la UNAM-DGAPA por los apoyos para realizar esta investigación a través de los proyectos PAPIIT-IN113315 “Mecánica computacional y optimización como línea de investigación en el diseño mecánico” y PAPIME-PE104315 “Fortalecimiento del proceso enseñanza-aprendizaje del comportamiento mecánico de los materiales por medio de TIC”

## REFERENCIAS

- [1] Simon Lee, Amy Hutputanasin, Armen Toorian, Wenschel Lan, Riki Munakata, *CubeSat Desing Specification Rev. 12*, The CubeSat program Cal Poly SLO.

- [2] Jordi Puig-Suari, Clark Turner, William Ahlgren, *Development of the Standard CubeSat Deployer and a CubeSat Class PicoSatellite*, Aerospace Conference, 2001, IEEE Proceedings.
- [3] Simon Lee, Armen Toorian, Nash Clemens, Jordi Puig-Suari, *Cal Poly Coordination of Multiple CubeSats on the DNEPR Launch Vehicle*, 18<sup>th</sup> Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites.