

# Optimización de Válvulas hidráulicas electro piloteadas con el uso de Manufactura Aditiva

Omar Solís<sup>1</sup>, Diego Hernandez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Alumno de Posgrado.

<sup>2</sup>Ingeniero de Diseño, General Electric.

omar.solis@ge.com

**ITC and Intellectual properties disclosure: This document does not contain GE Proprietary Information and it is a NLR Information. No critical items, no critical dimensions and no intellectual property information are shown in the following document. Project name, program name, part names and part numbers were changed by generic names to become this document in a public domain document as part of an educational program.**

## RESUMEN.

En éste artículo se presenta un estudio de las ventajas del uso de la manufactura aditiva en las válvulas hidráulicas piloteadas por un solenoide. Las válvulas analizadas son de uso aeronáutico. El uso de manufactura aditiva abre la puerta para realizar geometrías que son imposibles de realizar por medio de manufactura convencional. Con las propuestas de optimización se puede reducir hasta un 8% el peso del componente principal y reduce la caída de presión en los conductos internos en un 5%.

**Palabras Claves:** Manufactura Aditiva (MA), Válvulas Hidráulicas, Optimización.

## 1 INTRODUCCIÓN.

La Industria Aeronáutica está llena de retos en la etapa de diseño de los componentes para crear sistemas capaces de realizar el trabajo requerido sin comprometer la seguridad de los tripulantes y los pasajeros. General Electric es una compañía multidisciplinaria que cuenta con una división de sistemas de aviación, en ella diseñan componentes para la generación y distribución de energía en los aviones, diseño de "software" para monitorear y controlar los parámetros de una aeronave, y también cuenta con una sección de sistemas mecánicos, en ella se realiza el diseño de los componentes externos del motor como lo son: sistemas de actuación de la propulsión de Reversa (TRAS por sus siglas en inglés de "Thrust Reverser Actuation System"), arrancadores de los motores y sistema de actuación de los superficies de control.

Éste artículo se enfoca a los componentes hidráulicos del sistema de la propulsión de la reversa de los aviones, específico en la válvulas hidráulicas de éste sistema.



Figura 1. Celda de prueba del sistema de reversa en Woodward (izq.) Válvula de control hidráulico GE/Woodward (der.) [1]

El uso de la manufactura avanzada permite a los ingenieros diseñar piezas centrándose en la funcionalidad más que en la manufacturabilidad [2]. En la metodología de diseño de la empresa, después de la etapa de certificación para poder utilizar los componentes en aviones comerciales existe una etapa de optimización del diseño; ésta etapa está enfocada a la optimización de los componentes en categorías muy específicas, las cuales son:

- Reducción de Peso
- Reducción de Costo

Cada cambio en el diseño de un componente hidráulico puede afectar el **rendimiento** del mismo, es necesario tomar en cuenta las propiedades del fluido hidráulico (Skydrol® 5) [3] utilizado en estos sistemas para poder calcular las caídas de presión debido a la geometría de los conductos por donde dicho fluido debe de pasar.

Éste artículo tiene como objetivo validar que las propuestas de optimización de diseño con el uso de la manufactura aditiva representan un método efectivo para reducir el peso de los componentes, reducir las caídas de presión y reducir el costo de manufactura.

## 2 FUNDAMENTOS

La manufactura aditiva es capaz de producir objetos tridimensionales muy complejos a través de tecnologías innovadoras de endurecimiento, corte y fundición de material en capas, disminuyendo significativamente el tiempo de fabricación de prototipos en la fase de desarrollo de nuevos productos, sin embargo dependiendo de la aplicación, del

volumen de manufactura y de la complejidad de ciertos elementos a maquinar es posible considerar la MA como método de fabricación de componentes de producción.

Debido al proceso aditivo en el cual se basa, es el volumen de la pieza y no la complejidad de la misma la que rige al componente del costo. En contraste, cuando se emplea el trabajo semi-manual de algún taller tradicional, la complejidad de la pieza es clave ya que entre más compleja sea la forma será más costosa porque lleva más tiempo en producir. Resumiendo, las tecnologías aditivas producen componentes más rápido ya que su construcción es automatizada y no requiere de la intervención humana. [4]

En comparación con métodos de fabricación como el maquinado, los beneficios de la MA se pueden definir en la lista de abajo, en ella se relaciona una ventaja con uno de los objetivos de éste artículo.

1. Diseñar/modelar en base a funciones preestablecidas del programa CAD (basta con una geometría 3D). (Reducción de Peso)
2. No requiere convertir características de diseño en formas manufacturables (Mejora en el performance).
3. Requiere planeación mínima de procesos y operaciones (Reducción de costo).
4. No hay necesidad de definir una secuencia de operaciones (Reducción de costo).
5. No se necesitan dispositivos de fijación, soporte y montaje.
6. Es un proceso libre de herramientas (no requiere del diseño de moldes y dados)

Existen diferentes tecnologías de manufactura aditiva (MA) como lo son: La Estereolitografía [5] (SLA). Deposición de Material Fundido [6] (FDM), Sinterizado Laser Selectivo (SLS) [5] y Sinterizado Laser Directo de Metales [7] (DMLS)

Para una Válvula hidráulica que estará sujeta a 206 bar de presión, la única tecnología disponible de crear piezas con suficiente resistencia es la tecnología DMLS. Las máquinas EOS se basan en el sinterizado directo de los polvos. Esto quiere decir que el rayo láser se aplica directamente sobre la cama de polvos a sinterizar. Los polvos se elevan a una temperatura alta hasta que se funden entre ellos. En esta tecnología el láser incide directamente sobre el material a sinterizar, es por eso que es posible sinterizar metales porque al usar un láser de alta potencia directamente en el polvo la temperatura se eleva hasta el punto de fusión [7].

El componente más importante en el ensamble de una válvula es el cuerpo ("Housing"), en él se ensamblan los puertos hidráulicos, los solenoides de control y los sensores de monitoreo. Al ser una válvula con muchos conductos internos hace que sea un componente con alto grado de dificultad para maquinar.

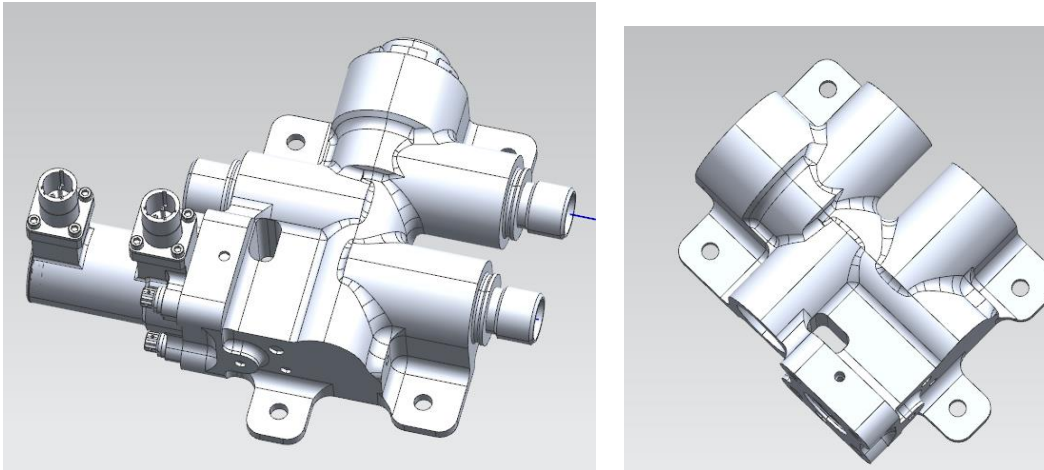


Figura 2. Válvula de control de dirección hidráulico

Existen dos características que afectan la caída de presión de un fluido hidráulico cuando se hace pasar por un conducto, las cuales son:

La relación entre Diámetro y Largo del pasaje.

Los cambios de dirección del fluido.

Viscosidad del fluido y coeficiente de fricción de la pared interna del tubo

$$\Delta P = \frac{8 * \mu L * Q}{\pi r^4} \quad (1)$$

Donde:  $\Delta P$  = Caída de presión.  $\mu$  = viscosidad del fluido. L = Longitud del conducto, Q = Flujo volumétrico, r = Radio interno del conducto.

Por lo anterior podemos decir que mientras se pueda reducir el largo del conducto, incrementar el diámetro, reducir el ángulo en el cambio de dirección y agregar un radio de curvatura en los cambios de dirección, estaremos incrementando la eficiencia del componente al reducir la caída de presión dentro del componente.

A continuación se muestra un ejemplo de los conductos internos realizados mediante una operación de barrenados, desde el exterior del componente, éste método además de crear cambios de dirección de 90° o mayores en el fluido, no tienen un radio de curvatura. En la imagen de la derecha se muestra el recorrido que el fluido debe seguir para conectar las cavidades requeridas por diseño.

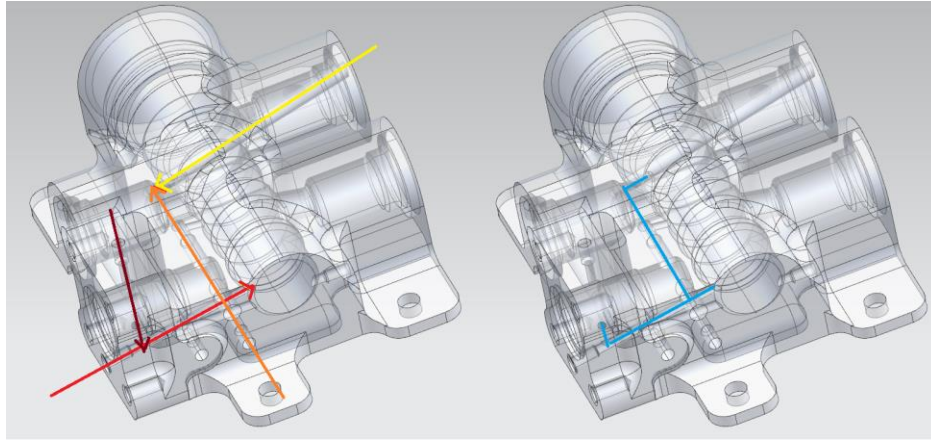


Figura 3. Conductos internos y barrenos de fabricación

El diámetro del pasaje de fluido es de 3.175mm (rojo y amarillo) y 2.3813mm. (Café y naranja).

El peso está directamente relacionado al volumen del componente.

$$W = V \cdot \rho \quad (2)$$

Donde:  $W =$  Peso (g)  
 $V =$  Volumen (cm<sup>3</sup>)  
 $\rho =$  Densidad (g/cm<sup>3</sup>)

Si logramos reducir el volumen de la pieza en un 10%, podemos deducir que el peso del componente será reducido de igual manera en un 10%. Si tomamos en cuenta que el método tradicional de realizar barrenos desde el exterior debe tener las siguientes consideraciones: Colocar un Inserto metálico que sirva de tapón en los conductos y es obligatorio dejar material extra para poder soportar los esfuerzos residuales provocados por el inserto.

Es necesario aclarar que existen ya datos experimentales que nos ayudan a entender el comportamiento de una pieza fabricada con tecnología de MA. El material del cuerpo de las válvulas es de Titanio Ti64, la maquina EOS M280 disponible en el CIATEQ plantel Parque Industrial Bernardo Quintana es capaz de realizar componentes con el mismo material a base de polvos. Para verificar los valores de resistencia y el comportamiento an-isotrópico de las probetas o componentes se debe verificar con una prueba de tensión de acuerdo a la norma ASTM E8/E8M.

Mediante una búsqueda en las bibliografías y datos técnicos de los materiales y Sistemas que maneja la marca EOS, se encontraron los siguientes datos y Conclusiones:

- a) A diferencia de los componentes fabricados con tecnologías como SLA, SLS, FDM, los componentes realizados con DMLS tienen un efecto más reducido en

el cambio de propiedades mecánicas en relación a la dirección de fabricación, es decir, tienen cierta anisotropía, que se puede observar en la siguiente tabla de propiedades [8]

Mechanical properties of parts		
	As built	Heat treated [6]
<b>Tensile strength [5]</b>		
- in horizontal direction (XY)	typ. 1230 ± 50 MPa typ. 178 ± 7 ksi	min. 930 MPa (134.8 ksi) typ. 1050 ± 20 MPa (152 ± 3 ksi)
- in vertical direction (Z)	typ. 1200 ± 50 MPa typ. 174 ± 7 ksi	min. 930 MPa (134.8 ksi) typ. 1060 ± 20 MPa (154 ± 3 ksi)
<b>Yield strength (R<sub>p0.2</sub>) [5]</b>		
- in horizontal direction (XY)	typ. 1060 ± 50 MPa typ. 154 ± 7 ksi	min. 860 MPa (124.7 ksi) typ. 1000 ± 20 MPa (145 ± 3 ksi)
- in vertical direction (Z)	typ. 1070 ± 50 MPa typ. 155 ± 7 ksi	min. 860 MPa (124.7 ksi) typ. 1000 ± 20 MPa (145 ± 3 ksi)

Figura 4. Propiedades mecánicas de Titanio sinterizado

La disminución de la resistencia a la tensión (Yield) es del  $155-154/155*100=0.6\%$ . Mientras que para la resistencia ultima (Tensile) es del  $178-174/178*10=2.2\%$ . Esto quiere decir que sí existe cierta anisotropía, pero se puede diseñar para la peor característica y deberíamos estar en la zona segura.

- b) Los polvos metálicos se encuentran sinterizados o unidos mediante el calentamiento, esa cierta anisotropía o comportamiento irregular puede ser mejorado si se realiza un procedimiento adicional llamado: calentamiento con presión isostática (HIP: Hot Isostatic Pressure).
- c) El experimento realizado por Brent Mitchell [9] de acuerdo a la norma ASTM E8/E8M, da como conclusión que el Titanio Ti6Al4V, tiene las siguiente propiedades tal cuál sale de la máquina de DMLS

Tabla 1. Propiedades mecánicas según experimento de Brent Mitchell

Propiedad evaluada	Valores	Unidad de medida
Resistencia ultima promedio [UTS]	956	MPa
Resistencia a la Tensión [Y.S.]	896	MPa
Módulo de Elasticidad [E]	118	GPa

### 3 PROCEDIMIENTO

Los siguientes datos fueron obtenidos de una válvula típica de control de dirección del sistema de actuación de las compuertas de la reversa de una aeronave comercial.

Calculo de la Caída de presión con los conductos actuales,

- Existen 3 conductos en una válvula típica
- Mínimo 2 cambios de dirección por conducto con un ángulo de 90° mínimo. Como se puede observar en el ejemplo.

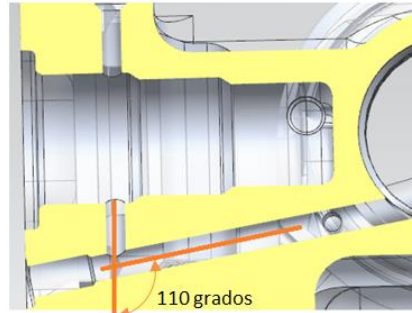


Figura 5. Cambio de dirección en flujos internos de una válvula

- La longitud promedio de los conductos es de 85 mm.
- Con un diámetro de 2.38 mm

Utilizando la formula (1) obtenemos que podemos tener una caída de presión de aproximadamente:

XXX bar (Será calculado) **(3)**

Para hacer la verificación de los cálculos se realizó una simulación de los conductos típicos de una Válvula en el programa de Easy5, el cuál esta ya validado en un proceso de Simulación y prueba de todo el sistema.

La siguiente imagen muestra la **propuesta** de nuevos conductos y cálculo de caídas de presión en ductos nuevos.

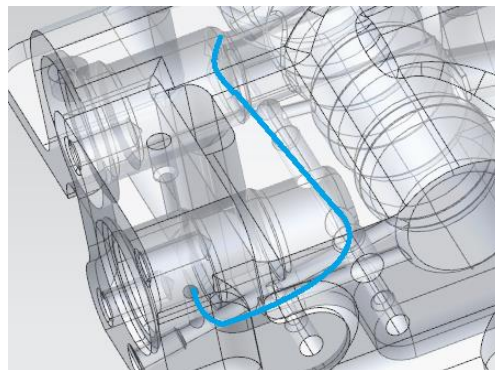


Figura 6. Propuesta conductos internos

Ángulos de 90 grados pero con un radio de curvatura de 10mm (calculado con el diámetro de 2.81mm y una relación de r/d aproximado a 4, ver figura abajo), imposible de realizar por métodos tradicionales de manufactura.

Cálculo de caída de presión después de la optimización en el conducto interno. (Pendiente)



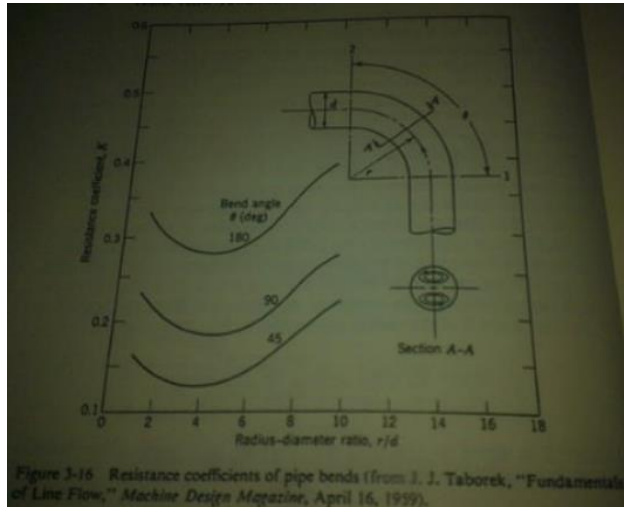


Figura 7. Coeficiente de Resistencia [10]

**Propuesta de reducción de peso.**

Para poder reducir el peso del componente se identificaron áreas específicas que fueron:

1. Secciones creadas para poder darle resistencia a la pieza debido al uso de los insertos.
2. Material solido lejos de secciones de esfuerzo mecánico.

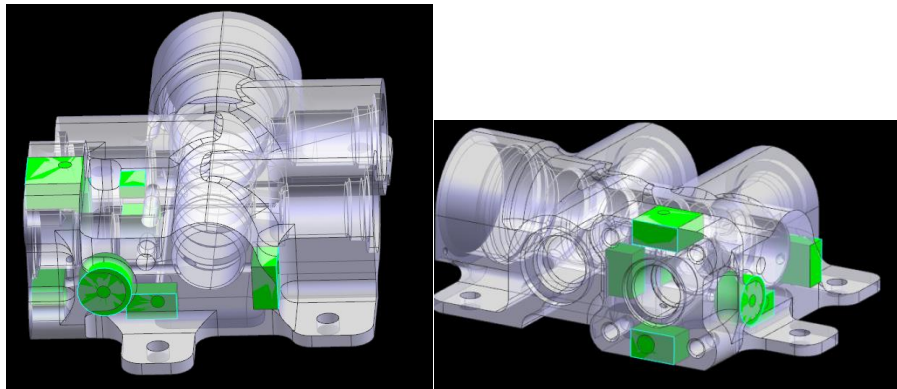


Figura 8. Propiedades mecánicas

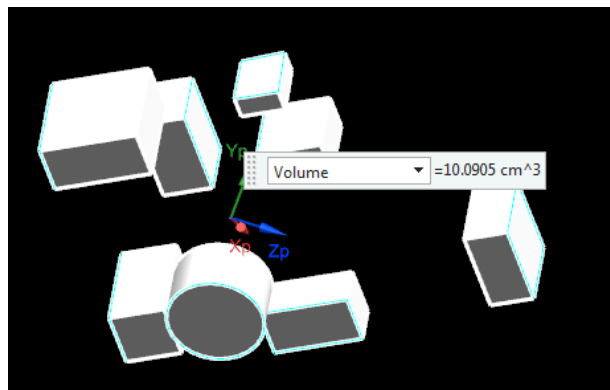


Figura 9. Propiedades mecánicas



Para poder realizar el cálculo de la reducción del peso es necesario calcular primero el volumen de la pieza original.

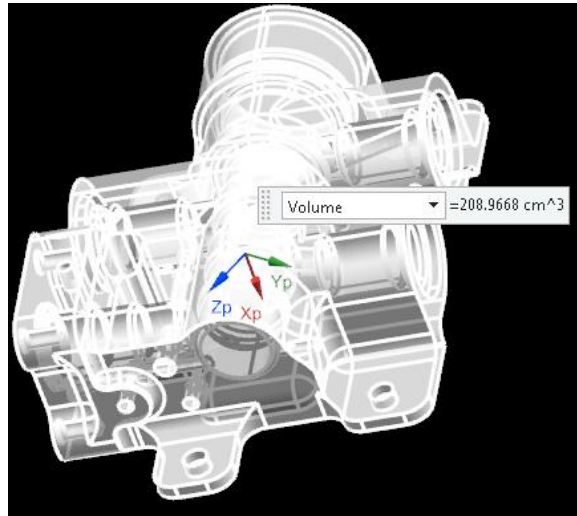


Figura10. Volumen Inicial del cuerpo de la válvula

Para poder calcular la reducción del peso de este componente utilizamos la siguiente formula.

$$\Delta W = \Delta V * \rho \quad (4)$$

$$\Delta W = (10.1cm^3) * 4.41 \text{ gr}/cm^3 \quad (5)$$

$$\Delta W = 44.5gr. \quad (6)$$

Esto representa una reducción de 4.81% del peso original del cuerpo de la válvula.

#### 4 CONCLUSION (Pendientes)

Hasta este momento no se tienen conclusiones finales, de acuerdo a los cálculos se tiene una reducción de peso de 4.9% sin embargo se puede llegar a hasta un 8% de reducción de peso con un diseño más refinado (Pendiente hasta Julio 30 2015). El cálculo de la reducción de la caída de presión así como la simulación están pendientes hasta Agosto 15 de 2015. Sin embargo, mediante los resultados preliminares se puede observar una tendencia positiva para el uso de Manufactura aditiva y la optimización de una válvula hidráulica.

## REFERENCIAS

- [1] GOLDENTHAL, Rony, Spline Curve Approximation and design by optimal control, over the knots using genetic algorithms, International Congress on Evolutionary Methods for Design, Optimization and Control with Applications to Industrial Problems , EUROGEN 2003 pp 1-18.
- [2] GOLDENTHAL, Rony, Spline Curve Approximation and Design by Optimal Control Over the Knots, Computing 72 pp 53-54, Springer-Verlag 2004
- [1] WOODWARD INC., Woodward Thrust Reverser Actuation System (TRAS),  
<http://www.woodward.com/TRAS.aspx>
- [2] GIBSON, I., D.W. Rosen, and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Digital Manufacturing, Springer, New York, 2010
- [3] ESTMAN, Skydrol5 technical data sheet,  
<http://www.eastman.com/Brands/EAS/Skydrol/Pages/Product.aspx?pid=71093407>
- [4] EVANS, Mark Andrew, The integration of rapid prototyping within industrial Design practice, Tesis Doctoral, Loughborough University, 2002
- [5] 3D SYSTEMS INC., características de la Estereolitografía Homepage:  
<http://www.3dsystems.com/>
- [6] STRATASYS INC., características de FDM, deposición de material fundido. Homepage:  
<http://www.stratasys.com/>
- [7] EOS INC., e-Manufacturing Solutions. Homepage: <http://www.eos.info/en/>
- [8] EOS e-Manufacturing Solutions, Titanium material Tech data, [http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/fe8d0271508e1e03/78e37a19596648ee1e1f660a5aa3e622/EOS\\_Titanium\\_Ti64\\_en.pdf](http://ip-saas-eos-cms.s3.amazonaws.com/public/fe8d0271508e1e03/78e37a19596648ee1e1f660a5aa3e622/EOS_Titanium_Ti64_en.pdf)
- [9] MITCHELL, Brent, The Effect of HIP Treatment on Direct Metal Laser Sintered Titanium Alloy (Ti6Al4V), The Bone & Joint Journal, vol. 95-B no. SUPP34 429, 2013
- [10] MERRIT, Herbert, Hydraulic Control Systems, John Wiley & Sons, Inc. 1967