

## ANÁLISIS DE LAS VIBRACIONES EN EL BRAZO DE UN DRON CONSTRUIDO CON ESTRUCTURAS ISOGRID Y FIBRA DE CARBONO

### Vibration analysis on the arm of a drone built with Isogrid structures and carbon fiber

Brayan Noel Ceniceros Jáquez, Oralia Solano Maya,  
Alfredo Villanueva Montellano, José Omar Dávalos Ramírez

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, México. Email: [jose.davalos@uacj.mx](mailto:jose.davalos@uacj.mx)

(Recibido 26 de Octubre de 2023 y aceptado 07 de Diciembre de 2023)

#### Resumen

En este trabajo se presenta un análisis al brazo de un dron construido con estructuras Isogrid y fibra de carbono para evaluar su frecuencia natural y su respuesta a la frecuencia. Se comparan los resultados en dos modelos de brazo de dron, el primero con estructura Isogrid y el segundo con estructura Isogrid recubierto por una capa de fibra de carbono. Mediante el elemento finito se calculó la frecuencia natural, la amplitud de desplazamientos en un rango de frecuencia para evaluar condiciones de resonancia y los desplazamientos en resonancia y en 3600 RPM. Los resultados muestran que se reduce considerablemente la amplitud de desplazamientos y los desplazamientos al agregar una capa de fibra de carbono. Adicionalmente la frecuencia natural de la estructura aumenta.

**Palabras clave:** dron, ISOGRID, vibraciones, desplazamientos, elemento finito.

#### Abstract

In this work, an analysis of the arm of a drone constructed with Isogrid structures and carbon fiber is presented to evaluate its natural frequency and its response to frequency. The results are compared between two drone arm models, the first one with an Isogrid structure, and the second one with an Isogrid structure covered by a layer of carbon fiber. Using finite element analysis, the natural frequency was calculated, as well as the displacement amplitudes over a frequency range to evaluate resonance conditions and displacements at resonance and at 3600 RPM. The results show a significant reduction in displacement amplitudes and displacements when adding a layer of carbon fiber. Additionally, the natural frequency of the structure increases in the model with carbon fiber.

**Key words:** dron, ISOGRID, vibrations, displacements, finite element.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los drones han experimentado un crecimiento significativo en su uso en diversas aplicaciones, desde la fotografía aérea hasta la entrega de paquetes. La estabilidad y el rendimiento de estos dispositivos son factores cruciales para su funcionamiento efectivo. Uno de los desafíos técnicos fundamentales en el diseño de drones es el control de las vibraciones generadas por la rotación de los motores y las hélices. En este sentido, es importante asegurar que las fuerzas de excitación del motor que impulsa a las hélices no generen vibraciones excesivas en la estructura. Estas vibraciones pueden generar amplitudes de desplazamiento excesivas que afectan la operación del dron [1]. Diferentes estudios se han realizado para intentar controlar estos desplazamientos mediante actuadores o sensores en lo que se conoce como controles activos [2–4].

Dentro del área de controles pasivos se han estudiado las posibilidades de los materiales compuestos para el control de las vibraciones. Huang et al. [5] estudiaron los mecanismos de amortiguamiento de estructuras tipo sándwich con materiales compuestos mediante modelos de elemento finito. Concluyen que los mecanismos de amortiguamiento dependen de los modos de vibración de la estructura ya que en el primer modo se presenta amortiguamiento por compresión y en segundo y tercer modo amortiguamiento por cortante.

Kumar y Panda [6] proponen la aplicación de compuestos con propiedades viscoelásticas para el control pasivo de estructuras sometidas a vibraciones. Aplicaron el método del elemento finito para el análisis de vigas en voladizo manufacturadas con materiales compuestos. Encontraron mejoras del amortiguamiento en condiciones de carga dinámicas. Aplicado a vehículos aéreos no tripulados (UAV) se han realizado investigaciones para determinar la respuesta a las vibraciones en estructuras manufacturadas con compuestos.

Simsiriwong y Warsi [7] realizaron estudios experimentales al fuselaje de un UAV integrado con

estabilizadores verticales. Usaron compuestos de fibra de carbono curados en horno con fibras uniaxiales y biaxiales. Encontraron que los modos de vibración son mixtos incluyendo combinaciones de flexión y torsión. Adicionalmente el uso de estructuras no convencionales ha demostrado impactos positivos en la reducción de vibraciones. Shangolian et al. realizaron un análisis de un compuesto tipo sándwich con núcleos Isogrid. Sus resultados muestran que las frecuencias naturales se incrementan de 1 a 5 veces al variar los parámetros tanto del Isogrid como la cantidad de capas de fibra.

Lin et al. [8] implementaron metaestructuras mecánicas cilíndricas para aislar las vibraciones en drones. Realizaron mediciones experimentales en un prototipo construido mediante manufactura aditiva. Encontraron que se eliminaron las frecuencias de banda ancha en el dron. En este trabajo se propone el uso de estructuras Isogrid recubiertas con fibra de carbono en el diseño del brazo de un dron para estudiar su respuesta a cargas dinámicas provocadas por la rotación de las hélices.

Con base en lo anterior, en la presente investigación se presenta una estructura de tipo circular en dos diseños de brazo: uno con estructura Isogrid y otro con estructura Isogrid recubierta con una capa de fibra de carbono. El material de construcción del Isogrid será de ácido poliláctico (PLA). Se calcularán mediante el método del elemento finito las frecuencias naturales, las amplitudes de los desplazamientos en condiciones de resonancia y a 3600 RPM.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

En la presente investigación se tomó como referencia el brazo de un dron modelo Industrial Drone Espect. Las dimensiones empleadas en la estructura Isogrid y el modelo del dron se presentan en la Tabla 1, mientras que la geometría resultante de la estructura Isogrid es mostrada en la Figura 1. Adicionalmente se generó una superficie circular del mismo diámetro del Isogrid que corresponde a la capa de fibra de carbono.

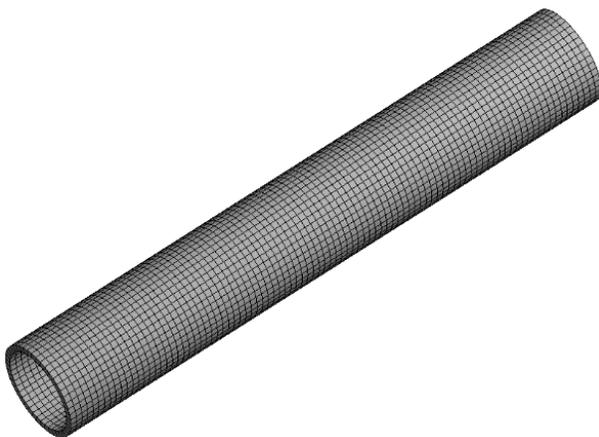
**Tabla 1.** Dimensiones de la estructura Isogrid.

Dimensión	Valor
Diámetro = longitud lateral	30mm
Espesor	3mm
Ancho de costillas helicoidales	4mm
Ancho de costillas circulares	4mm



**Figura 1.** Geometría del brazo del dron con estructura Isogrid.

La estructura Isogrid fue discretizado con elementos tetraédricos mientras que la capa de fibra se discretizó con elementos cuadriláteros. Se generaron 39525 elementos los cuales se muestran en la Figura 2. La fibra de carbono se consideró bidireccional con un espesor de 0.43 mm. De ambos materiales, fibra de carbono y PLA, se presentan en la Tabla 1. Se realizaron dos tipos de estudios. En el primero se calculó la frecuencia natural en las estructuras Isogrid sin y con recubrimiento de fibra de carbono. En el segundo se obtuvo la respuesta a la frecuencia en condiciones de resonancia en ambas geometrías.



**Figura 2.** Discretización de los elementos del brazo del dron.

**Tabla 1.** Propiedades de fibra de carbono y PLA.

Dimensión	Propiedades	Unidades	Magnitud
Fibra de carbono	$E_x$	MPa	59160
	$E_y$	MPa	59160
	$E_z$	MPa	7500
	$\nu_{xy}$	-	0.04
	$\nu_{yz}$	-	0.3
	$\nu_{xz}$	-	0.3
	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1451
PLA	$E$	GPa	3.45
	$\nu$	-	0.39
	$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	1250

El modelo fue restringido en un extremo y en el extremo contrario se asignó la carga correspondiente al peso del motor, 62 grs., y de la propela, 15 grs., dando un valor equivalente a 0.76N. Los valores de frecuencia natural obtenidos del análisis modal se utilizaron como condición de frontera en el estudio de frecuencia de respuesta.

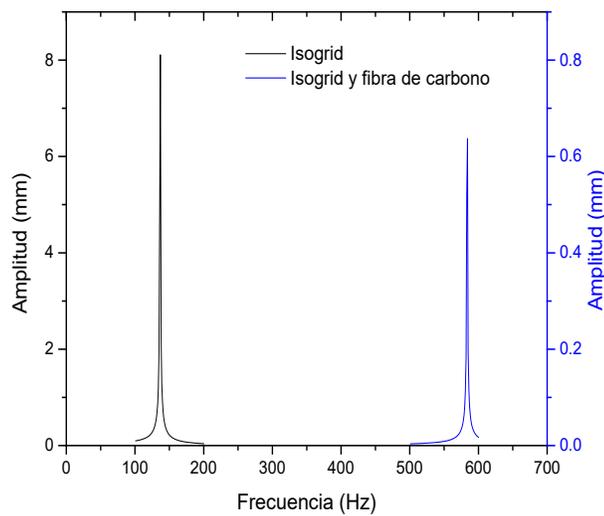
### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 se presentan las tres primeras frecuencias naturales de ambos modelos. El valor de la primera frecuencia natural del brazo con estructura Isogrid y fibra de carbono incrementa alrededor de 4 veces con respecto al brazo que cuenta únicamente con estructura Isogrid. Estos resultados coinciden con los reportados en la literatura. Para el segundo y tercer modo la diferencia disminuye a 2 y 1.76 veces respectivamente.

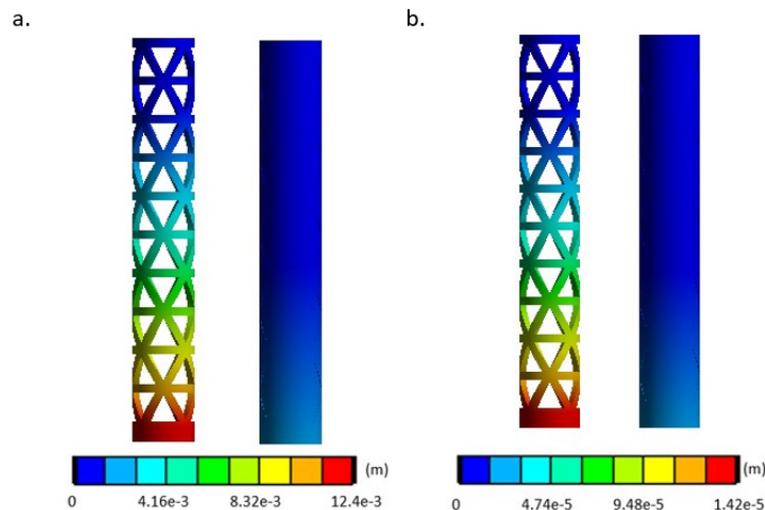
En la Figura 3 se presentan los resultados de frecuencia de respuesta para los diseños con estructura Isogrid y material compuesto evaluados en rangos de 100 a 200 y de 500 a 600 respectivamente. Estos rangos se definieron para observar la amplitud de desplazamiento cuando en ambos casos se alcanza la resonancia. La amplitud de desplazamiento en condiciones de resonancia es superior en el caso del material Isogrid con un valor de aproximadamente 8 mm, mientras que en el caso del brazo con material compuesto apenas es superior a los 0.6 mm.

**Tabla 2.** Frecuencias naturales de los diseños del brazo del dron.

Frecuencia	Isogrid	Isogrid/fibra de carbono
Frecuencia natural 1 (Hz)	136.61	583.55
Frecuencia natural 2 (Hz)	752.36	1510.6
Frecuencia natural 3 (Hz)	1333.8	2325.8



**Figura 3.** Frecuencia de respuesta en valores de resonancia.



**Figura 4. a)** Desplazamientos en brazo de dron bajo condiciones de resonancia y **b)** Desplazamientos en el brazo del dron a 60 Hz.

Lo anterior demuestra que la aplicación de compuesto con estructura Isogrid reduce significativamente siendo 12.72 veces menor. Los resultados de desplazamiento en el cuerpo del brazo del dron en condiciones de resonancia se presentan en la Figura 4a. Como es de esperarse, el mayor desplazamiento ocurre en el extremo libre y es nulo en la zona de sujeción. Los desplazamientos superan 10 mm en el caso de la estructura Isogrid. El desplazamiento en la estructura recubierta con fibra disminuye considerablemente.

Teniendo en cuenta que los resultados son en condiciones de resonancia se considera que un brazo de dron con estructura Isogrid y recubierto con fibra de carbono presentara un menor desplazamiento en estas condiciones.

Con el fin de comprobar si los desplazamientos se reducen en condiciones de frecuencia de operación típica en el dron, se realizó una simulación a 60 Hz (3600 RPM) presentada en la Figura 4b. Al encontrarse alejado de la frecuencia de resonancia los desplazamientos en el brazo disminuyen considerablemente por lo tanto la mejora debido a la adición de fibra de carbono se conserva a frecuencias más bajas.

La adición de la capa de fibra de carbono, si bien incrementa la masa del brazo, le proporciona rigidez lo cual hace que su frecuencia natural cambie provocando una reducción en la amplitud de los desplazamientos, así como en los desplazamientos mismos de la estructura.

#### 4. CONCLUSIONES

En esta investigación se calcularon numéricamente la frecuencia natural y la respuesta a las cargas dinámicas en dos modelos de brazo de dron, uno con estructura Isogrid y otro con estructura Isogrid y una capa de fibra de carbono. De los resultados obtenidos se concluye que resulta benéfico para el brazo del dron su construcción con estructura Isogrid recubierta con fibra de carbono ya que los desplazamientos se reducen cuando se encuentra en operación. Lo anterior mejora el control del dron y contribuye a tener un vuelo óptimo.

#### AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez por las facilidades prestadas para la realización de este artículo.

#### CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores no tienen conflictos de interés que declarar.

#### REFERENCIAS

- [1] G. Cai, J. Dias, and L. Seneviratne, "A Survey of Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles: Recent Advances and Future Development Trends," *Unmanned Syst.*, vol. 02, no. 02, pp. 175–199, 2014. <https://doi.org/10.1142/S2301385014300017>
- [2] Y. Li, X. Wang, R. Huang, and Z. Qiu, "Actuator placement robust optimization for vibration control system with interval parameters," *Aerosp. Sci. Technol.*, vol. 45, pp. 88–98, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2015.04.017>
- [3] S. Kapuria and M. Y. Yasin, "Active vibration suppression of multilayered plates integrated with piezoelectric fiber reinforced composites using an efficient finite element model," *J. Sound Vib.*, vol. 329, no. 16, pp. 3247–3265, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2010.02.019>
- [4] Z. G. Song, L. W. Zhang, and K. M. Liew, "Active vibration control of CNT-reinforced composite cylindrical shells via piezoelectric patches," *Compos. Struct.*, vol. 158, pp. 92–100, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.09.031>
- [5] Z. Huang, Z. Qin, and F. Chu, "Damping mechanism of elastic-viscoelastic-elastic sandwich structures," *Compos. Struct.*, vol. 153, pp. 96–107, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.105>
- [6] Kumar and S. Panda, "Design of a 1-3 viscoelastic composite layer for improved free/constrained layer passive damping treatment of structural vibration," *Compos. Part B Eng.*, vol. 96, pp. 204–214, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.04.020>

- [7] J. Simsiriwong and R. W. Sullivan, "Vibration testing of a carbon composite fuselage," *Am. Soc. Compos. - 23rd Tech. Conf. Am. Soc. Compos.* 2008, vol. 2, pp. 956–969, 2008. <https://doi.org/10.1504/IJNVN.2010.036683>
- [8] Y. Lin et al., "A Novel Cylindrical Mechanical Metastructure for Drone Vibration Isolation," in *Proceedings of IncoME-VI and TEPEN 2021, 2023*, pp. 831–840. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-99075-6\\_67](https://doi.org/10.1007/978-3-030-99075-6_67)