

Diseño de un banco de pruebas para el estudio de daños causados por fod's*

Design of a Test Bench for the Study of Damage Caused by Fod's

Recibido: 19 de octubre de 2016 - Aceptado: 10 de febrero de 2017

Para citar este artículo: F. Merchán, D. Boca, J. Rojas «Diseño de un banco de pruebas para el estudio de daños causados por fod's», Ingenium, vol. 18. n.º 36, pp 26-43, junio de 2017.



Fabio Alejandro Merchán Rincón**
David Steven Bocarejo Ibáñez***
Jhoham Josué Rojas Pulido****

Resumen

La industria Aeronáutica Colombiana actualmente está enfocada en la reparación de componentes, afectados por el impacto de objetos extraños durante su ciclo normal de vuelo, con el propósito de mantener una aeronavegabilidad continuada; por ello, es importante conocer los daños posibles que pueden ocurrir en la aeronave producto de su impacto con el objeto extraño (FOD). por lo anterior, se diseñó un banco de pruebas que recreará los daños y afectaciones en la estructura, simulando el impacto en una planta alar y su reparación correspondiente. Para ello, se propuso cuatro diseños, los cuales a través del análisis de matriz de decisión se fueron descartando hasta obtener el diseño adecuado de acuerdo a las características técnicas buscadas, para luego realizar su correspondiente análisis bajo elementos finitos y conocer su comportamiento de resistencia estructural

* Artículo de investigación, producto derivado del proyecto de investigación: Diseño preliminar de un banco de pruebas para reparaciones aeronáuticas causadas por objetos extraños FOD's, del grupo AEROTECH de la Universidad de San Buenaventura, Bogotá, llevado a cabo entre el 2015-2016

** CM. Sc en materiales y procesos, Universidad Nacional de Colombia; Especialista en Aviónica, Universidad de San Buenaventura, Bogotá; E-mail: fmerchan@usbbog.edu.co

*** Estudiante Ingeniería Aeronáutica; Universidad de San Buenaventura, Bogotá; E-mail: dbocarejo@academia.usbbog.edu.co

**** Ingeniero Aeronáutico; Universidad de San Buenaventura, Bogotá; E-mail: jjrojas@academia.usbbog.edu.co

durante operación, terminando con las sugerencias de reparación de acuerdo a normatividad aeronáutica. Se diseñó y simuló cada uno de los elementos del banco de pruebas seleccionado, con base en criterios de diseño como resistencia estructural, facilidad para encontrar partes, facilidad de manejo, variabilidad de peso, control de la velocidad de impacto, exactitud de impacto, seguridad operacional, ergonomía, costo, durabilidad y confiabilidad. El análisis estructural realizado permitió encontrar que los esfuerzos producidos por las cargas aplicadas en el banco no estaban por encima de las propiedades mecánicas de los materiales seleccionados, garantizando su integridad estructural durante servicio.

Palabras clave

Daño por objetos extraños (DOE), pruebas destructivas, banco de pruebas, impacto, reparación mayor, mantenimiento aeronáutico.

Abstract

Colombian Aeronautic Industry is currently focused on the repair of components, affected by the impact of foreign objects during its normal cycle of flight in order to maintain a continued airworthiness, therefore, is important to know the possible damage that may occur in the aircraft by the impact with foreign object (FOD), whereby, the design a bench test that recreated affectation and damages in the structure simulating the impact on a wing structure and its corresponding repair. To this end, proposed four designs, which one were analyzed through decision matrix until find the appropriate design according to the desired technical characteristics, then make an analysis under finite element to know its structural strength during operation, ending with the suggestions of repair according to aviation regulations. It was designed and simulated each one of the elements of the selected bench test, based on design criteria such as structural strength, ease to find parts, ease of handling, weight variability, the speed of impact, accuracy of impact, safety, ergonomics, cost, durability and reliability. The structural analysis allowed to find that stress produced by the loads applied at the bench test were not over the mechanical properties of the selected materials, ensuring their structural integrity during service.

Key words

Foreign Object damage (FOD), destructive test, bench test, impact, major repair, aeronautic maintenance

Introducción

Actividades como reparación y mantenimiento tienen la finalidad de mantener el certificado tipo de cualquier aeronave para conservar una aeronavegabilidad continuada, además, de un estado de servicio y operación seguro y confiable. Muchas veces este certificado se ve afectado por el impacto de objetos extraños, permitiendo así plantear el diseño de un banco que recree efectos adversos en la estructura, comenzado por el diseño de la estructura que permita dicho fin, en donde sean montadas diferentes plantas alares. Por ello, en este diseño se contemplan aspectos como el mantenimiento, comenzado con

el mantenimiento predictivo, en donde cabe destacar la metodología por subconjuntos operacionales (se le llama así porque se caracterizarán por los valores funcionales de los elementos como pares cinemáticos) (Colmenares & Villalobos, 2014) y el mantenimiento correctivo en donde algún elemento, mecanismo o pieza de la máquina ha fallado y es necesario su reparación o modificación, hechos que se debe incluir en la selección del banco de pruebas.

El ala de la aeronave es una de las partes vitales para el vuelo exitoso de una aeronave, en donde cualquier daño en la estructura o piel de la misma, conllevaría a consecuencias catastróficas, así que su buen diseño es pieza fundamental porque determina muchas veces la carga útil, el rango de la aeronave (Urbano, 2011), trenes de aterrizaje, superficies de control, entre otros, como se ve reflejado en el estudio hecho por “The Boeing Company” que revela un crecimiento en las reparaciones causadas por impactos de FOD y estima el costo de las mismas para la industria aeroespacial alrededor de USD \$4'000.000 (Bachtel, 2004). Asimismo, los daños generados en las diferentes partes de las aeronaves deben ser tratados de una manera precisa y controlada, con la finalidad de no afectar la aeronavegabilidad y seguridad operacional de la aeronave, lo cual produce la necesidad de conocer técnicas y métodos para satisfacer estos intereses globales que dirijan la industria hacia la prevención, estudio y reparación de elementos estructurales afectado por FOD.

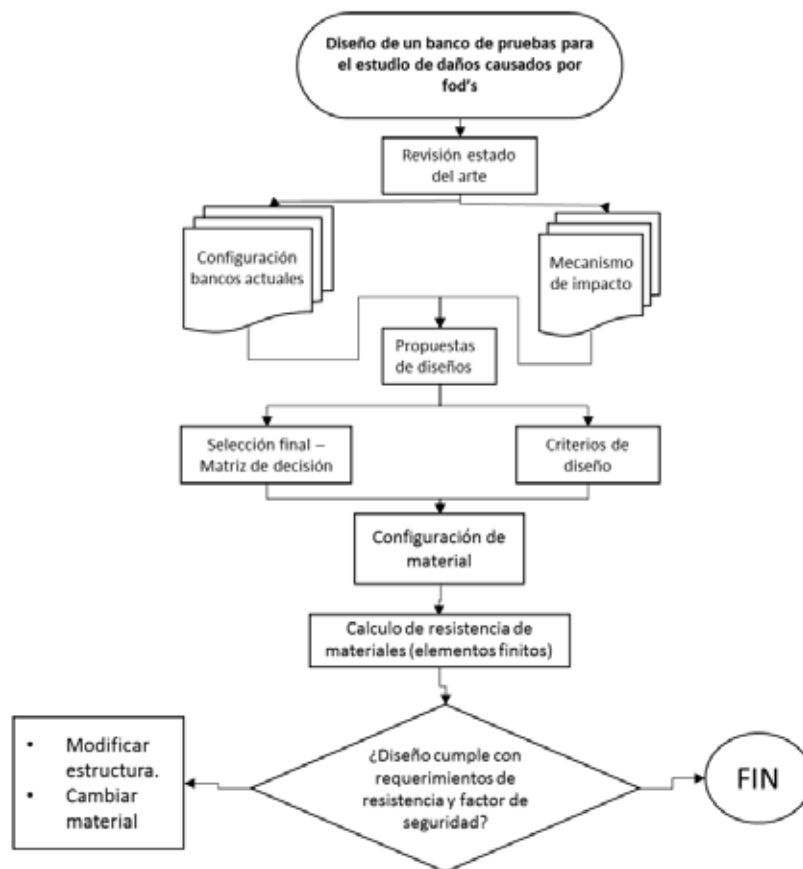
Investigando en la clasificación, métodos de prevención y daños provocados por FOD, un tema de interés global, la FAA (Federal Aviation Administration, 2010), bajo la AC (advisory circular) 150/5210-24 – «Airport Foreign Object Debris Management», provee una guía para desarrollo, gestión y equipo de remoción de FOD, encontrando que en la actualidad no existe un banco que haya sido diseñado para la recreación de los mismos, en donde se puedan observar las consecuencias estructurales producidas por impactos, situación que justificó la idea de desarrollar un banco de pruebas para estudiar los efectos estructurales de los FOD sobre las plantas alares.

Con base en lo anterior, se diseñó un banco de pruebas hasta su fase preliminar en el cual se recrean impactos por FOD, siendo establecida la masa y la velocidad de impacto como constantes al inicio de cada prueba. Para la correcta aplicación de las pruebas se escogió un ala base (Támara, Bolaños, & Jimenez, 2010), la cual se encuentra ensamblada a la estructura principal del banco, por medio de sujeciones removibles que permiten una posición de cantiléver que simula la unión ala-fuselaje. De igual manera, se desarrolló un mecanismo que brinda precisión en las pruebas recreadas, ya que simula el impacto al cual puede estar sometida la estructura alar en cualquier instante de su vida útil.

I. Materiales y métodos

Para el diseño del banco se propuso la metodología mostrada en el diagrama 1, en donde se muestra específicamente los pasos a seguir en el proceso de diseño.

Diagrama 1. Metodología de diseño propuesta



Fuente: elaboración propia 2017

A. Requerimientos de la prueba de diseño (request for proposal, RFP)

- El banco de pruebas debe ser diseñado para recrear un impacto por FOD para la estructura alar diseñada por Sahily Tamara y Camilo Bolaño (2010) caracterizada en el trabajo de grado desarrollado por (Merchán, Bocarejo, & Rojas, 2016), sección 2.2.20.
- El banco no tendrá en cuenta cargas generadas en el ala causadas por el comportamiento aerodinámico de la geometría de la misma; como fuerza de sustentación (Lift), resistencia al avance (Drag), momentos de torsión (M), o cualquier tipo de deformación producida por las mismas.
- La masa máxima de FOD que se debe asumir para impactos en fase de crucero es la masa de un ave promedio (2,5 Kg).

- Las velocidades de operación que se deben tener en cuenta para diseñar las pruebas de impacto son velocidad de crucero, velocidad de despegue (1,1 veces velocidad de pérdida) y reposo que están descritas en la sección 2.2.20 del trabajo de grado desarrollado por (Merchán, Bocarejo, & Rojas, 2016).
- El proceso de diseño debe ser llevado hasta un diseño preliminar, contemplando selección de materiales, cálculos estáticos y estructurales, simulaciones, planos de ingeniería, factores de seguridad y cálculos de soldadura.
- El mecanismo debe ser capaz de recrear la energía máxima producida en un impacto a velocidad de crucero ((Merchán, Bocarejo, & Rojas, 2016) sección 2.2.20) con un FOD de masa 2,5 Kg.
- El banco debe tener la capacidad de llegar a los puntos de impacto más comunes de un FOD debido al ángulo de incidencia del flujo de aire con respecto al ala como se observan en la figura 1, figura 2 y figura 3 según las características operativas del ala seleccionada descrita en la sección 2.2.20 del trabajo de grado realizado por (Merchán, Bocarejo, & Rojas, 2016).

Figura 1. Sección de impacto de FOD en descenso

Figura 2. Sección de impacto de FOD en ascenso



Figura 3. Sección de impacto de FOD en crucero



Fuente: elaboración propia 2017

B. Alternativas de solución

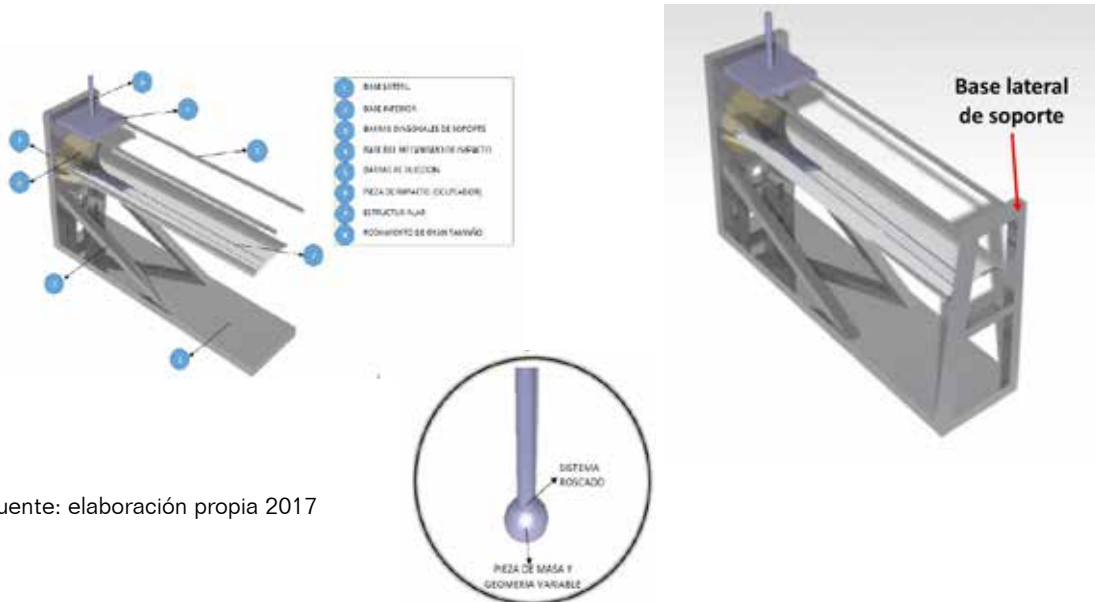
A continuación, se mostrará la descripción de los diseños propuestos, los cuales surgieron con base en la revisión del estado del arte para luego ser analizados bajo matriz de decisión.

Diseño 1

El primer diseño (figura 4) está compuesto por dos secciones principales hechas en perfil de acero estructural; la primera es la columna donde se empotrará la estructura alar por medio de un rodamiento y la segunda es la base del banco; adicional a ello, cuenta con un mecanismo masa-resorte para simular el impacto del objeto extraño. Estas piezas estarán acopladas de forma tal, que la unión base-columna proporcione una junta de noventa grados y estarían interconectadas por medio de tornillería de alta resistencia mecánica.

Figura 4 Vista Isométrica del diseño 1

Figura 5 Vista Isométrica del diseño 2



Fuente: elaboración propia 2017

Diseño 2

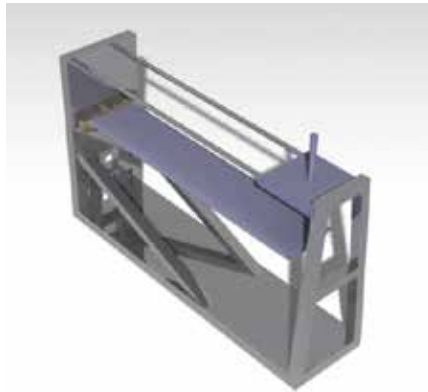
El diseño dos (figura 5) está basado en la primera alternativa de solución donde se mantiene la estructura principal. El cambio realizado se presenta en la viga que soporta los ejes guías que permiten el traslado del mecanismo de impacto a lo largo de la envergadura alar (base lateral de soporte), ya que en esta sección se presentan altos esfuerzos flectores producidos por el peso de la masa de impacto, que van aumentando o disminuyendo en función del desplazamiento axial del mecanismo.

Diseño 3

El diseño tres (figura 6) está basado en el diseño anterior. Pero se observó que el rodamiento de gran tamaño no está estandarizado, por lo que debería ser diseñado y construido; por esta razón, se reemplazó con una estructura denominada disco rotador (figura 7), que se empotra en la columna principal por medio de un rodamiento de un tamaño estándar; permite unir en cantiléver la estructura alar y variar el ángulo de ataque del ala.

Figura 6. Vista Isométrica, diseño 3.

Figura 7. Disco Rotador



Fuente: elaboración propia 2017

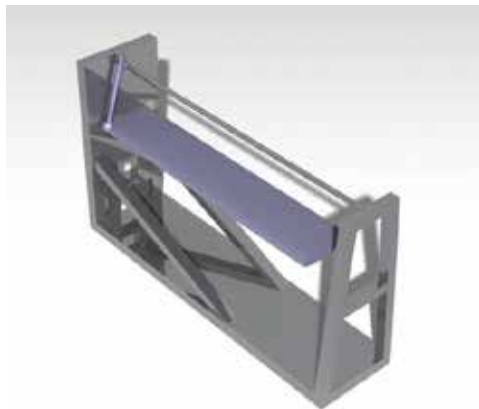


Diseño 4

El diseño 4 (figura 8), se caracteriza porque soluciona los inconvenientes presentados en las máquinas uno, dos y tres anteriormente mencionadas, pero considerando un cambio en el sistema de impacto para simular el objeto extraño. Se cambió el mecanismo masa-resorte por un mecanismo basado en el ensayo de impacto tipo Charpy (figura 9), el cual funciona por medio de un principio similar al de un péndulo y también es ampliamente utilizado para pruebas de impacto en la industria.

Figura 8. Vista Isométrica, diseño 4

Figura 9. Mecanismo de impacto pendular



Fuente: elaboración propia 2017



C. Análisis bajo matriz de decisión

A continuación (tabla 1), se relaciona con los criterios de diseño (Merchán, Bocarejo, & Rojas, 2016) que se tuvieron en cuenta con su respectivo valor de importancia durante

el proyecto; cabe aclarar que la ponderación dada fue producto del análisis de ingeniería realizado por el grupo investigador.

Tabla 1. Criterios de diseño y ponderación

CRITERIO DE DISEÑO	VALOR PONDERADO (%)
Resistencia estructural	8
Accesibilidad de repuestos	7
Facilidad de manejo	7
Variabilidad de la masa de impacto	8
Control de la velocidad de impacto	8
Exactitud en el impacto	14
Seguridad operacional	15
Ergonomía	8
Costo	7
Durabilidad	8
Confiabilidad	10
TOTAL	100

Fuente: elaboración propia 2017

Los rangos de satisfacción que ofrece cada alternativa de solución fueron clasificados como: excelente (9-10), bueno (7-8), aceptable (5-6), malo (3-4) e inaceptable (1-2) (Seyyed Khandani, 2005). Así mismo, se relaciona con la descripción hecha a cada diseño (Merchán, Bocarejo, & Rojas, 2016) por medio de la Tabla 2, donde se obtienen que el diseño con mayor satisfacción para todos los criterios establecido es el cuarto con una puntuación del 74,6%; se continuará el proceso de diseño con esta selección hasta llegar a su diseño preliminar.

Tabla 2. Análisis bajo matriz de decisión

Diseño		Diseño 1		Diseño 2		Diseño 3		Diseño 4	
Resistencia estructural	8%	4	0,32	7	0,56	7	0,56	7	0,56
Accesibilidad de repuestos	7%	4	0,28	4	0,28	6	0,42	8	0,56
Facilidad de manejo	7%	6	0,42	6	0,42	7	0,49	8	0,56
Variabilidad de la masa de impacto	8%	6	0,48	6	0,48	6	0,48	8	0,64
Control de la velocidad de impacto	8%	5	0,4	5	0,4	5	0,4	9	0,72
Exactitud de impacto	14%	9	1,26	9	1,26	9	1,26	7	0,98
Seguridad operacional	15%	8	1,2	8	1,2	8	1,2	8	1,2
Ergonomía	8%	6	0,48	6	0,48	6	0,48	5	0,4
Costo	7%	3	0,21	3	0,21	5	0,35	8	0,56
Durabilidad	8%	3	0,24	5	0,4	5	0,4	6	0,48
Confiabilidad	10%	6	0,6	6	0,6	7	0,7	8	0,8
Total Matriz		5,89		6,29		6,74		7,46	
Total %	100%	58,9		62,9		67,4		74,6	

Fuente: elaboración propia 2017

D. Dimensiones generales

La altura y el ancho establecidos son $\overline{160\text{ cm y }70\text{ cm}}$ respectivamente, debido a que el promedio de la estatura en Colombia es $\overline{170\text{ cm}}$ y el alcance promedio máximo frontal que tiene un colombiano son 74 cm (Sociedad Colombiana de Ergonomía, 2011). Con respecto a esto se restringe con el fin de disminuir la posibilidad de lesión física para el operador en

el momento del uso del banco causada por algún tipo de movimiento no natural que haga para poder tener una completa maniobrabilidad del banco.

Estas dimensiones se pueden observar en la Figura 10 y Figura 11. La columna estará diseñada en perfil estructural hueco (HSS), por sus propiedades geométricas que permiten soportar cargas de flexión y torsión (Mott, 2006). Asimismo, el largo del banco de pruebas está directamente relacionado con la envergadura de la estructura alar (2.55 m) como se observa en la Figura 12.

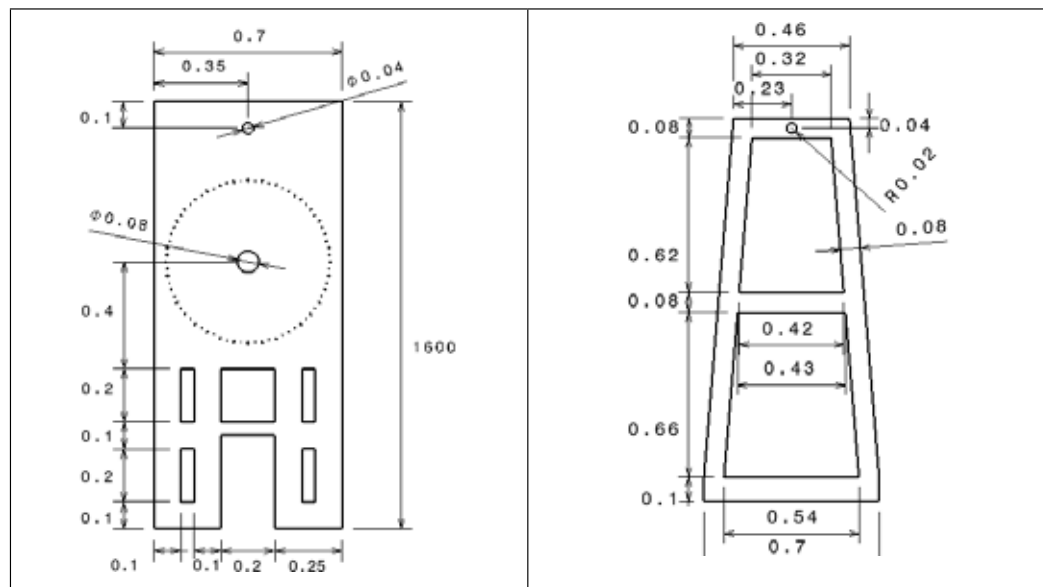
E. Uniones

Columnas – piso

La parte inferior de cada columna estará unida a la base principal por medio de tornillos de alta resistencia, para poder transmitir los esfuerzos estructurales; de esta manera en el momento en que la estructura esté sobrecargada los mismos sirvan de fusibles y sean los que sufran la falla, haciendo que el mantenimiento o reparación del banco sea minimizado al cambio de tornillería. Los agujeros y ubicaciones de la tornillería se desarrollaron basados en la Circular Informativa 43.13-1B (Federal Aviation Administration, 1998) y su disposición se observa en la Figura 13.

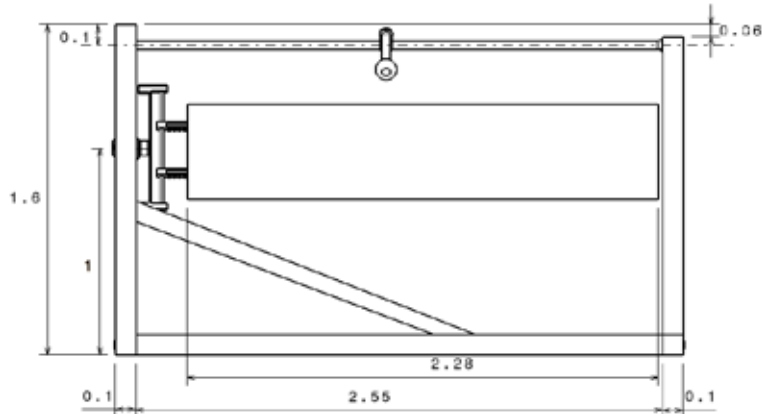
Figura 10. Dimensiones de la columna principal

Figura 11. Dimensiones de la columna auxiliar



Fuente: elaboración propia 2017

Figura 12. Dimensiones de largo del banco de pruebas



Fuente: elaboración propia 2017

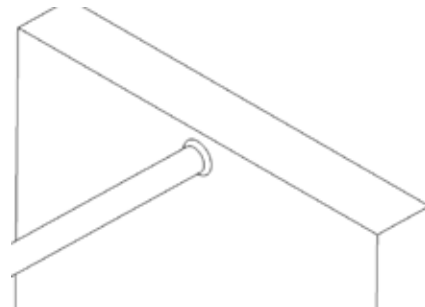
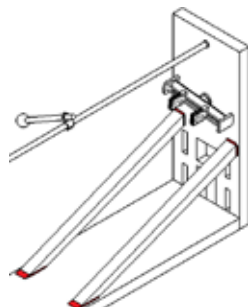
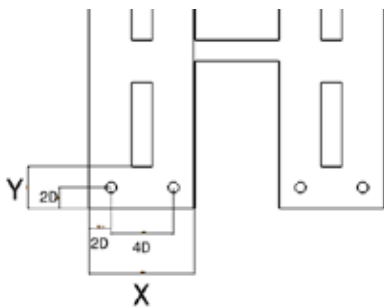
Columna principal-barras inclinadas-piso

La base y la columna principal estarán unidas por medio de dos barras inclinadas, permitiendo al banco tener una rigidez estructural alta y las cargas de flujo cortante se trasladen desde la columna principal hacia la base del banco, estarán unidas por medio de un cordón de soldadura tipo MIG (ARATEC Ingeniería, 2011) como se ve en la Figura 14, con el fin de asegurar que todos los componentes tengan el mismo esfuerzo aplicado, y se observa que el factor de aprovechamiento es menor al 1% lo que hace altamente confiable la junta.

Figura 13. Ubicación de agujeros para tornillería

Figura 14. Ubicación de la soldadura Columna principal-Barras inclinadas-Piso

Figura 15. Ubicación de la soldadura. Columna principal-Eje guía



Fuente: elaboración propia 2017

Columna principal-eje guía-columna auxiliar

La barra guía superior estará unida por medio de soldadura tipo MIG a la columna principal del banco, lo cual caracteriza esta junta como unión permanente como se observa en la figura 15 (ARATEC Ingeniería, 2011). De otro modo, la sujeción que existirá entre

la barra guía y la columna auxiliar, será de tipo removible, ya que se unirán por medio de tornillería, como se observa en la figura 16 (Federal Aviation Administration, 1998).

Figura 16 Ubicación de tornillería
Columna auxiliar-eje guía

Figura 17 Ubicación de agujeros
en la mordaza

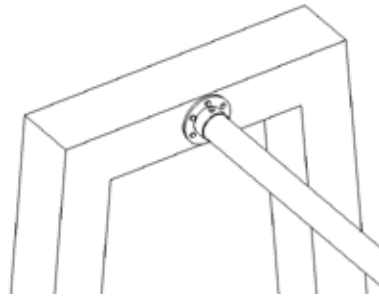
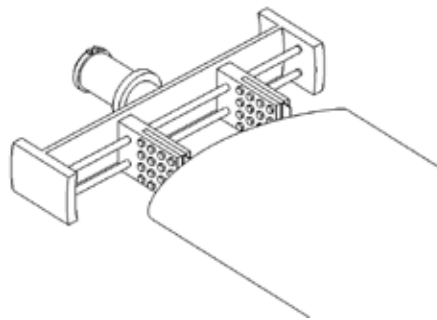
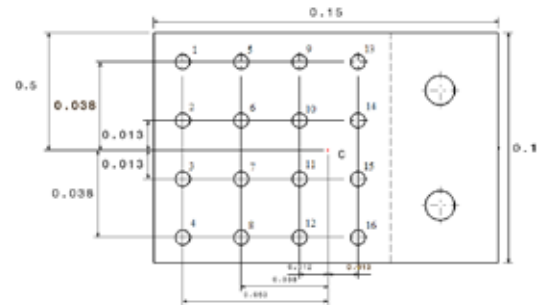


Figura 18 Sujeción Estructura alar-mordaza



Fuente: elaboración propia 2017

Mordaza-estructura alar

La sujeción entre las mordazas y la estructura alar se realizó por sujeción removible (Federal Aviation Administration, 1998), y se obtuvo una cantidad de 16 tornillos, como se observa en la figura 17 y se ajustan como se observa en las figuras 18.

F. Mecanismo de impacto

El mecanismo de impacto estará compuesto por un anillo bidireccional, un vástago variador de longitud y la masa; con lo que se recreará el golpe por un objeto extraño FOD. Este mecanismo está basado en el diseño de pruebas de tenacidad tipo Charpy; ya que funciona basado en los principios del péndulo simple.

Masa de impacto (Figura 9-A)

Tiene como principal objetivo el contacto directo con la estructura alar; además, debe combinar de manera funcional el peso y velocidad de impacto para ser eficiente y generar

la deformación necesaria. Esta se estableció en tres valores $[83\text{ Kg}, 37\text{ Kg y } 1\text{ Kg}]$, para las condiciones de crucero, despegue y estático en tierra respectivamente.

Anillo bidireccional (Figura 9-B)

Tiene como función principal permitir el movimiento relativo entre el péndulo de impacto y la estructura alar; con el fin de tener exactitud de impacto en lugares específicos donde las pruebas se vayan a realizar y está manufacturado en una sola pieza.

Vástago (Figura 9-C)

Tiene longitud variable en los valores $[27;30;40;50;60;70\text{ cm}]$ para realizar el impacto y poder obtener la energía necesaria para recrear el choque con un ave a una velocidad crucero de 30 m/s o un impacto de una herramienta de un técnico a corta distancia.

G. Selección de materiales

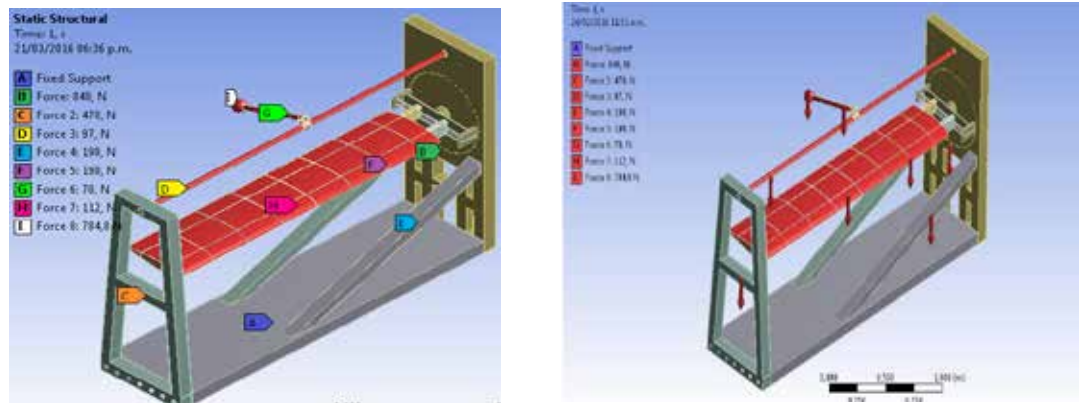
Se desarrolló un primer análisis en Ansys Workbench (Mechanical), con el fin de obtener el esfuerzo máximo en la estructura (Von-Misses) para así tener una base de partida para la selección de materiales final. El esfuerzo bajo el criterio de Von-Misses se ha tomado como base, debido a que este depende básicamente de la geometría expuesta a cargas y esfuerzos, mas no del material de constitución de la pieza (Boresi & Schmidt, 2003). Las cargas utilizadas son las que se observan en la tabla 3 y están aplicadas según figura 20.

Tabla 3 Cargas estáticas aplicadas al banco de pruebas

Cargas estáticas del banco			
Convención	Lugar de aplicación	Carga [N]	Tipo de fuerza
A	Piso de banco	N/A	Soporte fijo
B	Columna principal	840	Fuerza en superficie
C	Columna secundaria	470	Fuerza en superficie
D	Barra guía mecanismo de impacto	97	Fuerza en superficie
E	Barras inclinadas 1	190	Fuerza en superficie
F	Barra inclinada 2	190	Fuerza en superficie
G	Mecanismo de impacto	70	Fuerza en superficie
H	Estructura alar	112	Fuerza en superficie
I	Masa de impacto 1	784,8	Fuerza en superficie
	Masa de impacto 2	196,2	Fuerza en superficie
	Masa de impacto 3	49,05	Fuerza en superficie

Fuente: elaboración propia 2017

Figura 20 Cargas aplicadas en el banco de pruebas



Fuente: elaboración propia 2017

El valor del esfuerzo equivalente que se obtuvo fue de $\overline{87,6 MPa}$, al cuál se le aplica un factor de seguridad de $\overline{1,51,5}$ utilizado en la industria aeronáutica y se obtiene un valor de $\overline{56,4 MPa}$, siendo este el valor de mínimo esfuerzo de fluencia con el que se debe llevar a cabo la selección de materiales. Para el proceso de selección se analizaron diferentes materiales que se utilizan en la fabricación de maquinaria, como se observa en la tabla 4. Considerando la relación resistencia/peso debido a que el banco deberá ser movido por un solo operario y estará expuesto a cargas, esfuerzos y deformaciones que demandarán alta rigidez y resistencia a la tracción, entre otras propiedades mecánicas de los materiales. Con los materiales preseleccionados se realizó un estudio denominado «Criterio por índice de mérito» (Ashby & Jones, 2008), donde los materiales óptimos encontrados fueron Acero estructural $\overline{A36}$, Aleación de acero $\overline{S275}$ y acero de herramienta $\overline{L2}$.

Tabla 4 Análisis de propiedades mecánicas de materiales usados en la fabricación de maquinaria

MATERIAL A SER EVALUADO	Propiedad mecánica	Modulo de elasticidad E(Mpa)	Esfuerzo último G(Mpa)	Densidad (kg/m3)	Elongación %	costos (peso*m2)	Esfuerzo de fluencia (Mpa)	coeficiente de selección individual	Efectividad total del material (%)
	factor de importancia	5	5	3	5	5	5		
Aleaciones de aluminio forjado	6061-0	1	1	1	4	5	1	63	45
	2024-T851	1	3	1	2	5	3	73	52
	2014-T6	1	3	1	1	5	3	68	49
	6061-T6	1	2	1	5	5	2	78	56
	7075-T651	1	3	1	5	5	3	88	63
	7178-T651	1	3	1	5	5	3	88	63
Aleaciones de cobre	C83400	2	1	5	4	5	1	91	65
Aleación de titanio	Ti-6Al-4V	2	5	2	4	4	2	91	65
Aleaciones de acero	Estructural A36	5	2	5	4	5	2	105	75
	Inoxidable 304	5	3	5	1	5	1	90	64
	Herramienta L2	5	4	5	4	5	3	120	86
	S275	5	2	5	5	5	2	110	79
MATERIAL IDEAL		5	5	5	5	5	5	140	100

Fuente: elaboración propia 2017

H. Selección de tornillería

Se determinó por medio del estándar industrial (Normalización ISO), las características óptimas de los tornillos que se deben utilizar en cada junta removible del banco de pruebas, como se observa en la tabla 5 y 6, ya que se conoce el tamaño nominal de los agujeros. Con el fin de aumentar la confiabilidad y evitar exceder el esfuerzo máximo permitido de cada tornillo, se seleccionará la calidad con respecto a los resultados de la simulación ANSYS para evitar perder sus propiedades mecánicas y el torque de apriete se escogerá según la norma para tornillos de calidad 4.6 (NORMA ISO 898 – 1,2009) para que la junta esté acorde a la resistencia global del banco. Asimismo, se observa en la Tabla 7 el esfuerzo que está soportando cada tornillo y el torque de apriete.

Tabla 5 Tornillería del banco

Tornillo	Descripción	Cantidad	Diámetro (mm)	Tipo de rosca	Paso (mm)
1	Tornillo base del banco de pruebas	11	25	Ordinaria	3
2	Tornillo de mordazas	32	6	Fina	0.75
3	Plato de sujeción barra guía del mecanismo de impacto y Columna auxiliar	6	4.5	Fina	0.5
4	Sujeción barra guía del mecanismo de impacto y Plato	1	6	Fina	0.75
5	Pasante del mecanismo de impacto	1	5	Fina	0.5
6	Unión vástago y Masa de impacto	1	40	Ordinaria	4

Fuente: elaboración propia 2017

Tabla 6 Características de la tornillería del banco.

Diámetro (mm)	Diámetro medio (mm)	Tornillo		Tuerca		Longitud de Rosca (mm)
		D. Valle (mm)	Área (mm ²)	D. Mayor (mm)	D. Menor (mm)	
4.5	4.17	3.8	11.32	4.55	3.85	14
5	4.67	4.3	14.5	5.05	4.35	18
6	5.51	4.94	19.2	6.08	5.03	18
25	22.05	19.78	307	25.32	20.10	61
40	36.4	33.37	875	40.43	33.80	N/A

Fuente: elaboración propia 2017

Tabla 7 Esfuerzo soportado por la tornillería y torque de apriete

Tornillo	Esfuerzo aplicado (MPa)	Esfuerzo con factor de seguridad (MPa)	Calidad seleccionada	Esfuerzo Ultimo (MPa)	Esfuerzo de fluencia (MPa)	Torque aplicado (Nm)
M24UNC3	3,9	5,85	4.6	400	240	230,5
M6UNF0.75	0,96	1,44	4.6	400	240	3,43
M4.5UNF0.5	22,5	33,75	4.6	400	240	1,5
M6UNF0.75	25	37,5	4.6	400	240	3,43
M5UNF0.5	52	76,5	4.6	400	240	1,96

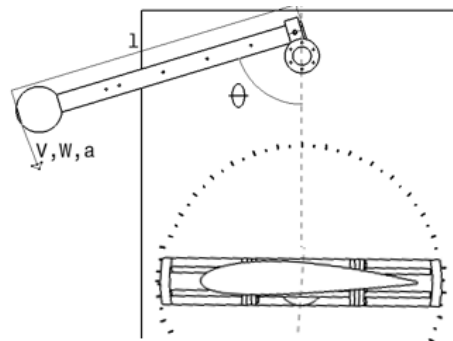
Fuente: elaboración propia 2017

I. Pruebas de impacto

La metodología de impacto está basada en un ensayo dinámico inventado por Georges Charpy en el cual se busca comprobar la tenacidad de un material metálico y observar su comportamiento. En este caso, el impacto se reproduce en la estructura alar golpeándola en un punto específico seleccionado por el operario, acorde al manual de operaciones

del banco. La masa de impacto previamente escogida y ubicada, se preparará de forma angular de su posición de equilibrio estático, para configurar el banco con los parámetros iniciales de la prueba que se va a recrear, como se observa en la figura 21, ya que con estas condiciones se determinará la correcta configuración del banco de pruebas y así se podrá simular de manera adecuada el impacto y se estudiará el daño generado por el mismo; los parámetros físicos de energía, fuerza, velocidad, entre otros, se calculan basados en el comportamiento de un péndulo (Smith & Hashemi, 2006). El operario del mecanismo de impacto y en general del banco debe contar con la seguridad industrial adecuada, como lo es tapa oídos ya que los niveles de presión sonora están condicionados a un periodo de exposición, según el cual pueden causar más o menos daño (Herrera, Casas, & Guevara, 2013), protección ocular (gafas de protección) y overol.

Figura 21 Configuración inicial del mecanismo de impacto para recrear la prueba



Fuente: elaboración propia 2017

J. Reparación de una estructura alar expuesta a un FOD.

Las reparaciones estructurales que se describen son sugeridas para componentes que no están contenidos bajo un manual de reparación estructural (SRM) (Merchán, Bocarejo, & Rojas, 2016).

Reparación de las costillas del ala

Las costillas de aleación de aluminio deben ser reparadas por medio de la adición del material adecuado, para producir un reforzamiento de la estructura y aumento de la resistencia mecánica (Federal Aviation Administration, 1998).

Bordes de fuga del ala

La reparación del ala y superficies de control debe ser correctamente ejecutada y los empalmes deben ser reforzados para evitar concentradores de esfuerzos. La forma apropiada de la reparación se observa en la CI 43.13-1B (Federal Aviation Administration, 1998).

Reparación de piel dañada

En los casos donde la piel está dañada de forma extensiva, debe ser totalmente reemplazado el panel del miembro estructural afectado. Es importante tener en cuenta las

líneas de remachado, ya que deben ser manufacturadas con respecto a las costillas y vigas principales que puedan estar afectadas (Federal Aviation Administration, 1998).

II. Resultados y discusión

Análisis estructural

En el análisis de elementos finitos hecho para el banco de pruebas, se tuvo en cuenta la variación de los materiales (acero estructural $A36$, acero para herramientas $L2$, aleación de acero $S275$), seleccionados según tabla 4, los resultados de los análisis se observan en la Tabla 8.

Tabla 8 Resultado del análisis estructural del banco de pruebas

MATERIAL	DEFORMACIÓN TOTAL (cm)	ESFUERZO EQUIVALENTE (MPa)	FACTOR DE SEGURIDAD
ACERO ESTRUCTURAL A36	1,1	56,4	6,64
ACERO DE HERRAMIENTA L2	1,1	56,4	>10
ALEACIÓN DE ACERO S275	1,1	56,4	2,58

Fuente: elaboración propia 2017

Este análisis dio como resultado que el material que se comportaba de manera más eficiente es la *aleación de acero $L2$* , ya que presenta un factor de seguridad mayor a 10 el cual es superior respecto a los otros dos materiales analizados. Luego de haber realizado las simulaciones necesarias, con el software de análisis de elementos finitos Ansys Workbench (Mechanical), en la tabla 9 se realiza una síntesis de resultados.

Tabla 9 Resultados estructurales obtenidos con Ansys Workbench

Parámetro	Descripción
Deformación total	Este parámetro estudia los cambios dimensionales que sufre cualquier eslabón o componente de la máquina al estar sometido a cargas externas; en este caso específico se encontró que la máxima deformación del banco de pruebas en la condición operativa crítica se verá reflejada en el extremo del vástago que hace unión con las masas de impacto (83 kg). Esto debido a que dicha masa se encuentra en una posición de cantiléver con respecto a la barra guía, provocando un momento flector lo suficientemente elevado para que en este punto se genere la máxima deformación, siendo esta de 1.1 cm, lo cual es aceptable ya que su deformación unitaria es de 1,5%.
Esfuerzo equivalente (Von-Misses)	El esfuerzo equivalente de Von Misses propone por medio de su criterio de falla que un material dúctil sufre fallo elástico cuando la energía de distorsión elástica rebasa cierto valor. Lo que significa que de cierto modo por medio de dicho criterio se obtiene la ubicación y valor del máximo esfuerzo capaz de soportar la estructura sin sufrir deformación elástica considerable o plástica. Al aplicar el estudio de Von-Misses sobre el banco de pruebas se obtuvo que el esfuerzo máximo aplicado es de $106,4\text{ MPa}$, ubicado en la unión del vástago y el tornillo pasante.
Esfuerzo principal máximo	Cuando se realizaron los análisis para obtener los esfuerzos internos en el punto crítico del banco de pruebas, se analizó el estado de esfuerzos por medio de elementos finitos para determinar si algún elemento ya diseñado fallará por la acción de las cargas externas. El esfuerzo principal máximo según la teoría de los elementos finitos y de elasticidad se encuentra ubicado en el anillo bidireccional con valor de 92 MPa .

Parámetro	Descripción
Factor de seguridad	Este valor tiene alto porcentaje de importancia, ya que entrega la razón existente entre la carga máxima que soporta el material antes de tener falla estructural ($P_{fluencia}$), y la carga máxima aplicada ($P_{maxaplicada}$) que está soportando la estructura; de este modo se obtiene el porcentaje de la capacidad en exceso que el sistema tiene sobre sus requerimientos. En el caso del banco de pruebas el mínimo factor de seguridad es de 4,78 y es producido por las cargas que se presentan en el tornillo pasante que fija el vástago. Por consiguiente, indica que el punto de mayor vulnerabilidad estructural tiene la capacidad de soportar 4 veces el valor de la carga máxima aplicada.

Fuente: elaboración propia 2017

III. Conclusiones

- La estructura del banco de pruebas fue seleccionada con la metodología «criterio por índice de mérito» en la cual se incluyen criterios de diseño, (resistencia estructural preliminar, facilidad para encontrar partes, facilidad de manejo, variabilidad de peso, control de la velocidad de impacto, exactitud de impacto, seguridad operacional, ergonomía, costo, durabilidad, confiabilidad), en una matriz de decisión, escogiendo el proyecto de mayor viabilidad el cual tiene un promedio ponderado de 74,6% de cumplimiento de requisitos.
- El banco de pruebas se realizará en acero de herramienta L2, ya que soporta altas cargas de tensión y su facilidad de obtención en la industria, siendo la opción más viable.
- El esfuerzo máximo que se obtiene en la estructura es $38,6 \text{ MPa}$ y está ubicado en la junta del anillo bidireccional, el vástago y el tornillo pasante; de este modo se aconseja utilizar en este punto tornillería de alta calidad.
- La deformación máxima que existe en todo el banco de pruebas es $2,73 \text{ mm}$ y se ubica en la junta vástago-masa de impacto, ya que está empotrada en cantiléver y esta deformación está contenida bajo los límites de diseño para los cuales fue creado el banco de pruebas.
- Las masas de impacto que simulan los FOD que se han seleccionado son 83 kg , 37 Kg y 1 Kg , los cuales representan impactos en crucero (30 ms), despegue (18 ms) y aeronave en tierra con frenos bloqueados (0 ms), respectivamente.
- El mecanismo que se ha diseñado y analizado está basado en la filosofía de los ensayos ingenieriles pendulares, de este modo se obtuvo que el ángulo máximo de separación de la posición de estabilidad estática hasta la posición inicial del péndulo, que debe ser menor o igual a 175° .
- En el banco, la velocidad máxima que se desarrolla es $5,23 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ y la energía máxima que se disipa es de 1138 J ; lo que recrea un impacto de un ave de $2,5 \text{ kg}$ en fase de vuelo crucero.
- La tornillería utilizada tiene como característica una calidad de 4.6 bajo la norma ISO $898-1$. Asimismo, los tornillos utilizados son: once tornillos $M24UNC3$ con par de apriete de 230 Nm , treinta y dos tornillos $M6UNF0.75$ con par de apriete de 3.43 Nm , seis tornillos $M4.5UNF0.5$ con par de apriete de $1,5 \text{ Nm}$ a $1,5 \text{ Nm}$, un tornillo $M6UNF0.75$ con par de apriete de 3.43 Nm , un tornillo $M5UNF0.5$ con par de apriete de 1.96 Nm .

- El material de diseño del rodamiento es SAE 52100 Acero-Cromo con carga radial dinámica máxima de 12100 N y velocidad límite de 3800 rpm de referencia NSK 6814 fabricado por NSK Bearing.
- La estructura del banco de pruebas resiste el esfuerzo máximo (38,6 MPa) hallado en condición estática. Se establece que al aplicar la carga instantánea producida por el impacto la estructura de sujeción estructura alar-columna principal se produce un esfuerzo en la sujeción soldada del disco rotador (2,5 GPa) el cual produce falla y debe ser seleccionado otro método de sujeción columna principal-ala.

Referencias

- ARATEC Ingeniería. (2011). *Cálculo mecánico de las uniones soldadas*. Recuperado el 10 de 02 de 2016, de http://ingemecanica.com/tutoriales/tutorialesdelasemana/Tutorial_N46_2011.pdf
- Ashby, M., & Jones, D. (2008). *Materiales para ingeniería 1. Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño*. España: REVERTÉ, S. A. Pág 11.
- Bachtel, B. (2004). *Foreign Object Debris and Damage Prevention*. Recuperado el 15 de 05 de 2015, de http://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/aero_01/textonly/s01txt.html
- Boresi, A., & Schmidt, R. (2003). *Advanced mechanics of materials*. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc. Pág 120-122.
- Colmenares, O., & Villalobos, D. (2014). Prospectiva metodológica para el mantenimiento preventivo. *Ingenium*, 21,22,23,24,25,26,27.
- Federal Aviation Administration. (1998). *AC 43.13-1B - Acceptable Methods, Techniques, and Practices - Aircraft Inspection and Repair. (Chapter 4 - Metal Structure, Welding, and Brazing)*. Recuperado el 12 de 08 de 2015, de http://www.faa.gov/regulations_policies/advisory_circulars/index.cfm/go/document.information/documentID/99861
- Federal Aviation Administration. (2010). *AC 150/5210-24 Airport Foreign Object Debris Management*. Recuperado el 19 de 03 de 2016, de http://www.faa.gov/airports/resources/advisory_circulars/index.cfm/go/document.current/documentNumber/150_5210-24
- Herrera, M., Casas, J., & Guevara, I. (2013). Desarrollo de un prototipo de prótesis auditiva por transmisión osea para humanos con daños en la sección externa y media del oído. *Ingenium*, 17 a 36.
- Merchán, F., Bocarejo, D., & Rojas, J. (2016). *Diseño preliminar de un banco de pruebas para reparaciones aeronáuticas causadas por objetos extraños FOD's (Tesis de pregrado)*. Universidad de San Buenaventura. Bogotá, Colombia.
- Mott, R. (2006). *Diseño de elementos de maquinas*. Mexico D.F.: Pearson Education. Pág 30-80.
- Norma ISO 898-1. (2009). *ISO 898-1 Mechanical properties of fasteners made*. Recuperado el 02 de 03 de 2016, de http://itc.co.ir/wp-content/uploads/2015/01/ISO_898-1_2009E.pdf
- Seyyed Khandani, P. (Agosto de 2005). *Engineering design process*. Obtenido de www.iisme.org/ETPExemplary.cfm: www.iisme.org/ETPExemplary.cfm
- Smith, W., & Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de los materiales*. Mexico, D.F.: McGraw-Hill. Pág 212-217.
- Sociedad Colombiana de Ergonomía. (2011). *Gaceta Ergonómica: Eje Cafetero*. Pereira, Colombia: Gaceta Ergonómica.
- Támara, S., Bolaños, C., & Jimenez, P. (2010). *Diseño y construcción de una estructura alar de aeronaves no tripuladas de alcance medio para la simulación de condiciones de vuelo en un banco de pruebas estructurales (Tesis de Pregrado)*. Universidad de San Buenaventura. Bogotá, Colombia.
- Urbano, F. (2011). Dinámica de vuelo y simulación de los parámetros de diseño de una aeronave radiocontrolada. *Ingenium*, 82-93.