

Diseño y análisis de la estructura de un vehículo aéreo no tripulado mediante el método de elemento finito

SÁNCHEZ-SUÁREZ, Isahi†, PADILLA-MAGAÑA, Jesús Fernando, VEGA-HUERTA, América y OSEGUERA-ESPINOZA, Pedro Ramón

Recibido Febrero 15, 2017; Aceptado Agosto 29, 2017

Resumen

Los vehículos aéreos no tripulados, han tenido desde hace más de 15 años diferentes aplicaciones civiles. Una de las aplicaciones con más potencial, además de la seguridad pública, es la agricultura de precisión y la monitorización de los campos de cultivo. **Objetivos, metodología** 1. Realizar el diseño de la estructura de un vehículo aéreo no tripulado (VANT), mediante un estudio QFD que considere todas las características relevantes del sistema aerodinámico. 2. Realizar los planos del VANT en dos y tres dimensiones en un software de diseño CAD. 3. Realizar el análisis de la estructura del VANT mediante una herramienta computacional que aplique el método del elemento finito. **Contribución.** Se obtendrá el diseño de un vehículo aéreo no tripulado, para diseñar e implementar algoritmos de control robusto para vuelo de vehículos ligeros no tripulados mejorando su estabilidad bajo perturbaciones de viento, además de ampliar su uso en la agricultura de precisión para el control de los cultivos, detección de estrés hídrico para el manejo eficiente del agua, detección de estrés nutricional en cultivos, detección temprana de enfermedades y plagas en cultivos.

Vehículo aéreo no tripulado, diseño CAD, elemento finito

Abstract

Design and analysis of the structure of an unmanned aerial vehicle using the finite element method The unmanned aerial vehicles, have for more than 15 years had different civil applications. One of the applications with more potential, besides the public security, is the precision agriculture and the monitoring of the fields of culture. **Objectives, methodology** 1. Design the structure of an unmanned aerial vehicle (UAV), using a QFD study that considers all relevant characteristics of the aerodynamic system. 2. Draw the UAV drawings in two and three dimensions in a CAD design software. 3. Perform the analysis of the UAV structure using a computational tool that applies the finite element method. **Contribution.** The design of an unmanned aerial vehicle will be obtained to design and implement robust control algorithms for unmanned light vehicle flight, improving its stability under wind disturbances, as well as expanding its use in precision agriculture for crop control, water stress detection for efficient water management, detection of nutritional stress in crops, early detection of diseases and pests in crops.

Unmanned aerial vehicle, CAD design, finite element

Citación: SÁNCHEZ-SUÁREZ, Isahi, PADILLA-MAGAÑA, Jesús Fernando, VEGA-HUERTA, América y OSEGUERA-ESPINOZA, Pedro Ramón. Diseño y análisis de la estructura de un vehículo aéreo no tripulado mediante el método de elemento finito. Revista de Tecnología e Innovación.2017, 4-12: 17-28.

*Correspondencia al Autor (Correo Electrónico: isanchez198@hotmail.com)

†Investigador contribuyendo como primer autor.

Introducción

En este trabajo de investigación se realizará la propuesta del diseño de la estructura de un VANT, utilizando un material alternativo a los empleados comercialmente. Se desea saber la factibilidad del diseño, así como el analizar la estructura para saber si es viable la manufactura del mismo, utilizando herramientas como lo son: diseño asistido por computadora (CAD), y Análisis del Elemento Finito (FEA).

Para conocer las características más importantes del diseño de la estructura del Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT), se utilizará la herramienta Despliegue de la Función de Calidad (QFD) con el fin de considerar todas las características que se deben de incluir para la realización del diseño del VANT. Mediante un software de diseño CAD se realizarán los planos del VANT en dos y tres dimensiones y mediante la herramienta de Elemento finito con la que cuenta el Software, se analizará la estructura del VANT.

Componentes Básicos de un VANT

Estructura: es la parte funcional de un VANT, donde se pueden ver los cuatro brazos de plástico o en ocasiones fibra de carbono, que soporta y distribuye el peso por toda la estructura, en algunos casos la estructura es por medio de triángulos, lo cual lo realizan para que presente poca resistencia a las corrientes de viento, (MARTÍN, 2016).

Motores: estos son de corriente directa con un consumo entre 7 y 12 amperios, los más comerciales tienen un empuje entre 300 y 800 gramos, dependiendo de las hélices y la corriente a consumir, (MARTÍN, 2016).

Hélices: por medio de la rotación, dispersan el viento en una sola dirección, para ser aprovechado como empuje, de manera que tiene dos parámetros, distancia y ángulo de inclinación. La numeración que tienen son 10x45 o 10x4.5, donde el diez significa la distancia en pulgadas, el 45 o 4.5 indican los grados de inclinación. Existen dos tipos de hélices con inclinación horaria y anti horaria, (MARTÍN, 2016).

Controladores de motores: son los reguladores de voltaje entre 2 y 5 volts, estos dispositivos reciben el voltaje de la batería y la señal del controlador de vuelo, son fabricados para alta corriente, esto para tener un factor de seguridad y no sufran daño por calentamiento, (MARTÍN, 2016).

Controlador de Vuelo: este es un emisor y un receptor a la vez de señales, el cual sigue señales digitales por un control de RF en tiempo real, o por medio de una programación personalizada de algoritmos robustos, que se apoya en sensores y actuadores, (MARTÍN, 2016).

Baterías: estas tienen dos parámetros tensión y corriente, la tensión es un estándar y tiene un valor de 3.7 por celda, mientras que la corriente dependerá de la construcción de dicha celda, en la mayoría de casos usan de litio y en casos más especiales de polímero de litio, (MARTÍN, 2016).

Justificación

Este trabajo de investigación es parte del primer objetivo del proyecto: Agricultura de precisión para mejorar el cultivo de Aguacate usando Vehículos Aéreos no Tripulados, que consiste en diseñar e implementar algoritmos de control robusto para vuelo de vehículos ligeros no tripulados mejorando su estabilidad bajo perturbaciones de viento.

Al probar VANT's comerciales y evaluar su desempeño de forma general, se concluyó que no son adecuados para implementar funciones extra, esto debido al tipo de software y hardware cerrado que manejan, por lo que es necesario diseñar un chasis de VANT que incluya todas las características necesarias para llevar a cabo el proyecto.

Desarrollo

Para el diseño de la estructura del VANT se realizó un diagrama de Causa y Efecto, con el fin de tener una visión más clara para contemplar las características que con lleven a la realización de un diseño óptimo.

En la Fig. 1, se muestra el diagrama de causa y efecto considerado las expectativas funcionales obtenidas mediante una lluvia de ideas, los cuatro campos principales que determinaran el diseño funcional del VANT son: fabricación, costos, materiales y diseño.

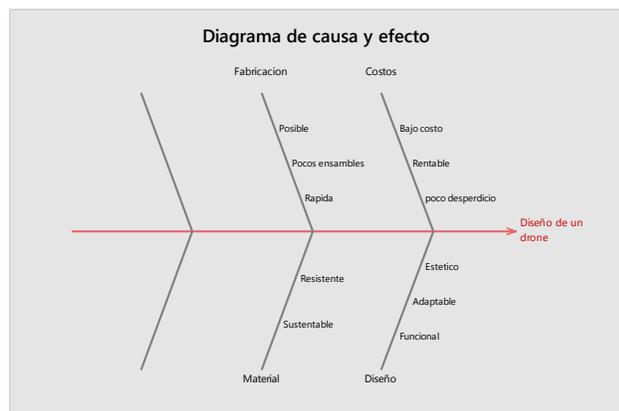


Figura 1 Diagrama Ishikawa para el diseño del VANT

Fuente: *Diseño Propio*

Como podemos observar las principales expectativas que se tienen son: un diseño funcional, estético, materiales sustentables, fabricación mediante pocos ensamblajes y que sea de bajo costo entre otras características.

A continuación, se utilizará la herramienta QFD para buscar como traducir las expectativas del cliente deseadas en el diseño en características técnicas del diseño, considerando como que's las expectativas que determinamos en la Fig. 2.

A cada que le asignaremos un valor de importancia y se ordenara en forma ascendente.

Numero de celda	Valor maximo 1, 3 o 9	Porcentaje	Importancia	Características de la Calidad (como's)
1	9	33%	25	Funcional
2	9	27%	20	Adaptable
3	9	20%	15	Resistente
4	9	13%	10	Bajo Costo
5	9	7%	5	Estetico

Figura 2 Despliegue de la función de calidad

Fuente: *Diseño propio*

Posteriormente se realizará el análisis de cómo podemos cumplir los que's para así determinar las características técnicas del diseño.

Además, debemos relacionar los *que's* y los *como's*, otorgándoles un nivel de relación, en base a la escala en donde la relación es:

1. Baja
2. Media
3. Alta

En la Fig. 3. Se muestra las características de los como y la relación correspondiente.

Calidad Demandada (que's)	Características de la Calidad (como's)				
	Material economico	Diseño Concurrente	Tipo de dron	Software CAD CAM	Modulo de elasticidad
Funcional	1	1	9		3
Adaptable	1	9			1
Resistente	3	1	3		9
Bajo Costo	9	9	9	3	
Estetico	1	1	1	9	

Figura 3. Nivel de relación

Fuente: Diseño propio

En la Fig. 4 se calcula la importancia de los como's, como el porcentaje de importancia por el nivel de relación asignada en la Fig. 3. Por lo tanto, las características mas importantes que se deben tomar en cuenta en la etapa de diseño son: la fabricación del VANT contemplará la metodología de un diseño concurrente, el tiempo de Diseño – Manufactura será semana, y finalmente el diseño del VANT sea un cuadracoptero.

Valor limite de la característica tecnica	250.000	1 semana	Cuadracoptero	2 dimensiones	3 gpa
	\$				
Dificultad (0 muy facil, 10 extemadamente dificil)	3	2	1	4	5
Valor maximo 1, 3 o 9	9	9	9	9	9
Importacia	2.467	4.2	4.867	1	3.067
Porcentaje	16%	27%	31%	6%	20%

Figura 4 Importancia de los como's

Fuente: Diseño propio

Siguiendo con el diseño se realizará otro QFD de segundo nivel para determinar las herramientas para lograr las características técnicas anteriormente determinadas.

Las características técnicas de la calidad es decir los como's pasaran a ser los que's, en la Fig. 5 se muestra cómo lograr estos requerimientos, evaluando la relación entre cada uno, como se hizo anteriormente.

Calidad Demandada (que's)	Características de la Calidad (como's)				
	Diseño de Ensamble	Diseño de Manufactura	Triplay	MDF	Cantidad de motores
Diseño Concurrente	9	9			1
Tipo de dron	3	1			9
Modulo de elasticidad			3	3	
Material economico		3	3	9	3
Software CAD CAM	3	9			9

Figura 5 Como's vs que's

Fuente: Diseño propio

Finalmente, consideramos la prioridad de los como's en la Fig. 6.

Valor limite de la característica tecnica	10 piezas	CAD	3 mm	3 mm	4 motores	3 ejes
Dificultad (0 muy facil, 10 extemadamente dificil)	1	2	3	3	1	5
Valor maximo 1, 3 o 9	9	9	9	9	9	9
Importacia	4	4.267	1	1.8	3.133	1.6
Porcentaje	25%	27%	6%	11%	20%	10%

Figura 6 Prioridad de los como's

Fuente: Diseño propio

Como se puede observar en la parte sombreada de la Figs. 4 y 6, para lograr un diseño funcional se requieren realizar un diseño de ensamble de 10 piezas como máximo, en un software CAD.

Material a utilizar

Se utilizará el material MDF (Medium Density Fibreboard) que es un material compuesto de fibras de madera unidas por adhesivos urea-formaldehído.

Descripción y aplicaciones: Posee excelentes propiedades de maquinado en corte laser en CNC (Control Numérico por Computadora)) y cortes curvos hechos con caladora o router manual, que permite excelentes terminaciones, (Poblete, 2000).

Clasificación por densidad: El MDF tiene cuatro clasificaciones, HDF: densidad mayor a 800 Kg/m³, MDF: Estándar: densidad entre 650 y 800 Kg/m³, MDF light: densidad entre 550 y 650 Kg/m³, MDF ultra light: densidad inferior a 550 Kg/m³. En la Tabla 1, se muestran las propiedades generales del MDF.

Propiedad	Tolerancia	Valor
Espesor (mm)	+/- 0.3	3
Densidad (Kg/m ³)	+/- 35	850
Tracción (N/mm ²)	Min 0.8	1
Módulo de elasticidad (N/mm ²)	+/- 300	4000
Humedad	+/- 3	4-10%
Medidas (mts)	+/- 2 mm	1.22*2.44, 1.53*2.44, 1.83*2.44, 2.15, 2.44

Tabla 1 Propiedades del MDF

Fuente: Poblete, 2000

El principal factor para la utilización de este material, fue por sus propiedades mecánicas, tiene una la densidad de 850 kg/m³ y módulo de elasticidad de 4 MPa. Considerando que la estructura debe soportar un peso de aproximadamente 5 kg, se determinó que estas características mecánicas son suficientes para la estructura del VANT.

Diseño CAD en dos dimensiones del VANT.

El diseño del VANT se divide en cuatro partes: parte superior, parte inferior, laterales y ensamblajes extras.

Parte superior: Para la cara superior del VANT en dos dimensiones, se consideró la distancia mínima que debe existir entre cada motor, también la distancia de las hélices hasta la plataforma de tal manera que el brazo no fuera muy corto y que pudieran existir interrupciones en las corrientes de aire entre la misma estructura.

En la parte superior e inferior de la Fig. 7 se pueden mostrar los ensamblajes, que serán de utilidad para formar la estructura en 3d.

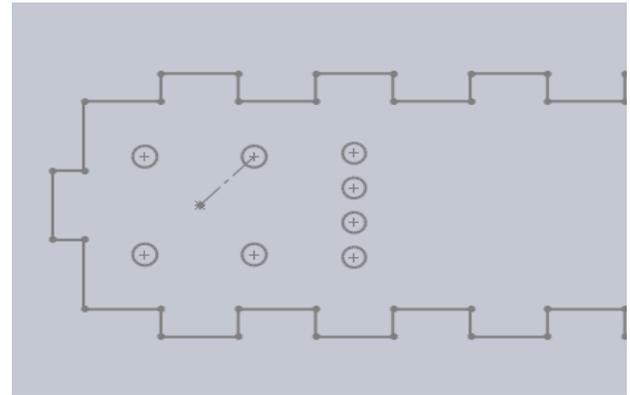


Figura 7 Base del motor

Fuente: Solidworks 2014

En la cara superior también se consideró la forma de las baterías, tomando en cuenta que los motores pueden ser alimentados con baterías de 2 o 3 celdas. La forma física de las baterías se incluyó como un ensamblaje de la cara superior del VANT, se colocaron en módulos de 3, en cuatro secciones para equilibrar el peso como se ilustra en la Fig. 8.

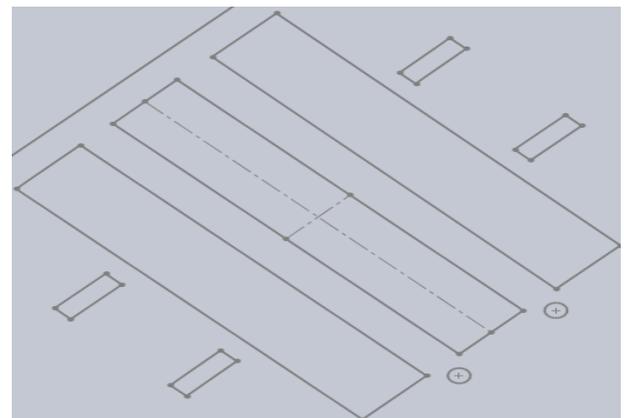


Figura 8 Diseño del Porta baterías

Fuente: Solidworks 2014

Todos los cables tienen que ir hacia el centro de la estructura donde se realiza la etapa de control, para este caso se realizaron 16 orificios para las conexiones de controladores de motores, baterías y señales de sensores como se puede ilustrar en la Fig. 9.

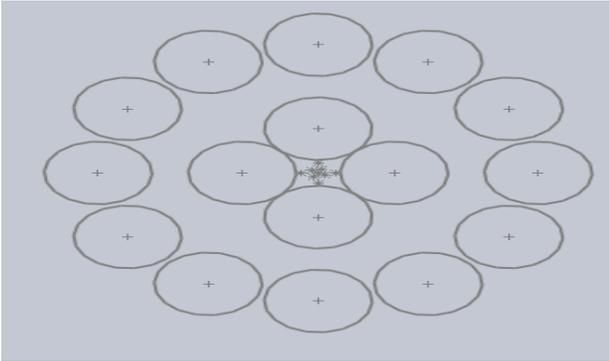


Figura 9 Orificios para los cables
Fuente: Solidworks 2014

Laterales: los laterales serán en este caso una pieza entre la cara superior e inferior, para formar una figura rectangular en la estructura y tenga mayor resistencia mecánica, colocando los controladores de motor dentro de la estructura, en la Fig. 10 se muestra una parte de los laterales.

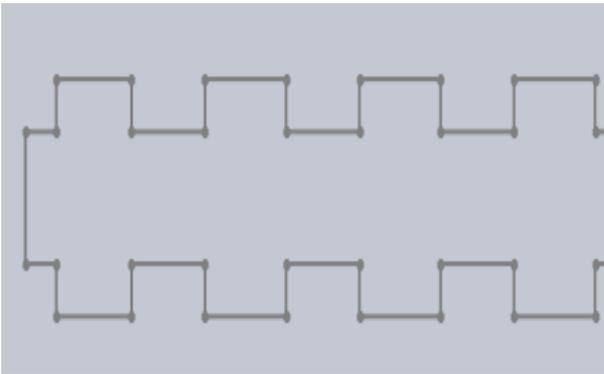


Figura 10 Ensamblajes laterales
Fuente: Solidworks 2014

La parte central de los laterales del VANT están divididos en dos partes, esto para que tenga un ensamblaje con los laterales perpendiculares, la Fig. 11 muestra 6 orificios para colocar los cables de cada brazo, dos ranuras en la parte superior donde llevara dos ensamblajes de los laterales opuestos, así logrando un ensamblaje entre laterales, así como tiene orificios para introducir los cables de las baterías que se incorporan a la estructura.

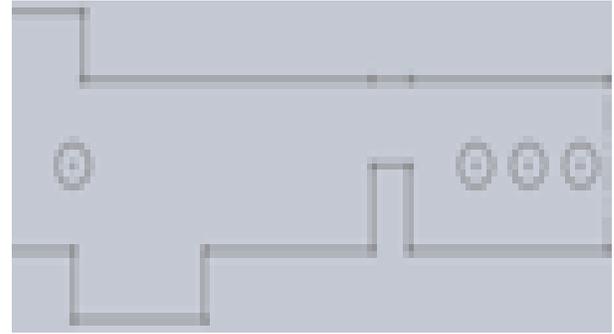


Figura 11 Parte central de laterales
Fuente: Solidworks 2014

Parte inferior: Es la última cara para completar la estructura rectangular, en esta se ensambla el tren de aterrizaje y el controlador del motor como se muestra en la Fig. 12. Las Figs. 13, 14 y 15 ilustran los ensamblajes necesarios para completar las estructuras, el tren de aterrizaje, el ensamblaje en forma de “h” para los brazos y un broche para fijar las baterías a la estructura.

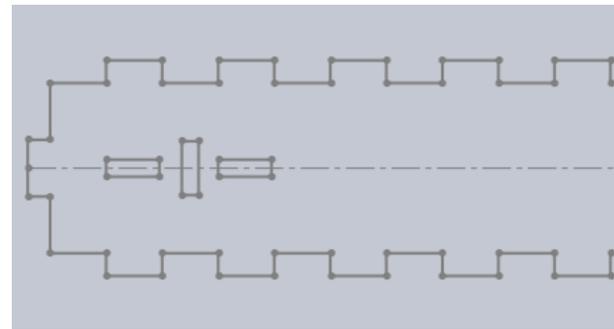


Figura 12 Brazo del VANT
Fuente: Solidworks 2014

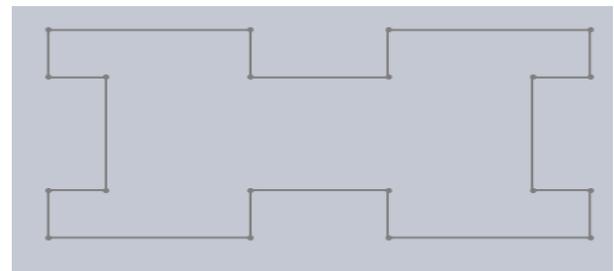


Figura 13 Ensamblaje de brazos
Fuente: Solidworks 2014

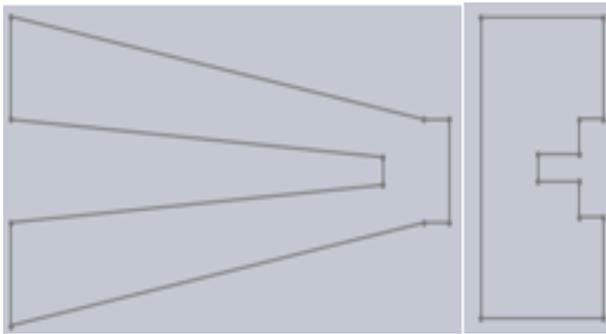


Figura 14 Tren de aterrizaje

Fuente: Solidworks 2014

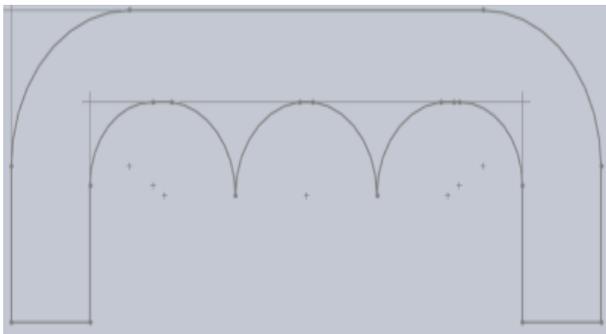


Figura 15 Broche de batería

Fuente: Solidworks 2014

Maquinado

El maquinado del diseño CAD se realizó en un CNC laser, por lo que se deben determinar las tolerancias en el corte, debido a la pequeña remoción de material que existe al maquinar, esto debido a la alta temperatura producida por el laser, como se muestra en la Fig. 16.

Se utilizó la herramienta para corte laser: RDworks V8. La interfaz del programa es sencilla, tiene herramientas de dibujo básico como son: realizar matrices de figuras, hacer contornos de figuras no tan complejas, personalizar el tamaño de las figuras.

RDworks es esencial para tener control sobre el CNC, ayuda a configurar la potencia de corte y la velocidad, así como para la calibración del punto de origen donde empezara maquinar y ver el tamaño necesario para el corte, también configura una ruta para el maquinado que en ocasiones no es la más rápida, (Groover, 1997).

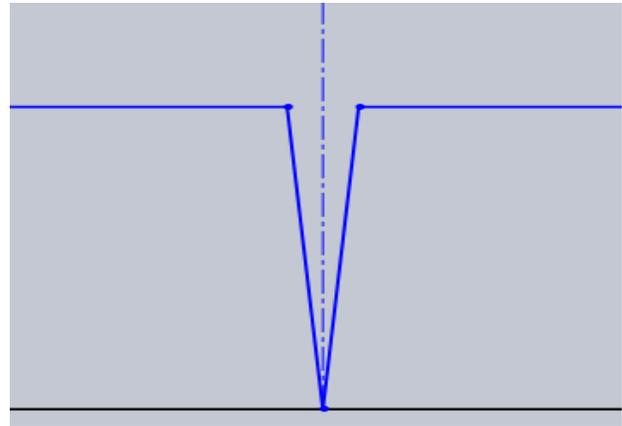


Figura 16 Desgaste del maquinado

Fuente: Solidworks 2014

Posteriormente al diseño CAD, se exporta al formato que soporta el CNC. Primero se exporta al formato .dxf, que puede importar el programa RDWorks para convertirlo en archivo .rd y .rld que maneja el CNC en forma nativa.

Antes de generar el archivo .rd se deben configurar los parámetros de la velocidad en mm/s y la potencia del láser en %. El origen, la distancia entre el material y el láser se configuran manualmente en el CNC laser, la Fig. 17 muestra la configuración realizada.

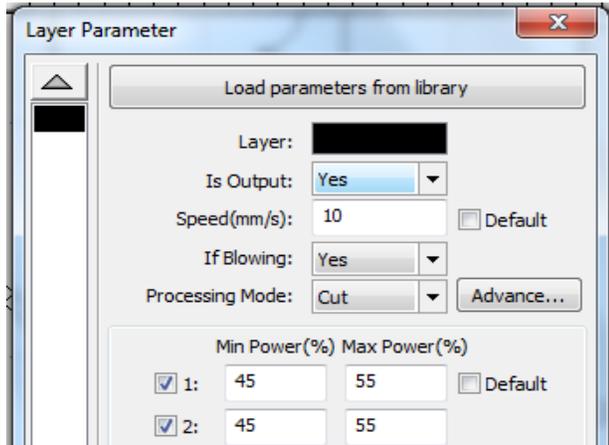


Figura 17 Configuración para el maquinado
Fuente: RDworks v8.0

La Fig. 18 muestra el maquinado, después sigue el ensamble y la Fig. 19 muestra el ensamble terminado.

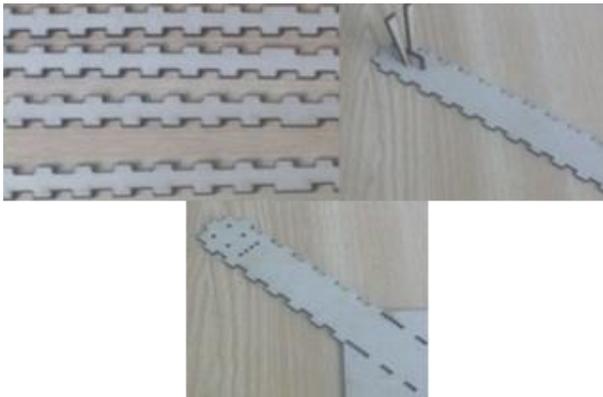


Figura 18 Cara superior, inferior y lateral
Fuente: Laboratorio de Manufactura UPOLU



Figura 19 Ensamble terminado
Fuente: Laboratorio de Manufactura UPOLU

Prueba de ensamble

Para poder realizar un ensamble forzado ligero se utilizó una tolerancia entre ensambles, al maquinar las piezas con las medidas ideales y ensamblarlas en este caso embona con juego, para lo cual se realizaron pruebas con diferentes medidas buscando un ensamble con una calidad IT 15.

Las pruebas consistieron en maquinar pequeñas piezas de MDF con un rectángulo como orificio y un cuadrado como broche como se muestra en la Fig. 20, en el rectángulo se consideró como medida nominal el espesor del material.

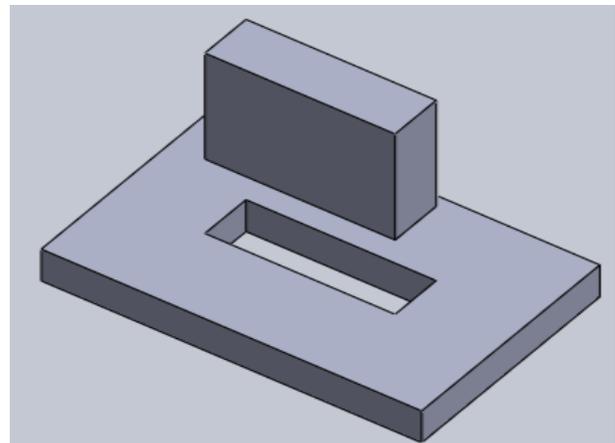


Figura 20 Prueba de ensamble
Fuente: Solidworks 2014

Análisis de elementos finitos

Para realizar el análisis de la estructura se utilizó SOLIDWORKS Simulation el cual permite utilizar el método de formulación de desplazamientos de elementos finitos para calcular desplazamientos, deformaciones y tensiones de los componentes con cargas internas y externas.

Para saber las regiones críticas de la estructura, es necesario realizar un análisis de las cargas axiales a las cuales se someterá el diseño, para lo cual se requiere una tabla de esfuerzo-deformación del material a analizar.

Para lograrlo se habilitó la pestaña simulación, en solidworks/ herramientas / complementos, de aquí se selecciona el botón Asesor de estudio, después elegir nuevo estudio como se ilustra en la Fig. 21.

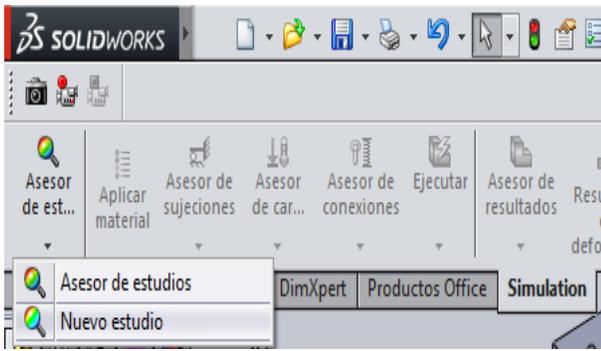


Figura 21 Nuevo estudio
Fuente: Solidworks 2014

Con esto se habilitan las funciones de simulación de este bloque. Lo siguiente es definir el material y sus características para incluirlos en el análisis, para esto se consideraron los datos del material MDF que se muestran en la Fig. 22.

Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2400000000	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0.29	N/D
Módulo cortante		N/m ²
Densidad de masa	850	kg/m ³
Límite de tracción		N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico	30000000	N/m ²

Figura 22 Datos necesarios para el análisis
Fuente: Solidworks 2014

Para el análisis se calcularon todas las cargas a las que va estar sometida la estructura, resumiéndose como se muestra en la Tabla 2.

Componente	Masa (gr)	Cantidad	Total
Controlador de motor	47	4	188
Controlador de vuelo	8.6	1	8.6
Hélices	20	4	80
Motor	47	4	188
Batería por celda	50	12	600
Total			1064.6

Tabla 2 Cargas consideradas para el diseño
Fuente: Diseño propio

Una vez determinados los pesos de cada una de las cargas consideradas, es necesario colocarlas en el diseño en forma puntual, es decir, colocar los pesos en la posición en donde se va a colocar los motores, baterías y controladores de motor y de vuelo. Visualizándose en la simulación de la estructura mediante flechas, como se muestra en las Figs. 23, 24 y 25.

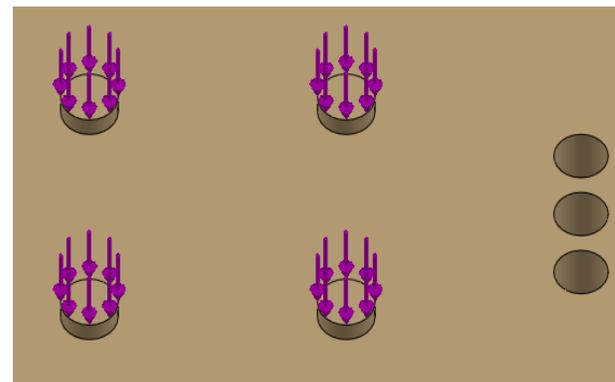


Figura 23 Colocación de carga de los motores
Fuente: Solidworks 2014

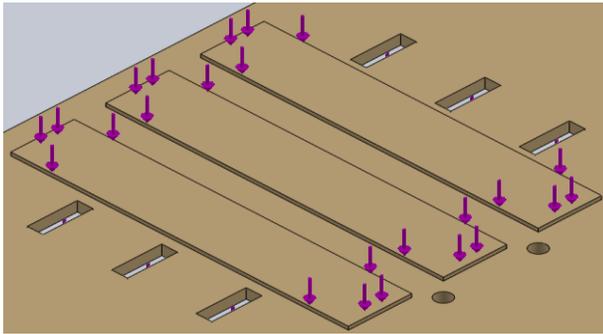


Figura 24 Colocación de carga de las baterías
Fuente: Solidworks 2014

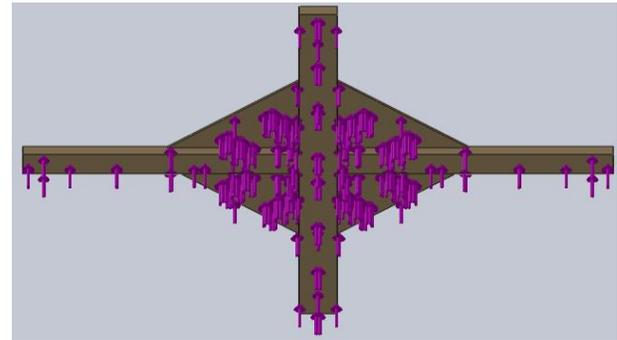


Figura 27 Sumatoria de cargas en la vista inferior
Fuente: Solidworks 2014

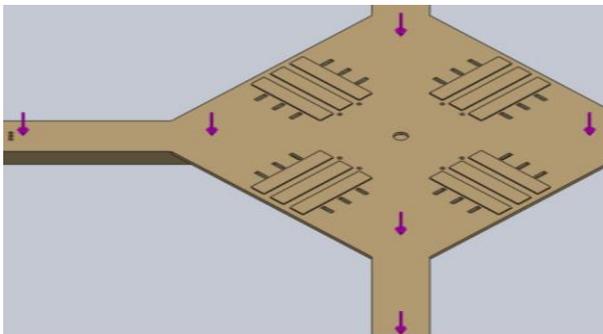


Figura 25 Colocación de carga de los controladores
Fuente: Solidworks 2014

Como siguiente paso, se definen las Sujeciones, es decir los puntos de la estructura que permanecerán fijas en la simulación. Para esto se consideran las cuatro geometrías fijas donde se colocan los motores, y también se considera una distribución uniforme del peso al que debe reaccionar la estructura, como se muestra en las Figs. 26 y 27.

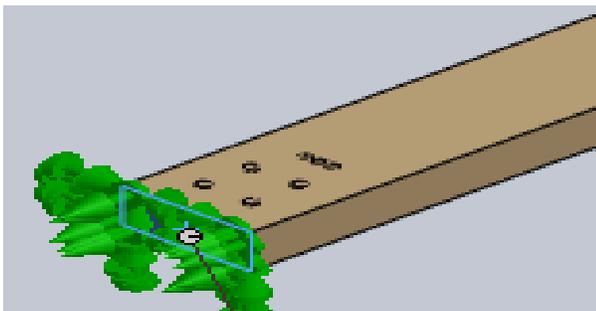


Figura 26 Sujeciones
Fuente: Solidworks 2014

Definición de mallas

Para nuestro diseño, se dividió el dominio en sub dominios, considerándose 73047 nodos y 36631 Elementos, formándose la malla que se muestra en la Fig. 28.

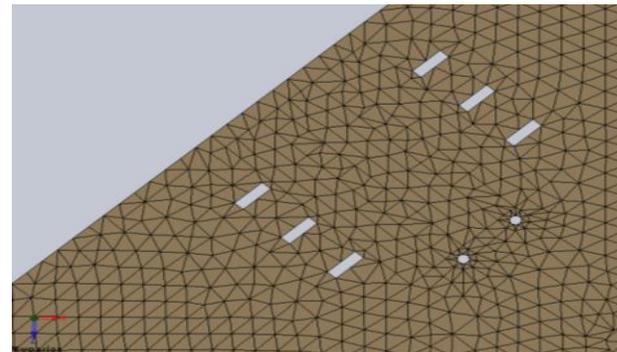


Figura 28 Mallado de la estructura
Fuente: Solidworks 2014

Criterio de máxima tensión de Von Mises

La tensión de Von Mises es una magnitud física proporcional a la energía de distorsión. En ingeniería estructural se usa en el contexto de las teorías de fallo como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles. La tensión de Von Mises puede calcularse fácilmente a partir de las tensiones principales del tensor tensión en un punto de un sólido deformable, mediante la expresión:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2}} \quad (1)$$

Siendo σ_1, σ_2 y σ_3 las tensiones principales, y habiéndose obtenido la expresión a partir de la energía de distorsión en función de las tensiones principales:

$$E_{def,dist} = \frac{1}{6G} \left[\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}{2} \right] \quad (2)$$

Igualmente, la superficie de fluencia de un material que falla de acuerdo con la teoría de fallo elástico de Von Mises puede escribirse como el lugar geométrico de los puntos donde la tensión de Von Mises como función de las tensiones principales supera cierto valor. Matemáticamente esta ecuación puede expresarse aún como el conjunto de puntos donde el invariante cuadrático de la parte desviadora del tensor tensión supera cierto valor. Mediante este criterio se realizó la simulación de la estructura, obteniéndose los resultados con el análisis del elemento finito, que se muestra en la Fig. 29.

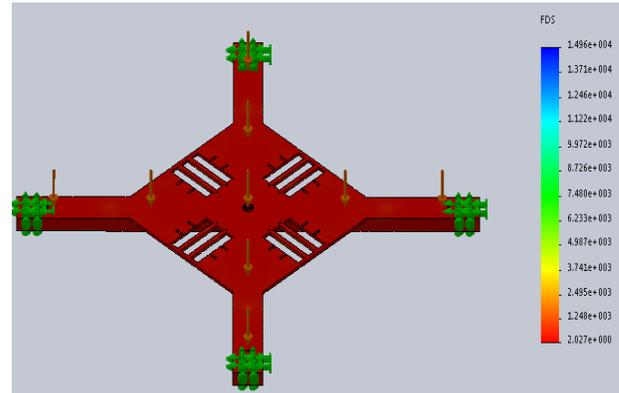


Figura 30 Factor de seguridad

Fuente: Solidworks 2014

Conclusiones

El estudio QFD nos permitió determinar las características técnicas y las herramientas necesarias para lograr un diseño funcional de la estructura de un VANT.

Mediante un software de diseño CAD fue posible realizar los planos del VANT en dos y tres dimensiones para analizarlos mediante la herramienta computacional del análisis del elemento finito, obteniéndose los siguientes resultados:

- Escala de deformación: 129. 299
- Deformación máxima: 454.761 micrómetros
- Nodo 439, 1.10127 N/mm² (MPa)
- Nodo 6309, 0.000928546 N/mm² (MPa)
- Factor de seguridad de 2

Por lo tanto, el diseño de la estructura en MDF soportara de forma segura la carga de los componentes del VANT.

En forma física se logró que los ensambles quedaran forzados ligeros considerando una calidad de IT 15.

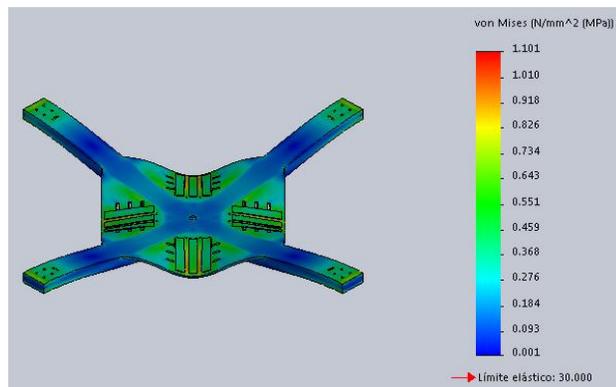


Figura 29 Resultados del análisis de Elemento finito

Fuente: Solidworks 2014

La Fig. 30 muestra el factor de seguridad una vez terminada la simulación con un valor mínimo de 2.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la DSA por el apoyo recibido mediante el programa PRODEP para la realización de este trabajo el cual es parte del proyecto de investigación con número de folio UPUR-PTC-004.

Referencias

- Bawa, H. S. H. S., Burghardt, H. D. A., BRIEVA, J. E. A., TR AXELROD, A. A. R. O. N., & Freyre, F. F. (2007). Procesos de manufactura (No. 62-11). McGraw-Hill.
- Beer, F. P., Johnston, E. R., & García, J. A. G. J. (1990). *Mecánica vectorial para ingenieros* (No. 968-422-565-2. 04-A1 LU. CG-12.). McGraw-Hill.
- Berry, T.H. Cómo gerenciar la transformación hacia la calidad total. McGraw-Hill Interamericana S.A. Bogotá, Colombia. 1992.
- Chase, R.B. y Aquilano, N.J. “Gestión de la producción y dirección de operaciones”. Editorial Hispano Europea. Barcelona, España. 1978.
- Chaudhry, H. (1987), Applied Hydraulic Transients 2nd Ed, van Nostrand Reinhold.
- Eschmann, C.; Kuo, C.; Kuo, C.; Boller, C. Unmanned aircraft systems for remote building inspection and monitoring. In Proceedings of the Sixth European Workshop on Structural Health Monitoring, Dresden, Germany, 3–6 July 2012.
- Feigenbaum, A.V. “Total quality control”. McGraw-Hill Book Company. Singapur. Singapur. 1987.
- Groover, M. P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. Pearson Educación.
- Guerra Jara, G. S. (2016). Sistema de diseño de VANTs (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay)
- Guerrero, M., Valderrábano, S., Campos, R., & Isasi, M. (1999). Aplicación del método de elemento finito al análisis nodal. *Ingenierías*, 2(3), 49.
- Juran, J.M. y Gryna, F.M. y Bingham, R.S. “Quality control handbook”. McGraw-Hill Book Company. USA. 1990.
- Koppány Mathé and Lucian Busoniu, Vision and Control for UAVs: A Survey of General Methods and of Inexpensive Platforms for Infrastructure Inspection, Sensors 2015, 15, 14887-14916
- MARTÍN, P. R. (2016). *Diseño y fabricación de un dron mediante impresión 3D* (Doctoral dissertation).
- Poblete, H. E. R. N. A. N., Loncomilla, E. R. N. E. S. T. O., & Inzunza, L. U. I. S. (2000). Densidad del tablero de partículas y estabilidad dimensional. *Bosque*, 21(2), 69-83.
- Shih, R. (2014). Introduction to Finite Element Analysis Using SolidWorks Simulation 2014. SDC publications