

**CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR**



Colegio de Ingeniería  
Dirección de Posgrado  
Campus Mexicali

Tesis/Proyecto de Innovación

**Rediseño para el *plenum* del Gulfstream V**

**Propuesta de diseño 1 para plenum Gulfstream V**

para obtener el grado de

**Maestría en Ingeniería e Innovación**

LGAC: Diseño y Sistemas de Manufactura

*Área de énfasis: Diseño Aeroespacial*

Presenta

**César Abraham Dávila Verdugo**

Director de Proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

Co-director de Proyecto: Dr. Jesús Mora

Asesor de la Industria: Dr. Nicolás Díaz

Mexicali, Baja California. Marzo 2019.

**CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR**



Colegio de Ingeniería  
Dirección de Posgrado  
Campus Mexicali

Tesis/Proyecto de Innovación

**Rediseño para el *plenum* del Gulfstream V**

**Propuesta de diseño 1 para plenum Gulfstream V**

para obtener el grado de

**Maestría en Ingeniería e Innovación**

LGAC: Diseño y Sistemas de Manufactura

*Área de énfasis: Diseño Aeroespacial*

Presenta

**César Abraham Dávila Verdugo**

Director de Proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

Co-director de Proyecto: Dr. Jesús Mora

Asesor de la Industria: Dr. Nicolás Díaz

Mexicali, Baja California. Marzo 2019.

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería  
Dirección de Posgrado  
Campus Mexicali

Tesis/Proyecto de Innovación  
**Rediseño para el plenum del Gulfstream V**  
**Propuesta de diseño 1 para plenum Gulfstream V**

para obtener el grado de  
**Maestro en Ingeniería e Innovación**

Presenta

**César Abraham Dávila Verdugo**

Director de Proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

Co-director de Proyecto: Dr. Jesús Mora

Asesor de la Industria: Dr. Nicolás Díaz

Comité evaluador:

---

Dr. Alán Humberto  
Escamilla Rodriguez

---

Dr. Juan Ignacio  
Rodriguez del Prado

---

Dr. Miguel A.  
Ponce Camacho

Mexicali, Baja California. Marzo 2019

## **Agradecimiento y dedicatorias**

Primeramente, agradezco a Dios por haberme puesto en este camino y haberme puesto sobre los hombros de dos gigantes que son mis padres sin duda sin su apoyo y educación desde hace 31 años no habría podido llegar tan lejos, gracias por creer en mí y hacer de mi parte de la persona que soy ahora.

También quisiera agradecer a Honeywell por haber prestado el apoyo, facilidades, instalaciones personal y recursos que, a mis supervisores Chip Clampitt y Harry Hess por haberme facilitado los tiempos y la flexibilidad de poder cumplir con ambas responsabilidades tanto laborales como académicas durante este proceso, sobre todo a Esthibaly Salazar que me invito al proyecto casi por concluir la etapa de inscripción e hizo todo lo posible por que pudiera participar, sin ellos este proyecto de maestría no hubiera sido posible.

Quiero agradecer también mis compañeros de Honeywell con los cuales compartí esta experiencia, me llevo muchas lecciones, conocimiento y buenos amigos hay que mencionar que también fueron parte del apoyo durante todo este proceso en los trabajos de materias previas y de este presente trabajo.

Agradezco a mis asesores de proyecto Sayuri Kyota, Nicolas Diaz, Ahuizotl Arellano y a Dania Licea que me otorgaron todo lo necesario para concluir este proyecto en tiempo y forma la ayuda prestada fue invaluable seguramente sin ella no se hubiera podido concluir en el tiempo establecido.

Finalmente quiero agradecer a todas esas personas que directa o indirectamente me dieron apoyo tanto moral para mantener el entusiasmo y energía durante el proyecto, gracias a mis profesores de cada uno me llevo una aportación esta aportación va ser de gran valor para proyectos futuros.

# Carta Institucional

Honeywell Ingeniería y Tecnología Aeroespacial de México  
S. de R.L. de C.V.  
Calzada del Oro #1755  
Colonia Dos División 2  
Mexicali, BC. C.P. 21399  
México



Mexicali, 21 de marzo de 2019

Colegio de Ingeniería  
Dirección de Posgrado  
Campus Mexicali

Estimados miembros del Colegio de Ingeniería, Dirección de Posgrado y Campus Mexicali:

Por medio del presente, hago constar que el proyecto:

**“Propuesta de diseño 1 para Gulfstream V”**

El cual fue desarrollado por el colaborador:

**César Abraham Dávila Verdugo**  
**Matrícula: 35238**

Que cursa la maestría de Ingeniería e Innovación, fue desarrollado de manera satisfactoria en Honeywell Aeroespacial ISC – Departamento de Fibra de Vidrio creando propiedad intelectual de valor aplicable.

ATENTAMENTE



Dr. Nicolás Díaz  
Principal Engineer

**Honeywell**  
HONEYWELL INGENIERIA Y TECNOLOGIA  
AEROSPAZIAL DE MEXICO, S. DE R.L. DE C.V.  
Calzada del Oro, Lote 7, Porción 1,2  
Parque Industrial el Vigía CP 21397  
México

# INDICE

Capítulo 1 .....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Antecedentes .....	9
1.3 Justificación General.....	12
1.4 Planteamiento del Problema.....	13
1.5 Descripción del Proyecto Global .....	17
1.6 Preguntas de Investigación.....	18
1.7 Justificación Especifica.....	20
1.8 Objetivos general de la investigación:.....	21
1.9 Planteamiento de Hipótesis. ....	21
Capítulo 2: Marco Teórico.....	22
2.1    Proceso de Diseño.....	22
2.1.1    Responsabilidad del diseño.....	23
2.1.2    Etapas del proceso de diseño.....	23
2.2    Diseños Asistidos por Computadora (CAD).....	24
2.3    Diseño para la Manufactura y Ensamble (DFMA).....	25
2.4    Optimización topológica. ....	26
2.5    Optimización dimensional:.....	26
2.6    Optimización de forma:.....	26
2.7    Optistruct: .....	26
2.8    Manufactura aditiva.....	28
2.9    Direct Metal Laser sintering.....	30
2.10    Proceso Hand lay up Prepeg.....	31
2.10.1    Ventajas of Prepregs .....	31
2.10.2    Desventajas de Prepregs.....	31
2.11    Materiales compuestos.....	32
2.12    Fundición. ....	35
2.12.1    Ventajas del proceso de fundición.....	36
2.12.2    Desventajas del proceso de fundición. ....	37
2.13    Rolado de lamina.....	37
2.13.1    Calibres de lámina comerciales: .....	38
2.14    Diseño para manufactura aditiva .....	38
2.14.1    Orientación .....	39
2.14.2    Optimización funcional. ....	39
2.14.3    Optimización de trayectorias de manufactura .....	39

2.15 Casos de estudio.....	40
Capítulo 3: Metodología .....	48
3.1 Metodología general .....	48
3.2 Procedimiento .....	48
3.2.1 Fase 1: Funcionalidad .....	49
3.2.2 Fase 2: Manufactura .....	49
3.2.3 Fase 3: Diseño y optimización .....	49
3.3 Plan de trabajo.....	50
3.3.1.1 Entregables .....	50
3.3.2 Cronograma .....	51
3.3.3 Recursos.....	51
Capítulo 4: Resultados .....	52
4.1 Fase 1: Funcionalidad .....	52
4.1.1 Requerimientos funcionales: .....	52
4.1.2 Condiciones de operación: .....	54
4.2 Fase 2: Manufactura.....	55
4.2.1 Carcasa:.....	57
4.2.2 Cubierta: .....	57
4.2.3 Restricciones de proceso.....	58
4.2.3.1 Fundición .....	58
4.2.3.2 Rolado de lamina.....	58
4.3 Fase 3: Optimización .....	58
4.3.1 Diseño conceptual:.....	60
4.3.2 Optimización funcional: .....	64
4.3.2.1 Optimización funcional Asistida por optistruct: .....	64
4.3.2.2 Optimización funcional Clásica: .....	67
4.4 Diseño a Detalle: .....	68
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones .....	71
5.1 Conclusiones.....	71
5.2 Hallazgos. ....	73
5.3 Limitaciones.....	74

## Índice de Figuras

Figura 1. Diagrama de las diferentes divisiones dentro de Honeywell. Fuente: Elaboración propia, basado en Honeywell (2018). .....	1
Figura 2. Diagrama de los diferentes rubros que abarca el Sector Aeroespacial en Honeywell. Fuente: Elaboración propia, basado en Honeywell (2018).....	3
Figura 3. Principales componentes del Sistema de Control Ambiental. Fuente: Honeywell Aerospace (2016).....	4
Figura 4. Diagrama del proceso de manufactura del plenum para el Gulfstream V. Fuente: Elaboración propia. ....	5
Figura 5. Modelo 3D actual del plenum del Gulsftream V.....	6
Figura 6. Fase 7, configuraciones de capas en distintas zonas del plenum. ....	7
Figura 7. a) Configuración de corte de prepreg anterior. b) Configuración de corte de prepreg actual. ....	9
Figura 8. Caul plates diseñados para ejercer presión en zonas críticas.....	10
Figura 9. Izquierda. Proceso sin utilizar caul plates. Derecha. Plenum utilizando caul plates. ....	10
Figura 10. Configuraciones de paneles. Fuente: obtenido de documentación Honeywell. ....	11
Figura 11. Rediseño de plenum de aluminio. Fuente: obtenido de documentación Honeywell. ....	11
Figura 12. Defectos en Diseño actual Plenum GV. Fuente: obtenido de documentación Honeywell..	12
Figura 13. Horas trabajadas en Plenum en el periodo de enero a octubre 2018. Fuente: obtenido de documentación de Honeywell. ....	14
Figura 14. Porcentaje del costo de los procesos de manufactura para la demanda de Plenum en el 2018. Fuente: obtenido de documentación de Honeywell. ....	15
Figura 15. Diagrama de proceso sustantivos, fuente: elaboración propia. ....	18
Figura 16. Proceso de diseño de ingeniería industrial, fuente: UNAM (2019). ....	22
Figura 17. Proceso del DFMA, Fuente: Araque y Vélez (2016) .....	25
Figura 18. Desarrollo de diseño conceptual. (recuperado de Optistruct Optimization V2017.2.pdf de Altaír). ....	28
Figura 19. Proceso Geometría-material-máquina para AM. Fuente: Gao et al. (2015) .....	29
Figura 20. Proceso de laminado. (Design analysis of composite structures, documentación honeywell). ....	32
Figura 21. Herramental hecho 100% de BMI utilizado en 50 ciclos a 221C (430F).(Documentacion Honeywell). ....	33
Figura 22. Esquema del proceso de fundición manual de Arena, fuente: Garcia (2016). ....	35
Figura 23. Tipos de sistema de rolado, fuente: Acrotechnic(2019). ....	37
Figura 24. Costo por libra de Al 6061, fuente: Software CES selector 2016. ....	38
Figura 25. Proceso de diseño para manufactura aditiva. Fuente: Ponche et al. (2014).....	40
Figura 26. Componente original, fuente: Seabra (2016). ....	40
Figura 27. Metodología utilizada, fuente: Seabra (2016). ....	40
Figura 28. Restricciones del componente, Fuente: Seabra (2016). ....	41
Figura 29. Resultado de optimización, Fuente: Seabra (2016). ....	41
Figura 30. Transición a geometría final, fuente: Seabra (2016).....	41
Figura 31. Componente fabricado, fuente: Seabra (2016). ....	41
Figura 32. Proceso de optimización y reducción de peso de componente estructural wing box rib, Fuente: Krog et al. 2002 citado por Zhu, 2017, p.110). ....	42
Figura 33. Diseño original de Espiga, Fuente: Reddy et al. 2016. ....	43
Figura 34. Configuración para optimización topologica (I) y resultado de optimizacion (II), Fiente: Reddy et al. (2016). ....	44



Figura 35. Iteraciones de diseño en función de reducir el material de soporte. Fuente: Reddy et al. (2016).....	45
Figura 36. Proceso de optimización topológica para generar componentes de material compuesto, Fuente: Brooks y Molony (2016).....	46
Figura 37. Metodología propuesta para la investigación, fuente: Elaboración propia. ....	48
Figura 38. Restricciones y condiciones de carga, fuente: Proceso FEA(martinez 2019).....	54
Figura 39. Proceso de Diseño 1, fuente: elaboración propia.....	59
Figura 40. Diseño Conceptual de la carcasa del Plenum, fuente: creación propia.....	63
Figura 41. Diseño Conceptual de la cubierta del Plenum, fuente: creación propia. ....	63
Figura 42. Configuración de espacios de diseño para optimización.....	65
Figura 43. Espacio de diseño optimizado, Fuente: elaboración propia.....	65
Figura 44. Vista inferior de espacio optimizado, Fuente: elaboración propia.....	66
Figura 45.. Modelo 3d basado en optimización estructural, Fuente: elaboración propia. ....	66
Figura 46. Geometría final de carcasa. Fuente: elaboración propia.....	67
Figura 47. Geometría final de la cubierta. Fuente: elaboración propia.....	68
Figura 48. Versión final de diseño del Plenum, fuente: elaboración propia. ....	69
Figura 49. Estructura de Aluminio vaciado del Plenum, Fuente: elaboración propia. ....	69
Figura 50. Cubierta de chapa metálica del Plenum, fuente: elaboración propia. ....	70

## Índice de Tablas

Tabla 1. Costos de manufactura del plenum actual y costos estimados de manufactura por fundición. ....	16
Tabla 2. Costo por libra de polvo de aleaciones de Aluminio para DMLS .....	31
Tabla 3. Información del desempeño de los paneles sometidos a pruebas de tensión. ....	34
Tabla 4. Características generales de procesos de fundición. ....	36
Tabla 5. Calibres comerciales en hojas de aluminio. ....	38
Tabla 6. Criterios de evaluación de iteraciones de diseños optimizados. ....	45
Tabla 7. Lista de actividades. ....	50
Tabla 8. Cronograma de actividades. ....	51
Tabla 9. Requerimientos Funcionales. ....	53
Tabla 10. Parámetros y cargas para realización de análisis estructural en el Plenum del .....	55
Tabla 11. Análisis comparativo de Procesos de manufactura de carcasa. ....	57
Tabla 12. Análisis comparativo de Procesos de manufactura de cubierta. ....	57
Tabla 13. Elementos integrados en carcasa. ....	61
Tabla 14. Características del material para fundición. ....	62
Tabla 15. Características principales del diseño final. ....	73

## Índice de Gráficas

Gráfica 1. Pruebas de tensión realizadas a muestras BMI-2 con fibras de carbono IM7-GP-6K, fuente: Documentación Honeywell.....	34
Gráfica 2. Desempeño medido en carga(N) y deformación (mm), Fuente: Brooks y Molony (2016) .	47

## **Lista de abreviaturas**

ECS: sistema de control ambiental

ISC: Cadena de suministros integrada.

DFMA: diseño para manufactura y ensamble

AM: manufactura aditiva

TO: optimización topológica

DMLS: sinterizado laser de fundición directa.

## Resumen

El trabajo presentado con el fin de obtener el grado de Maestría en ingeniería e innovación contribuye al proyecto global con la integración de un diseño que reduzca peso, costo de fabricación y cumpla las especificaciones de desempeño requeridas por el sistema de control ambiental del Gulfstream Gv.

Mediante una investigación sobre las características del diseño actual, las áreas de oportunidad, restricciones del diseño y procesos de manufactura que puedan ser solución se captura información crítica para la elaboración de un diseño y su proceso iterativo de validación conforme a las demás líneas de investigación.

El proyecto global muestra el estudio sobre la situación actual del componente plenum del GV que se fabrica en el área de compuestos de la planta de manufactura de Honeywell Aerospace en Mexicali y busca desarrollar una propuesta de diseño para el plenum del Gulfstream V que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad, y permita reducir el costo del proceso de fabricación.

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

*Honeywell* es una empresa internacional con operaciones en 970 sitios distribuidos en 70 países. Tiene presencia global en África, Asia, Europa, Latinoamérica, el Medio Este y Norte América. Dentro de Latinoamérica, México es uno de los principales países con más edificios de esta compañía, cuenta con sedes en los estados de Baja California, Chihuahua, Nuevo León, Campeche, Jalisco, Querétaro, San Luis Potosí y Ciudad de México.

En la Figura 1 se muestran y se describen de manera general las 4 divisiones principales de esta compañía.



Figura 1. Diagrama de las diferentes divisiones dentro de Honeywell.  
Fuente: Elaboración propia, basado en Honeywell (2018).

### Sector de Tecnología para Edificios

Este sector genera 5.3 Billones de dólares en ventas al año, dedicándose al negocio de productos, soluciones y manejo de sistemas para edificios. Tiene su principal sede en Atlanta, Georgia. Los productos, el software y las tecnologías de *Honeywell* están en más de 10 millones de edificios a nivel mundial, ayudando a que las instalaciones de los clientes estén seguras, con eficiencia energética, sean sustentables y productivos.

## Sector de Materiales

Su sede principal está localizada en Morris Plains, Nueva Jersey. Este sector genera 10.3 billones de dólares en ventas al año, haciendo negocios en materiales y tecnologías avanzadas como lo son los materiales compuestos, fibras, químicos y materiales electrónicos, refrigerantes potenciales con bajo efecto al calentamiento global, aditivos y filminas especiales. Este sector es un líder mundial en diseño y creación de productos químicos y materiales de alta pureza y calidad, así como también, crea sistemas basados en software para operar instalaciones industriales complejas de manera segura y eficiente.

## Sector de Seguridad y Soluciones de Productividad

Con la principal sede en Fort Mill, Carolina del Sur, este sector genera 5.6 Billones de dólares en ventas al año, dedicándose a negocios de seguridad industrial. Provee productos, software y soluciones conectadas que mejoran la productividad, seguridad de trabajo y el rendimiento de activos para clientes en todo el mundo. Cuenta con un amplio rango de productos como detectores de gas, botas de trabajo, escáneres de códigos de barras, auriculares de seguridad y arneses.

## Sector Aeroespacial

Con la principal sede en Phoenix, Arizona, el sector aeroespacial genera 11.6 Billones de dólares en ventas al año, dedicándose al negocio de soluciones electrónicas, motores, sistemas de potencia, componentes mecánicos, sistemas mecánicos y conectividad. Los productos aeroespaciales *Honeywell* son usados prácticamente en todas las plataformas de aviones comerciales y militares a nivel mundial. Sus tecnologías abarcan desde llantas de avión y sistemas de frenado, hasta tecnologías para aplicaciones en satélites. *Honeywell* aeroespacial innova e integra miles de productos, softwares y servicios para avanzar y ofrecer más fácilmente experiencias de transporte seguras, eficientes, productivas y cómodas en todo el mundo.

El problema que aborda este proyecto está ubicado en esta última división, el sector aeroespacial. En este sector se encuentra la planta "*Integrated Supply Chain*" (ISC), la cual está ubicada en la ciudad de Mexicali, Baja California. Esta planta apoya al sector de Jets privados, el cual se encuentra dentro de las divisiones de grupos del sector aeroespacial (Figura 2), con la producción de intercambiadores de calor,

turbocompresores, **plenums** y convertidores de ozono; los cuales son los componentes principales dentro de un ECS (“*Environmental Control System*”).

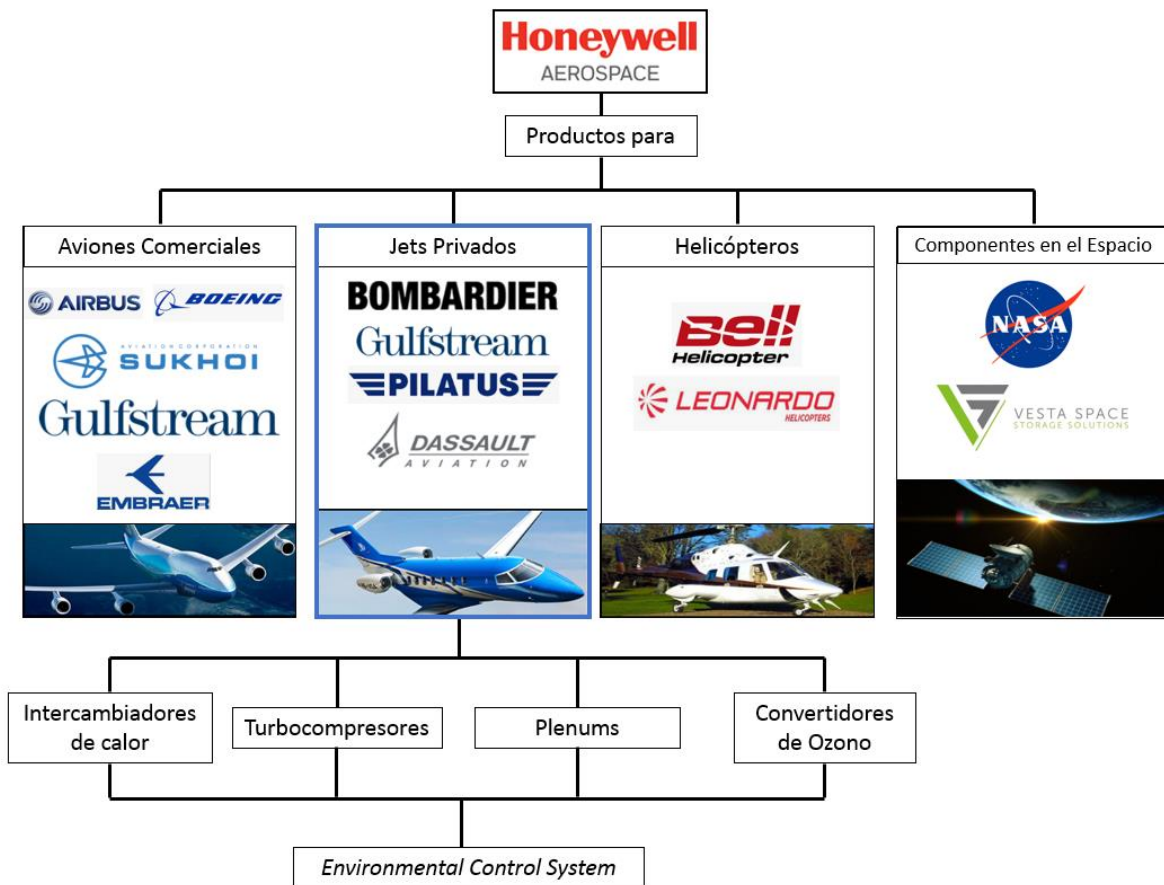


Figura 2. Diagrama de los diferentes rubros que abarca el Sector Aeroespacial en Honeywell. Fuente: *Elaboración propia, basado en Honeywell (2018)*.

El ECS es el sistema encargado de monitorear y controlar la temperatura, humedad, ventilación, presión y flujo de aire dentro del avión, tanto para los pasajeros como para los sistemas eléctricos. También maneja el aire de sangrado del motor proporcionando protección contra el hielo en las superficies de control de las alas. El sistema ECS y sus principales componentes son mostrados en la Figura 3.



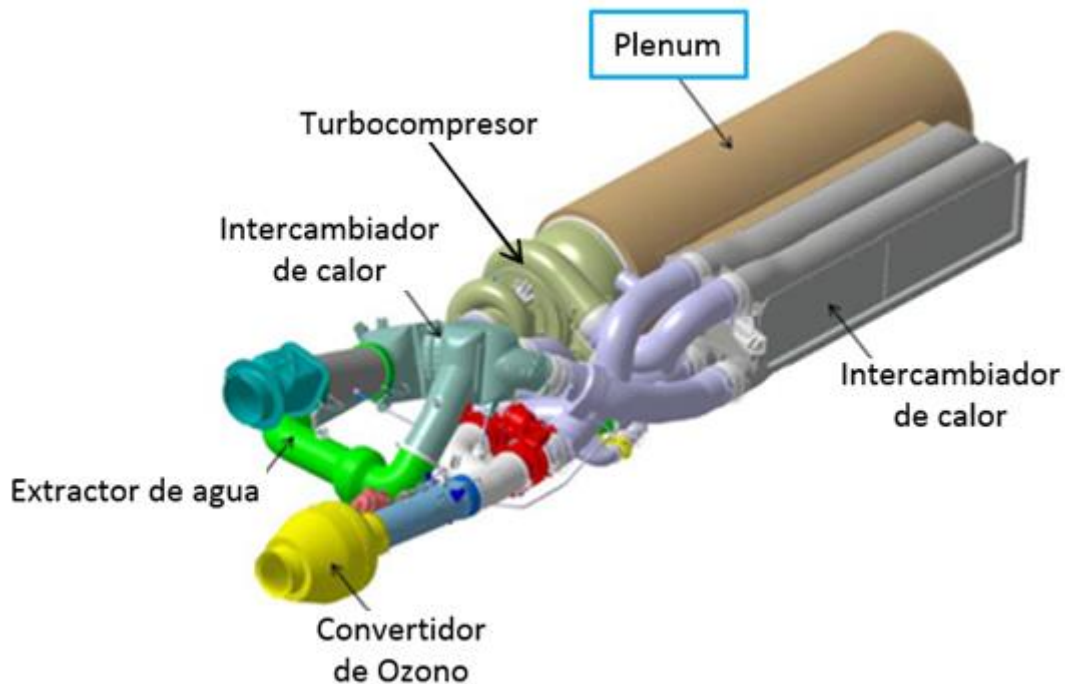


Figura 3. Principales componentes del Sistema de Control Ambiental.  
Fuente: Honeywell Aerospace (2016).

El desarrollo de este proyecto está enfocado en el desarrollo del componente del plenum para el sistema de control ambiental del Jet Privado Gulfstream V.

Los **plenums** son un conducto que envuelve al difusor en los motores de turbina de gas. El **plenum** se encarga de desacelerar el aire e incrementar la presión, posteriormente, se manda el aire a una cámara de combustión (Kadambi y Prasad, 2015). Este componente, es parte del sistema del ECS (“Environmental Control System”), el cual se define como un sistema donde se mantienen los componentes de aviones a condiciones de temperatura y humedad controladas, de manera que se pueda disipar calor a través de los componentes sin dañarlos (Gundlach, 2012). Entre los principales clientes de este tipo de sistemas, se encuentran Boeing, Gulfstream y Airbus.

La fabricación del **plenum** para el Gulfstream V, es uno de los procesos más complicados, es por ello el enfoque de este proyecto.

En la Figura 4, se muestra el diagrama del proceso de manufactura del producto **plenum**, el cual consta de 19 Fases que se explican a continuación.

Fase 1: Recibo de *prepreg*. Esta es la fase inicial del proceso e inicia con la llegada de la materia prima, llamada *prepreg*. Este es un material compuesto de poliamida, el cual se recibe en rollos y empaquetado con una bolsa plástica.

Fase 2: Congelación de *prepreg*. En esta fase se prepara el material *prepreg* para su almacenamiento temporal, introduciéndolo al congelador a una temperatura de -15 °F.

Fase 3. Descongelación de *prepreg*. Una vez que el *prepreg* se va a utilizar, se saca del congelador. Posteriormente, se coloca en un estante para descongelarlo por un periodo de 8 a 12 horas, o bien hasta que termine el proceso de condensación dentro de la bolsa. Esta fase concluye cuando el *prepreg* está completamente descongelado y listo para la siguiente fase.

Fase 4: Corte de material. Se remueve el material de la bolsa en la que está envuelto. Se extiende el rollo de *prepreg* sobre una mesa, la cual está cubierta por una hoja de plástico duro especial con la que puede estar en contacto la poliamida. En esta mesa, el rollo va pasando por una máquina que realiza los cortes derivados de un patrón previamente cargados en la computadora.

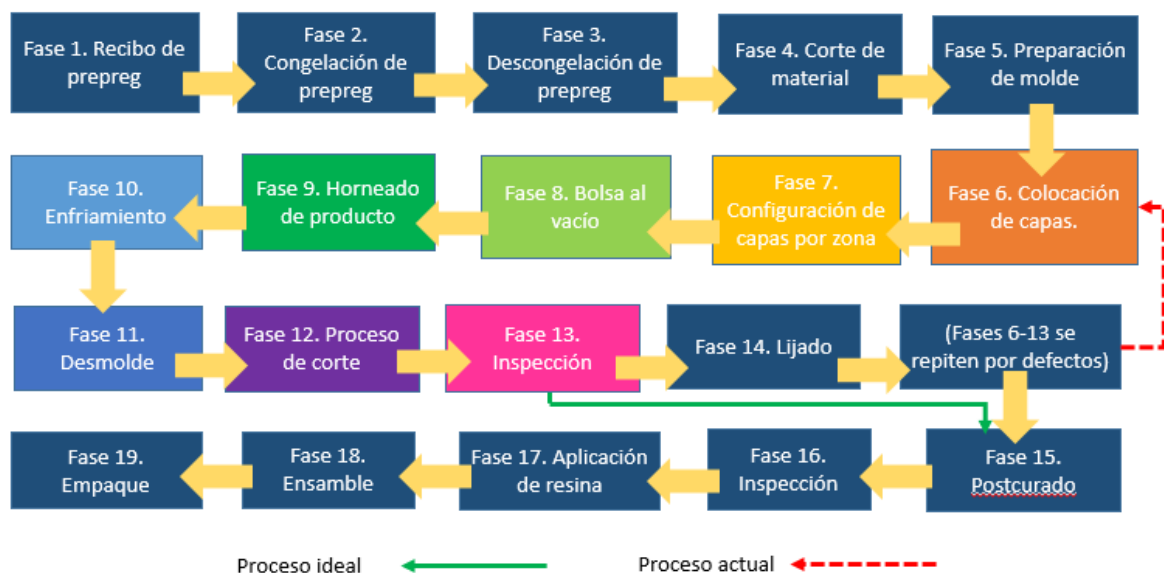


Figura 4. Diagrama del proceso de manufactura del plenum para el Gulfstream V. Fuente: Elaboración propia.

Fase 5: Preparación del molde. En esta fase acondiciona el molde a ser utilizado. Para ello se cuenta con dos tipos de molde de aluminio que tiene la forma del

producto: uno hueco y otro sólido. Un ejemplo se muestra en figura 5. Para su preparación, el molde hueco se cubre con una cinta especial llamada *release film*, la cual se coloca en las uniones del metal. La intención es que la resina que suelta el *prepreg* no se filtre por estas uniones. Por otro lado, se coloca más cinta para ambos moldes en los cambios abruptos de geometría. De esta manera, el material no quede pegado al molde y es más fácil desmoldarlo.

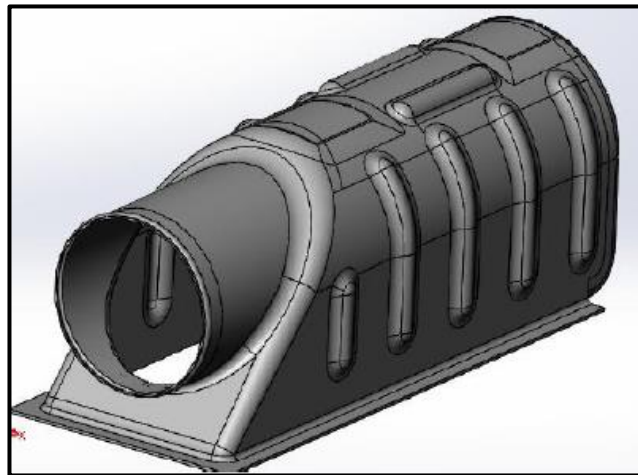


Figura 5. Modelo 3D actual del plenum del Gulsftream V.  
Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

Fase 6: Colocación de capas. En esta fase del proceso se cubre el molde con un plástico *Release Ease 234 TFNP*. Posteriormente, se van colocando las capas ya cortadas del *prepreg* sobre este plástico, y manualmente se les da forma alrededor del molde. En total son 18 capas de poliamida para el cuerpo, y 20 capas para la parte superior donde se instalan los soportes. Cada capa se coloca una sobre otra ya que el material tiene una resina pegajosa que hace que las capas vayan quedando unidas. La colocación de capas es crucial para el producto, porque es aquí donde cada capa debe colocarse cuidando que no se formen arrugas o que haya exceso de resina.

Fase 7: Configuración de capas por zona. Existen dos tipos de configuración en capas, las cuales se muestran en la Fig. 6. Es importante resaltar que este proceso puede tardar hasta 4 turnos.

- Mostrados de color azul en la imagen (Configuración 1), se coloca un *Release film* perforado conocido como *Whrightlon 5200B*. Después dos capas de fibra de vidrio, otra capa más de *Release Film* perforado y finalmente dos capas de una tela blanca “respirador” o *Airwave N10*.

- En la zona de la superficie café en la imagen (Configuración 2), se coloca otra capa de *Release Ease 234 TFNP*, una capa de *Bleeder Lease* o “capa de sangrado” y finalmente dos capas de “respirador” o *Airwave N10*.

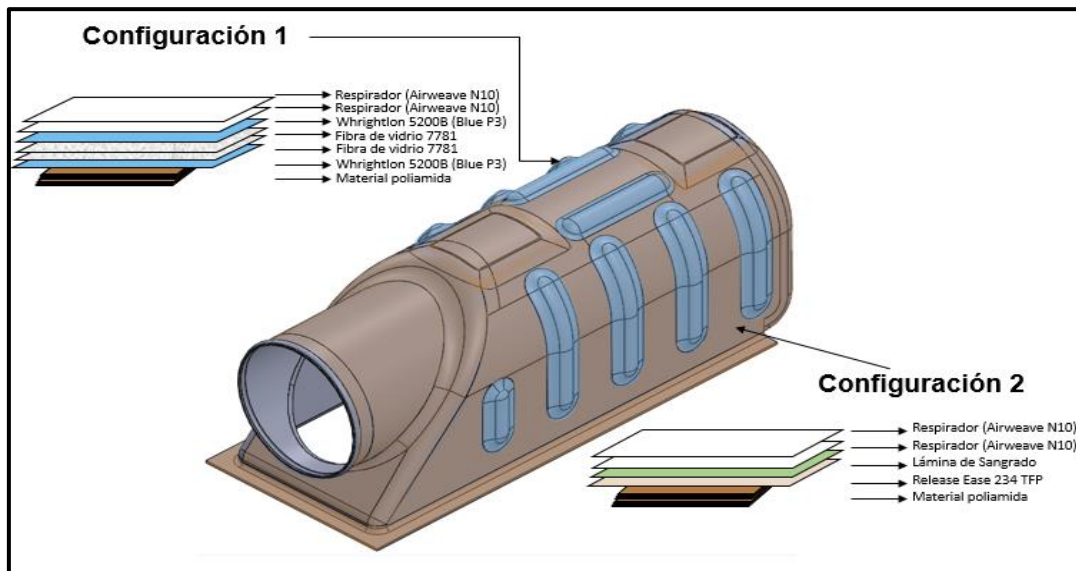


Figura 6. Fase 7, configuraciones de capas en distintas zonas del plenum.

Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

Finalmente, se le agregan unos *caul plates* o placas delgadas en la entrada, salida y en zonas críticas del **plenum** para ejercer presión entre las capas.

Fase 8: Bolsa al vacío. En esta fase, el producto es envuelto en una bolsa al vacío para sellarlo.

Fase 9: Horneado de producto. El producto es colocado dentro del horno a una temperatura de 350 °F por un periodo de 10 horas si el molde es hueco. Si el molde es sólido, se extiende hasta 16 horas.

Fase 10: Enfriamiento. En esta parte del proceso, el producto se saca del horno y se coloca en un estante para que pierda calor. Dependiendo de la producción, se coloca un abanico para ayudar a acelerar el proceso, o bien se deja al aire libre. Esta fase termina cuando el producto no está caliente al tacto.

Fase 11: Desmolde. Esta fase consiste en el desmolde del **plenum**, esto se realiza mediante golpes suaves, hasta que se logra separar la pieza del molde. Una vez desmontado, pasa a la siguiente fase.

Fase 12: Proceso de corte. En esta fase se remueven todos los filos encontrados en los bordes de la pieza.

Fase 13: Inspección. Se revisa el producto y se identifican las imperfecciones. Para ello, se realiza una prueba acústica, la cual consiste en dar golpeteos al **plenum** con una moneda. En las zonas donde suena hueco, se necesita retrabajar, pues significa que no hay una unión correcta de las capas. A este fenómeno se le conoce como puente entre fibras, y ocurre en las secciones del molde con radios abruptos. La presión que se aplica en las esquinas no es efectiva, lo cual provoca baja presión en esa zona y llenándose con resina (Baran et. Al, 2017). Además, se realiza una inspección visual donde se identifican las arrugas, las cuales se forman porque los pliegues de compuesto no se adhieren bien entre sí (Hassan et. Al, 2017). Estas arrugas deben tener una altura menor a .05" para ser aceptadas.

Fase 14: Lijado. En esta fase se traslada el producto al departamento de lijado, y se remueven las zonas marcadas por inspección. Dependiendo de la zona donde se haya identificado el defecto, regresa al proceso inicial de capas o Fase 6.

Fase 15: Postcurado. Cuando el producto es finalmente aceptado, inicia el proceso de postcurado en el horno a 700 °F. Esta fase termina cuando el **plenum** se enfría.

Fase 16: Inspección. El producto se inspecciona una vez más, ya que después del postcurado se pueden encontrar más defectos.

Fase 17: Aplicación de resina. En esta fase, se le aplica una resina al **plenum** para un mejor acabado y se deja secar por un periodo de 8 horas.

Fase 18: Ensamble. Se instalan dos soportes en la parte superior del **plenum**, una placa de identificación y se ensambla el difusor.

Fase 19: Empaque. El producto se empaca y se transporta a la planta de Torrance donde será ensamblado con otros componentes.

El proceso ideal de elaboración del **plenum** para el Gulfstream V debería pasar directamente de la Fase 13 a la Fase 15. Sin embargo, las fases de reproceso son parte del mismo proceso, ya que las piezas siempre muestran defectos.

## 1.2 Antecedentes

Como ya se mencionó, el producto **plenum** tiene un problema de reproceso, el cual se debe principalmente a los defectos de arrugas y delaminación en el producto. Además, esto provoca bajo rendimiento del departamento, lo cual ha sido abordado desde el 2015 con varios cambios en el proceso.

- Mejora de patrón de corte del material *prepreg*: Anteriormente, no todos los patrones de *prepreg* se cortaban en máquina, pues no cabían en la sección de material designada para ello. De tal manera, se cortaban los patrones faltantes manualmente, repercutiendo en el producto por uniformidad en los cortes. Se hizo una nueva distribución de los cortes y se lograron acomodar todos en la sección designada, como se muestra en la Figura 7. Con esto se logró eliminar el corte manual del proceso.

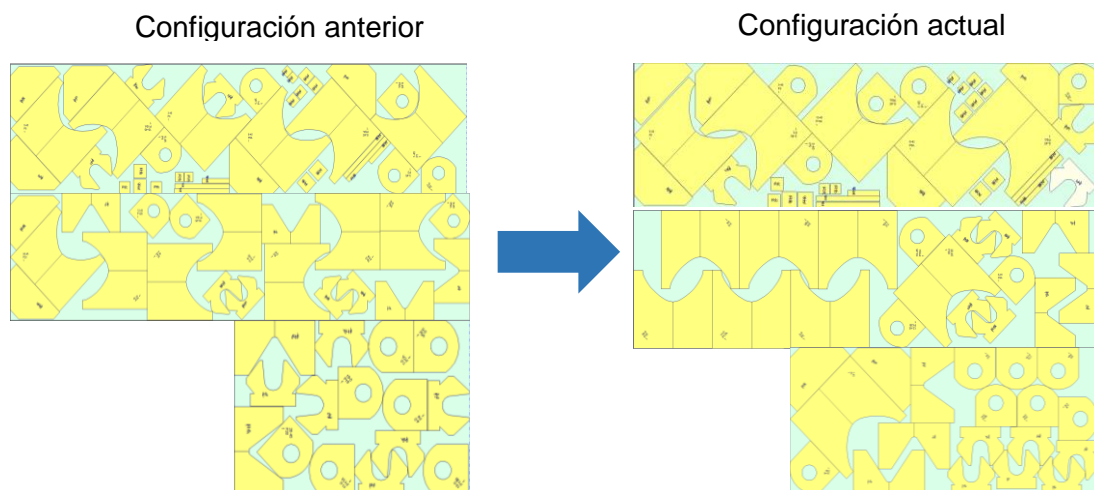


Figura 7. a) Configuración de corte de prepreg anterior. b) Configuración de corte de prepreg actual.

Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

- Implementación de *caul plates* o soportes: Se colocaron estos soportes en la entrada, salida y zonas críticas del **plenum** (Figura 8), con la finalidad de ejercer presión en las uniones de capas. Esto fue de ayuda para disminuir la generación de arrugas y delaminación, como se observa en la Figura 9.

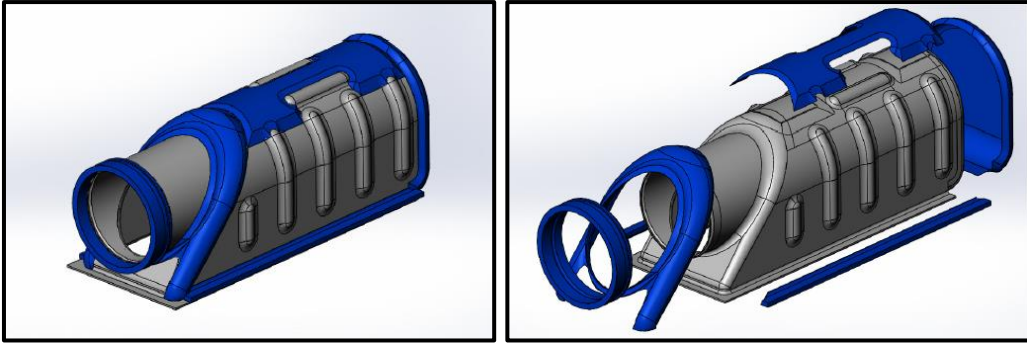


Figura 8. Caul plates diseñados para ejercer presión en zonas críticas.

Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

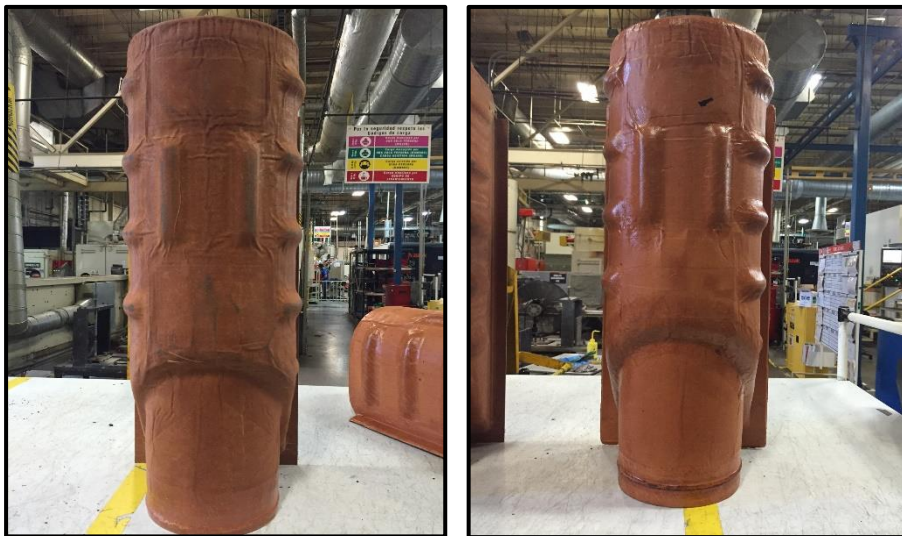
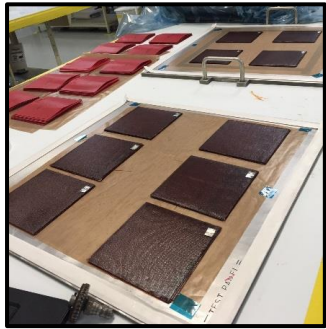


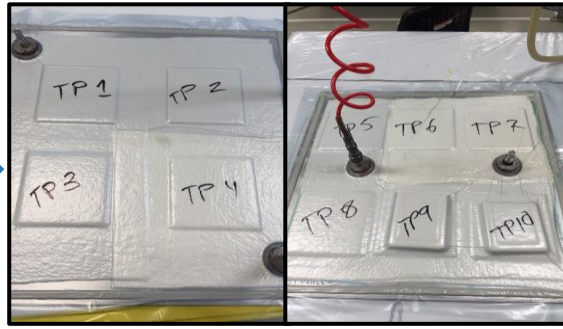
Figura 9. Izquierda. Proceso sin utilizar caul plates. Derecha. Plenum utilizando caul plates.

Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

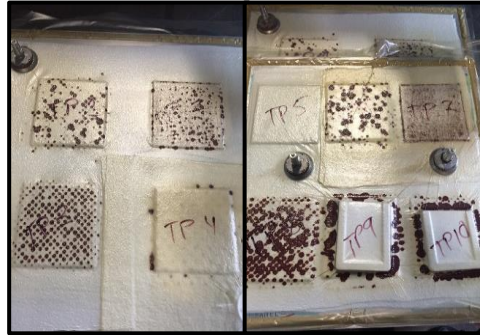
- Estudios de mejor distribución de capas: En total se realizaron 10 configuraciones de paneles de capas distintos (figura 10), para conocer cuál arreglo evita la extracción de resina del *prepreg* y cómo mejorar la calidad de las capas. Con este estudio se pudieron determinar las configuraciones necesarias para la zona del **plenum**, como se indicó en la Fig. .



Se crearon 10 paneles con diferentes configuraciones de capas y mismo proceso de curado.



Paneles antes del Proceso de curado.



Paneles después del proceso de curado.

Figura 10. Configuraciones de paneles. Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

- Posible rediseño del **plenum** con casting de aluminio: Actualmente, se cuenta con una posible solución de diseño hecha de casting y paneles de placa metálica de aluminio (Figura 11). Sin embargo, esta opción fue rechazada debido a que el **plenum** de aluminio tiene un peso mayor al del ensamble de compuesto.

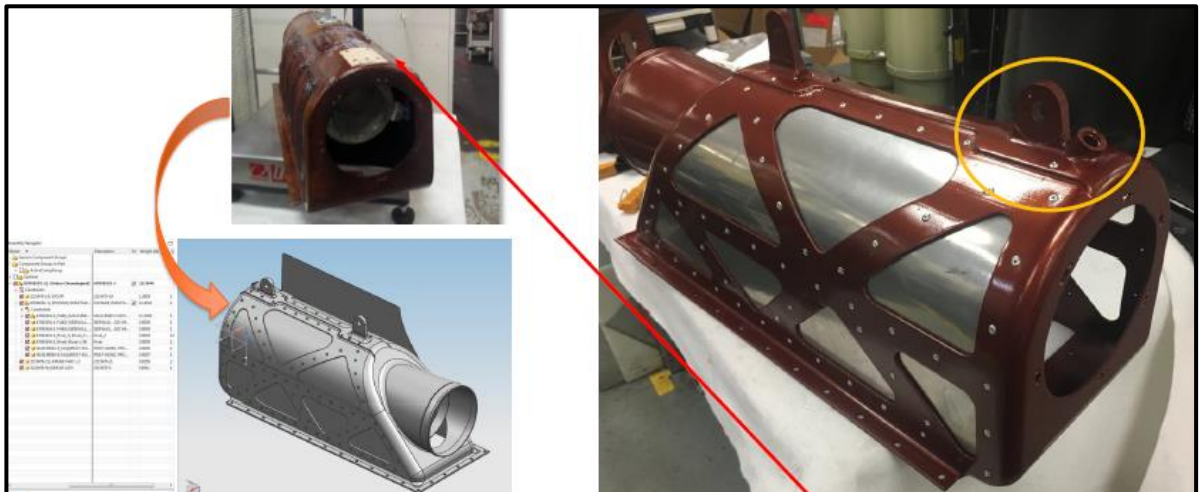


Figura 11. Rediseño de plenum de aluminio. Fuente: obtenido de documentación Honeywell.



Con base a estos cambios de proceso, se puede observar que se han realizado varias acciones en el departamento de Fibra de vidrio para aumentar el rendimiento y disminuir los defectos. Sin embargo, no se ha podido eliminar el tiempo de los reprocesos que se realizan al **plenum** del Gulfstream V, puesto que todavía presentan defectos.

Con respecto a la propuesta de diseño de aluminio, se planea partir de este diseño y mejorar la cuestión de peso y distribución de esfuerzos. Sin embargo, también se realizan otras propuestas nuevas de diseño que cumplan con los requerimientos.

### 1.3 Justificación General

La innovación es la clave para que una empresa siga siendo competitiva, hoy en día *Honeywell* busca reducir los gastos operativos en el lanzamiento de nuevos productos y poder presentar nuevas soluciones en tiempo y forma enfatizando así la filosofía del ahorro y la eficiencia.

Este proyecto plantea desarrollar una propuesta de diseño para el **plenum** del Gulfstream V que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad, y permita reducir el costo del proceso de fabricación.

Al presentar un diseño funcional que permita eliminar las arrugas y delaminación en el producto (Figura 12), facilita la mejora del rendimiento en el departamento de Fibra de Vidrio ubicado en la planta “*Integrated Supply Chain*” (ISC), el cual se encarga de fabricar este producto.



Figura 12. Defectos en Diseño actual Plenum GV. Fuente: obtenido de documentación Honeywell

Con los resultados obtenidos de este proyecto, la compañía pretende disminuir el número de reprocesos en el producto, así como el tiempo y los costos que éstos generan. Además, al cambiar el diseño, el material y el método de manufactura, se

abre la posibilidad de explorar nuevos procesos para diferentes productos que presentan el mismo tipo de defectos.

Por otro lado, al poder identificar el material y diseño adecuado para este tipo de **plenum** con una configuración diferente a la que existe en el mercado aeroespacial, es posible aplicar para una patente. Lo cual es un beneficio para Honeywell y para la comunidad aeroespacial.

#### **1.4 Planteamiento del Problema**

En la ciudad de Mexicali, Baja California, se encuentra la división de Honeywell Aeroespacial “Integrated Supply Chain” (ISC). En esta planta se fabrican diversos componentes aeroespaciales, como intercambiadores de calor, actuadores, convertidores de ozono, entre otros.

El diseño y la fabricación de algunos componentes aeroespaciales forman parte de la producción desde hace años. Por lo cual, es común que, con el paso del tiempo, se necesiten mejoras en el diseño, material, procesos o incluso el ensamblaje de los componentes.

El departamento de “Product Support Engineering” (PSE) empezó a trabajar en el 2015 en el rediseño del **plenum** para el Gulfstream V, el cual es un jet ejecutivo para pocos pasajeros. El proceso actual de manufactura del **plenum**, se realiza en la celda de Fibra de Vidrio, y consiste en una serie de pasos de preparación de molde, curado en el horno, maquinado, inspección, así como aplicación de varias capas de material. Debido a este proceso, se ha observado que, al aplicar cada capa de compuesto, se forman “arrugas” y delaminación del material, para lo cual es requerido realizar en cada **plenum** de 4 iteraciones de reproceso. En la Figura 13 se muestran las horas dedicadas a reprocesos al mes, las cuales representan el 26% de las horas totales de enero a octubre del total de plenum fabricados.

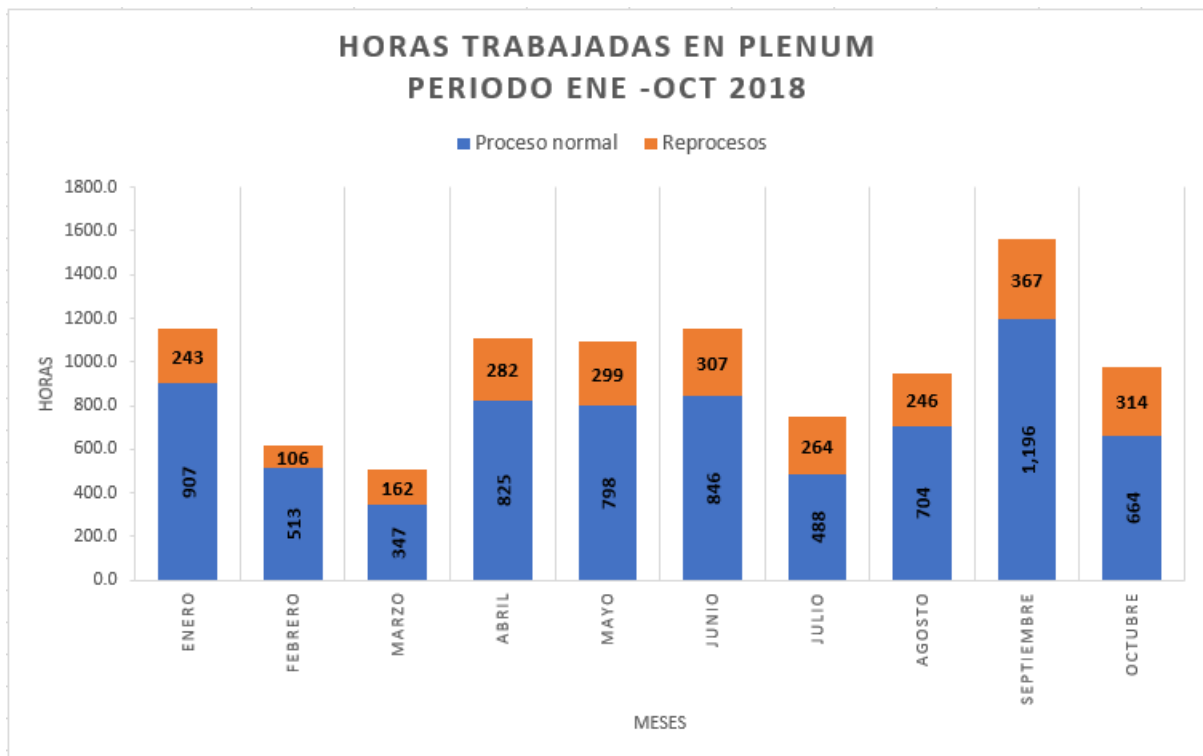


Figura 13. Horas trabajadas en Plenum en el periodo de enero a octubre 2018. Fuente: obtenido de documentación de Honeywell.

Para la división aeroespacial de Honeywell el rendimiento o “*yield*” de cada departamento es de gran interés. El “*yield*” corresponde a el porcentaje de horas efectivas trabajadas por empleado y por departamento en programas que le generan ingresos a la compañía. Por lo que cada reproceso en la fabricación de un componente, provoca un decremento en dicho rendimiento. Como el reproceso se ha vuelto parte de la producción diaria, se decidió agregarlo como parte de la secuencia de pasos en el proceso de la fabricación de los **plenums**, como una solución temporal para mejorar el rendimiento. Sin embargo, se espera reducir estos reprocesos para obtener un rendimiento real y positivo.

Por otro lado, la demanda del 2018 fue de 212 *plenums*, de acuerdo al tiempo estándar, cada plenum necesita 21 horas de reprocesos en promedio, lo cual equivale a \$115,052.65 dólares, que es el equivalente al 28% de los costos totales de los procesos, como se puede observar en la Figura 14.

Hasta el momento, se han realizado esfuerzos que han consistido en implementar presión en las regiones del **plenum** donde se han observados las arrugas y la

delaminación, como es el caso de los radios abruptos. No obstante, el producto aún sigue presentando defectos.

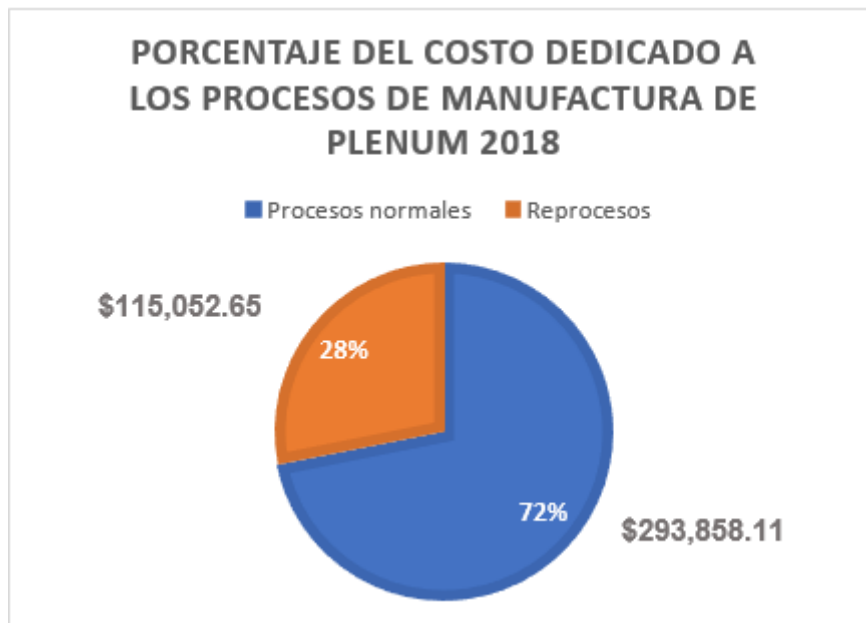


Figura 14. Porcentaje del costo de los procesos de manufactura para la demanda de Plenum en el 2018. Fuente: obtenido de documentación de Honeywell.

Aunque se han realizado varias mejoras al proceso de fabricación de **Plenum**, éstas no han sido el impacto esperado por la compañía. Por lo tanto, Honeywell ha buscado la alternativa de lanzar un proyecto mayor que tiene como finalidad “Desarrollar una propuesta de diseño para el *Plenum* del Gulfstream V que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad, y permita reducir el costo del proceso de fabricación”.

Como se mencionó en la sección de Antecedentes, este proyecto inició en el 2015 por otro equipo de Honeywell. Se obtuvieron algunos avances, como un diseño preliminar y una cotización de fundición. Por lo cual, se pudo realizar una estimación del ahorro del proyecto de resultar exitoso, el cual se muestra en Tabla 1.

Tabla 1. Costos de manufactura del plenum actual y costos estimados de manufactura por fundición.

<b>Proceso actual (compuesto)</b>	<b>Costo (dólares)</b>
Plenum	3,331.94
Ensamble	1,744.97
Total	5,076.91
<b>Proceso fundición (estimado)</b>	<b>Costo (dólares)</b>
Plenum	1,650.00
Maquinado y Ensamble	1,744.97
Total	3,394.97
<b>Ahorro por plenum</b>	<b>1681.94</b>

Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

Es importante resaltar que el esfuerzo que se hizo hasta el momento previo a este proyecto no fue suficiente para llevar a cabo la transición de un proceso a otro. Las propuestas de diseño y análisis no fueron completadas, y no se logró reducir o igualar el peso al plenum de compuesto.

En el 2019, se tiene una demanda proyectada de 322 plenum, si el ahorro aproximado por cada plenum es de \$1681.94 dólares, significa un ahorro total en el 2019 de \$541,584.68 dólares. Sin embargo, de acuerdo al proveedor, es necesario realizar una inversión inicial por el molde para fundición de \$100,000.00 dólares. Por lo cual, el ahorro sería de \$441,584.68 dólares aproximadamente. Por esta razón fue necesario retomar el proyecto, buscando alternativas que puedan ser implementadas.

Esta nueva iniciativa en búsqueda de nuevas alternativas se dividió en 6 áreas de investigación que incluyen: dos nuevas propuestas de diseño, análisis de elemento finito, análisis de fluidos y su viabilidad de manufactura. Además, es necesario realizar dibujos con el fin de obtener cotizaciones de proveedores, y poder calcular costos. Finalmente, la mejor propuesta de diseño será impresa en 3D como un primer prototipo conceptual.

## **1.5 Descripción del Proyecto Global**

### **Pregunta Global de Investigación**

De acuerdo con el problema descrito anteriormente, la compañía lanza un proyecto global, a partir del cual, se plantea la siguiente pregunta de investigación.

- ¿Cómo desarrollar un nuevo diseño para el plenum del Gulfstream V asegurando que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad impartidos por Gulfstream y permita mejorar el proceso de fabricación actual?

### **Objetivo Global.**

A partir de la pregunta planteada, se presenta el objetivo general del proyecto global, el cual será abordado por un equipo dividiéndolo en 5 áreas de investigación, donde cada una de ellas contará con uno o más objetivos generales.

El objetivo general del proyecto global es el siguiente:

- Desarrollar una propuesta de diseño para el plenum del Gulfstream V que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad, y permita reducir el costo del proceso de fabricación.

### **Estrategia General de Solución**

Para el desarrollo de este proyecto y lograr dar respuesta a la pregunta global de investigación planteada, así como, lograr el objetivo del proyecto global, se estableció una estrategia, la cual consistió en dividir el proyecto en 7 áreas de investigación basadas en las áreas y procesos sustantivos para el logro del mismo. La forma de estructurar el problema es mostrada en la Figura 15. Donde se presentan cada una de las áreas de investigación y las colaboraciones entre ellas.

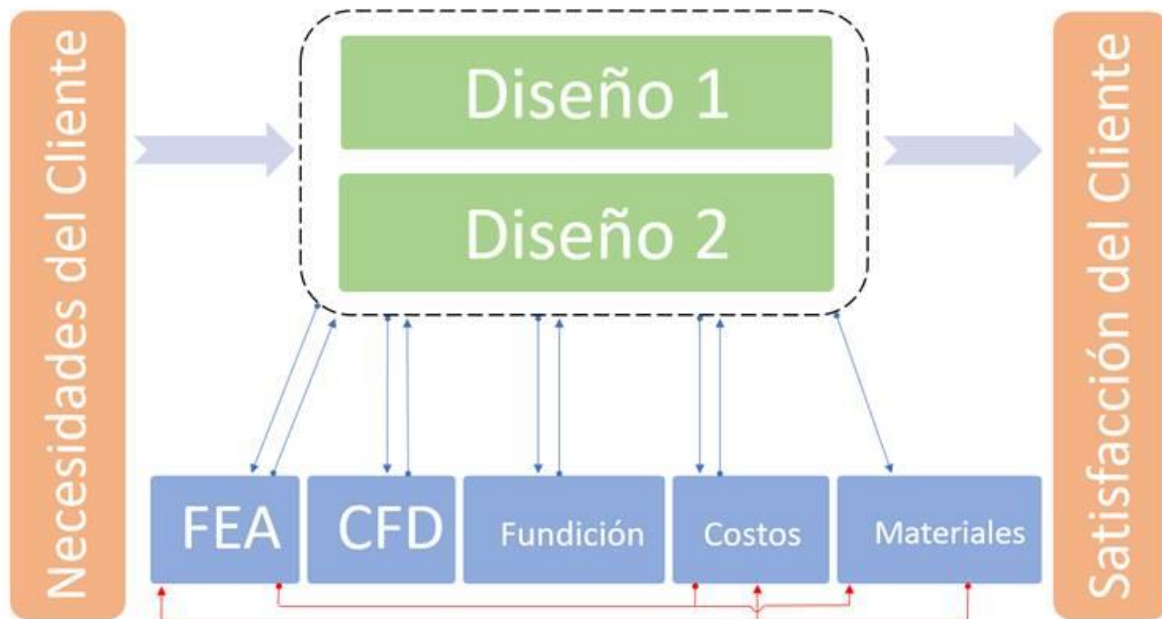


Figura 15. Diagrama de proceso sustantivos, fuente: elaboración propia.

Una breve descripción de los procesos sustantivos dentro de la metodología del Proyecto Global se presenta a continuación.

**Diseño 1:** Este proceso sustantivo consiste en integrar los requisitos del sistema de control ambiental junto con las especificaciones del proceso de manufactura propuesto, también involucra retro alimentaciones de los procesos de análisis de elemento finito, inspire cast, Análisis de materiales, Análisis CFD y costos tomando en cuenta el cumplimiento de los requerimientos de cada uno de estos procesos para obtener un modelo con una topología que reduzca peso, costo de fabricación y cumpla las especificaciones de desempeño requeridas por el sistema de control ambiental.

**Diseño 2:** Este proceso sustantivo consiste en integrar metodologías de DFMA para su fácil fabricación y ensamblaje, y que reduzca el peso actual, además de mantener la funcionalidad para la que ha sido desarrollada. Se realizará una validación de los procesos de análisis de elemento finito, simulación de proceso de manufactura, análisis de materiales, Análisis de CFD y costos para asegurar que cumpla con los requerimientos de desempeño requeridos por el sistema de control ambiental.

**Análisis de Elemento Finito [FEA]:** En esta parte del proceso, se realizan cálculos con las cargas que reaccionan en el plenum. Posteriormente, se analizan las

propuestas de diseño en 3D del Gulfstream V, mediante un software de análisis. En él, se introducen parámetros de presión y temperatura que experimenta el plenum durante operación. Finalmente, con los resultados de los análisis, se brindan recomendaciones a los diseñadores para reforzar el plenum, o bien, para disminuir su peso. Con los nuevos diseños, se realizan iteraciones de análisis hasta encontrar la propuesta que mantenga un balance entre peso y factor de seguridad.

**Selección de Materiales [Materiales]:** En este proceso sustantivo, se planea encontrar los mejores materiales para la fabricación del nuevo diseño del plenum del Gulfstream V mediante el uso de herramientas computacionales que facilitan la comparación entre grandes grupos de materiales realizando filtros en base a diferentes propiedades y características, tanto físicas como mecánicas de los materiales.

**Análisis de Fundición [Fundición]:** En este proceso, se planea definir la viabilidad y optimizar el proceso de fundición para manufacturar la armadura del plenum del Gulfstream V. Se realizará una simulación de fundición por computadora utilizando un software especializado para este tipo de análisis.

**Análisis de Fluidos [CFD]:** Se refiere a las actividades de análisis de fluidos en el componente, que son analizar 2 casos por cada diseño, partiendo del diseño actual y posteriormente las dos propuestas de diseño. Finalmente se compararán los datos obtenidos de presión, temperatura y flujo másico, así como el régimen general del fluido a lo largo del Plenum para validar por comparación la funcionalidad de los nuevos diseños. Inputs: Diseño 3D. Outputs: Modificaciones para diseño, validación del diseño.

**Cotización de Costos [Costos]:** Engloba las actividades de cotización de los nuevos diseños para el Plenum del Gulfstream V y comparación de costos de fabricación con respecto al diseño y proceso actuales. Inputs: Diseños Validados, Características del moldeo, Material seleccionado. Outputs: Uno o varios proveedores en la región con precios competitivos y la capacidad de fabricar los nuevos diseños para el Plenum del Gulfstream V y un análisis comparativo de costos.



## **1.6 Preguntas de Investigación.**

El presente proyecto tiene como función aportar a la investigación general con las siguientes preguntas:

¿Cómo diseñar un modelo con una topología que reduzca peso, costo de fabricación y cumpla las especificaciones de desempeño requeridas por el sistema de control ambiental?

- ¿Cuáles son las especificaciones funcionales que el sistema de control ambiental requiere?
- ¿Cuáles son las alternativas viables para el proceso para fabricación que busque reducir costos de manufactura?
- ¿Cuáles son las restricciones del proceso seleccionado?
- ¿Cuál es la topología que cumpla con los requerimientos de proceso y los requerimientos de desempeño del sistema de control ambiental?

## **1.7 Justificación Especifica**

Este proyecto pretende aportar a la iniciativa general con desarrollar un modelo con una topología que reduzca el peso, costo y cumpla las especificaciones de desempeño del sistema de control ambiental.

El impacto de buscar un nuevo diseño para este producto va significar en la posible reducción de tiempos y costos de producción, salirse del proceso convencional buscar nuevas opciones, más alternativas, esto proporciona ventajas competitivas para la empresa y genera mayor acervo tecnológico.

En este proceso de rediseño se implementan conocimientos cubiertos por el programa de Maestría en ingeniería e Innovación como lo son aerodinámica, análisis de elementos finitos, materiales compuestos entre otros, al darle una utilidad inmediata a los conocimientos, se puede observar que el programa de maestría ya está rindiendo sus primeros frutos.

En lo personal este proyecto ofrece la oportunidad de interactuar con diversas disciplinas dentro de Honeywell y Cetys universidad dándole mayor solidez a los conocimientos adquiridos a lo largo del programa, también complementa el aprendizaje teórico con el práctico abriendo la puerta para posibles desarrollos de

patentes o productos similares que compartan la misma problemática dentro de catálogo de Honeywell.

### **1.8 Objetivos general de la investigación:**

El presente proyecto tiene como función aportar a la investigación general con los siguientes objetivos:

- Desarrollar un modelo con una topología que reduzca peso, costo de fabricación y cumpla las especificaciones de desempeño requeridas por el sistema de control ambiental.
  - Identificar las especificaciones funcionales requeridas por el sistema de control ambiental.
  - Proponer alternativa de proceso de fabricación para reducir costos de manufactura e identificar sus restricciones.
  - Encontrar la topología que cumpla con los requerimientos de proceso y los requerimientos de desempeño del sistema de control ambiental.

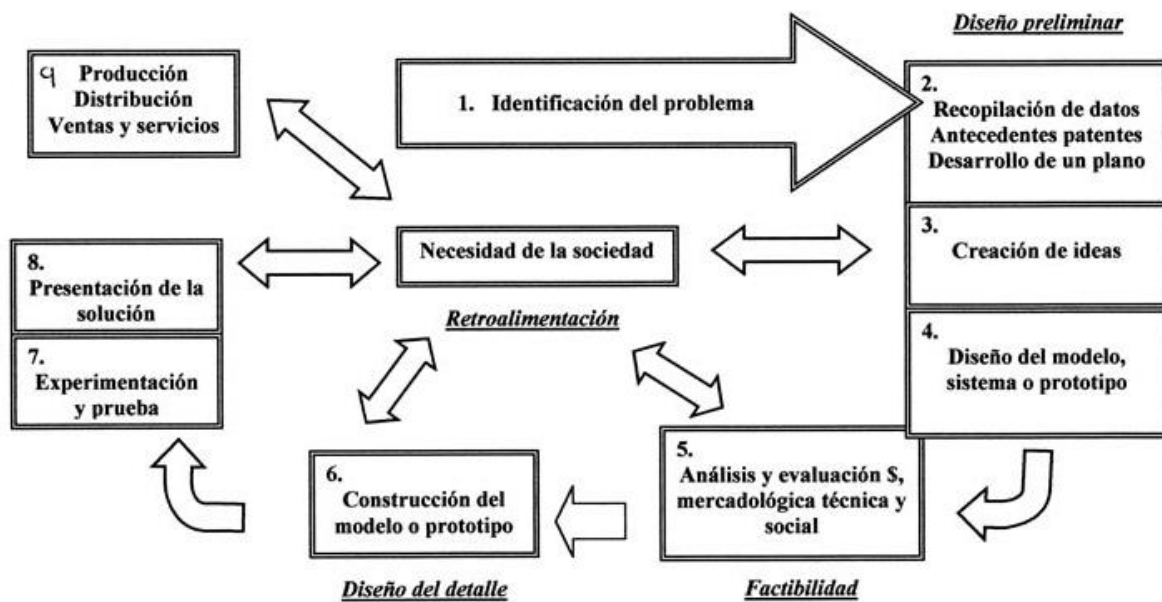
### **1.9 Planteamiento de Hipótesis.**

Mediante la implementación de distintos procesos de fabricación se puede replantear el diseño del Plenum Gv con el fin reducir peso, costo de fabricación y cumplir las especificaciones de desempeño requeridas por el sistema de control ambiental.

# Capítulo 2: Marco Teórico

## 2.1 Proceso de Diseño

El diseño es la transformación de los requerimientos en una forma adecuada para la fabricación o la utilización. El proceso de diseño puede abarcar la investigación y el desarrollo, siendo actividades de carácter creativo. Este proceso es iterativo, en cierto sentido nunca se termina. Los usuarios alimentan nueva información y se descubren formas para mejorar los diseños que reduzcan los costos y mejoren la calidad (UNAM 2019).



**Nota:** la retroalimentación se da en todos los puntos y en todos los sentidos. No existe un orden real en los pasos mencionados.

Figura 16. Proceso de diseño de ingeniería industrial, fuente: UNAM (2019).

### 2.1.1 Responsabilidad del diseño

el proceso de diseño tiene las siguientes características (UNAM 2019):

- Su finalidad es recoger las necesidades del mercado y transformarlas de tal forma que pueda satisfacerlas la unidad operativa.
- Las decisiones tomadas durante el proceso de diseño pueden tener efectos importantes a largo plazo en toda la organización.
- El proceso de diseño en todos aspectos tiene efectos económicos, de desarrollo, y de permanencia de las empresas e instituciones de ahí su importancia.
- La primera consideración es crear algo que satisfaga funcionalmente los requerimientos.

### 2.1.2 Etapas del proceso de diseño

En todo proyecto, el proceso de diseño debe pasar por las siguientes etapas:

1. Concepción: ésta se puede subdividir en cuatro etapas, a las que llamaremos causas:
  - Causa primera: Es el motivo, cualquiera que sea, en ella está la necesidad humana, sin ella no existiría el diseño.
  - Causa Formal: Comienza cuando imaginamos Como será el objeto a diseñar, y es así como empieza a adquirir forma en la mente. Es probable que se agarre lápiz y papel y con ello empecemos a bocetar. De esta manera vemos la forma preliminar, tenemos una idea acerca de los materiales que hemos de emplear, imaginamos maneras de fabricarlos, de ensamblarlos, de venderlos etc.
  - Causa Material: Lo que hemos imaginado, no es el producto simplemente representa una idea que se realizara en madera, en metal, en plástico u otro material cualquiera. No es factible imaginar una forma real si no es en algún material, tal es la causa material.

- Causa Técnica: Parte de la naturaleza de los materiales es la manera en que podemos darles forma, tal es la causa técnica. Lo que se desea hacer y el material elegido sugerirá herramientas y técnicas apropiadas.
2. Aceptación: Es cuando se demuestra que las especificaciones son alcanzadas por medio de cálculos matemáticos, bocetos, modelos experimentales, maquetas o pruebas de laboratorio.
  3. Ejecución: Cuando se preparan varios modelos a partir del trabajo de la etapa de aceptación. Se construyen plantas piloto como continuación de los experimentos o pruebas.
  4. Adecuación: Etapa en la cuál el proyecto adquiere una forma que permite integrarlo a la organización y ajustarlo a las especificaciones definitivas.
  5. Reproducción: Cuando se producen las cantidades suficientes para comprobar el diseño, las herramienta y las especificaciones. Para después proceder a la producción, siendo la última etapa del proceso de diseño.

## **2.2 Diseños Asistidos por Computadora (CAD)**

"Computer-Aided Design." Por sus siglas en inglés, representa la implementación de las computadoras para crear diseños en 2D y 3D, comúnmente los archivos generados en estos softwares consisten en un modelo 3D y un componente 2D.

Los modelos 3D son típicamente basados en vectores de 3 dimensiones, esto permite a los diseñadores crear complejas formas en 3D que pueden ser movida, rotadas, escaladas y modificadas. (Techterms 2019).

## 2.3 Diseño para la Manufactura y Ensamble (DFMA)

Araque y Vélez (2016) definen el Diseño para la Manufactura y Ensamble (DFMA) como la integración del Diseño para el Ensamble (DFA) y el Diseño para la Manufactura (DFM) en la búsqueda y solución de problemas relacionados con la fabricación y ensamble de productos y gestión de los mismos desde una etapa temprana de diseño.

En un aspecto general, los diseños DFA se enfocan en los costos relacionados con la mano de obra necesaria para realizar el producto. El diseño para la manufactura (DFM) se relaciona con las herramientas y materiales necesarios en el procesamiento de los diseños para un nuevo producto por medio de una revisión “explosionada” de los componentes y búsqueda de diseños simples donde se pueda reemplazar, mejorar o eliminar piezas relacionadas.

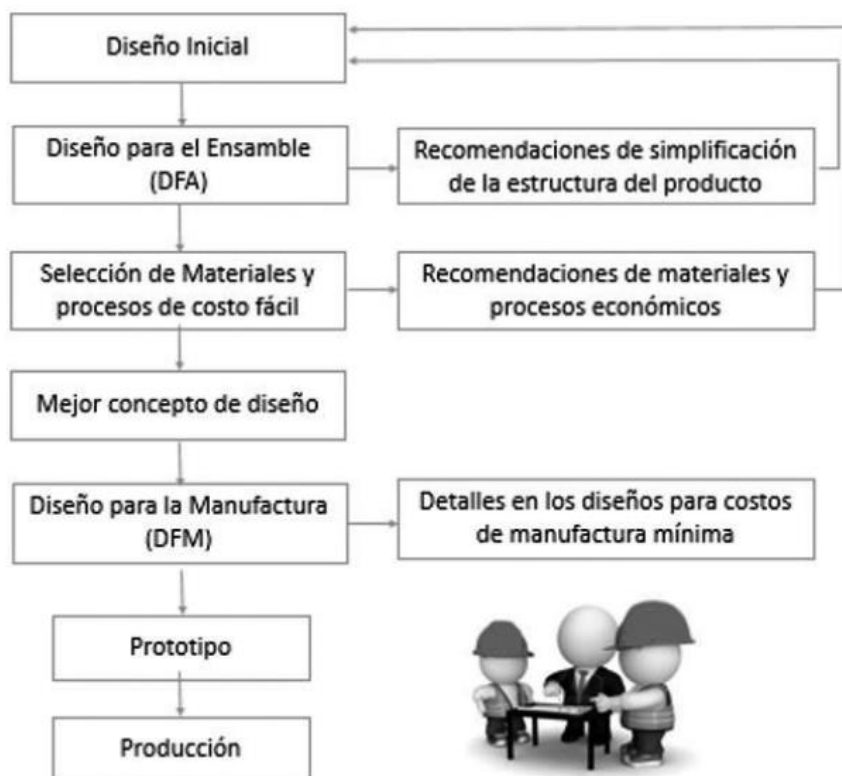


Figura 17. Proceso del DFMA, Fuente: Araque y Vélez (2016)

## **2.4 Optimización topológica.**

La optimización topológica (TO) es una herramienta matemática utilizada en la temprana etapa de diseño conceptual con el fin de resolver el problema de reducción de peso de la parte mediante una distribución óptima de material a través del cuerpo del componente.

Generalmente para implementar la TO es necesario establecer las funciones de objetivo, las restricciones, propiedades de material y las características geométricas esenciales del componente. Con esta información la herramienta TO buscará distribuir el material a través del volumen establecido cumpliendo los requerimientos de diseño. (Rezaie, 2014).

## **2.5 Optimización dimensional:**

Según Zhu(2018) esta optimización es la más fundamental y determina las dimensiones óptimas de la estructura. Las variables de diseño pueden ser espesor, ancho y largo de los objetos a estudiar. En este proceso, las propiedades de la sección de una parte dada son modificadas para cumplir con un objetivo en específico, que puede ser esfuerzo, desplazamiento u otro criterio.

## **2.6 Optimización de forma:**

La optimización de forma se enfoca en la forma de las estructuras como sus límites exteriores y la forma de sus agujeros. Se utiliza comúnmente para designar la forma de los límites de la estructura mediante la modificación y ubicación de la red estructural. Sin embargo, la conectividad de la estructura no es modificada por este proceso de optimización (Zhu, 2018).

## **2.7 Optistruct:**

Se trata de una herramienta capaz de eficientizar el proceso de diseño mediante el uso de una herramienta llamada optistruct el cual utiliza algoritmos de programación matemática para optimizar el diseño estructuralmente según las restricciones establecidas.

Estos algoritmos tienen las siguientes características:

- Requieren información de sensibilidad a medida que usan los gradientes.

- Resuelven por medio del método de fase estacionaria usando lógica matemática.
- Utilizan pocas funciones de evaluación
- Convergen en un mínimo local

como comparativo observamos los siguientes procesos:

- Diseño clásico:
  1. Creación de diseño
  2. Análisis del diseño
  3. Evaluación de resultados
  4. identificación de factores limitantes (costo, requerimientos, tiempo etc.)
  5. Actualización de diseño
  6. Regresar al análisis.
  
- Diseño con Optistruct
  1. Creación de un modelo
  2. Definición de variables de diseño y restricciones.
  3. Evaluación computacional automática del Espacio de diseño.
    - Evaluación de resultados de análisis.
    - Actualización de diseño.
    - Regresar al análisis.

A medida que el desarrollo del concepto avanza se puede observar en la Figura 18 la relación entre libertad de diseño(amarillo), conocimiento del producto(naranja) y la ruta del proceso de optimización de diseño conceptual(punteada).



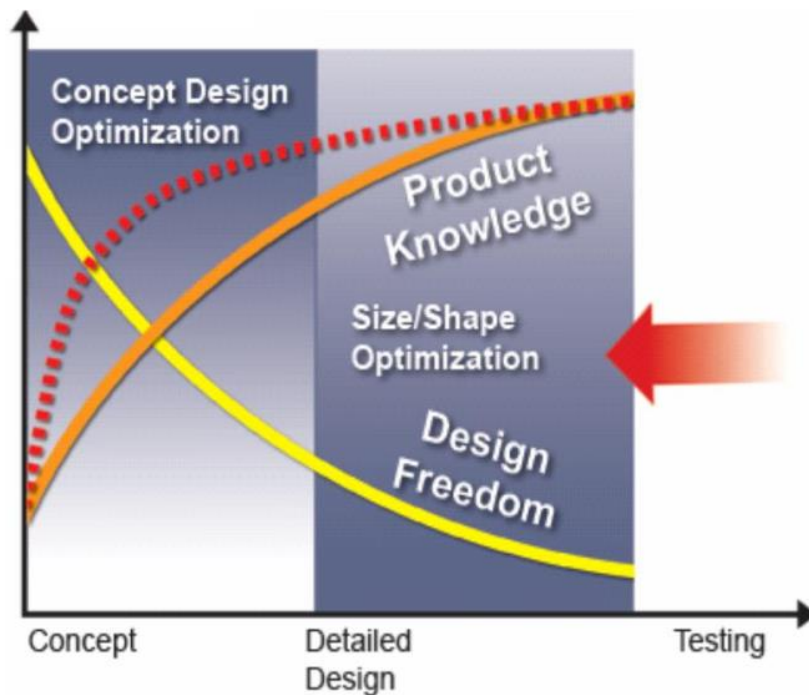


Figura 18. Desarrollo de diseño conceptual. (recuperado de *Optistruct Optimization V2017.2.pdf* de Altair).

Como es un hecho conocido que la mayor parte del costo de un producto es determinado en la fase de diseño conceptual, Optistruct ofrece herramientas de diseño conceptual que minimizan el rediseño subsecuente, costos y tiempo para lanzamiento al mercado.

## 2.8 Manufactura aditiva

Un análisis histórico de la manufactura aditiva (AM) muestra que sus raíces surgen de la foto escultura de la década de 1860 y la topografía de la década de 1890, estas tecnologías condujeron al descubrimiento del grabado por fotoglifo patentado en 1951 que consistía en exponer selectivamente capas de material foto sensible mientras se escaneaba las secciones transversales del objeto a copiar. El proceso moderno de estéreo litografía (SLA) tiene fuertes nexos con el proceso de fotoglifo. Por lo tanto, no es de sorprender que el proceso de foto escultura está fuertemente referenciado en la literatura AM.

El proceso de manufactura aditiva (AM) es aquel donde se fabrica un producto por medio capas o secciones transversales sucesivas, el proceso comienza con un objeto tridimensional en formato CAD, que después es rebabando en miles de capas por

medio de un software, cada una de estas capas es creada de acuerdo a una deposición de material selectiva. (Gao, 2015)

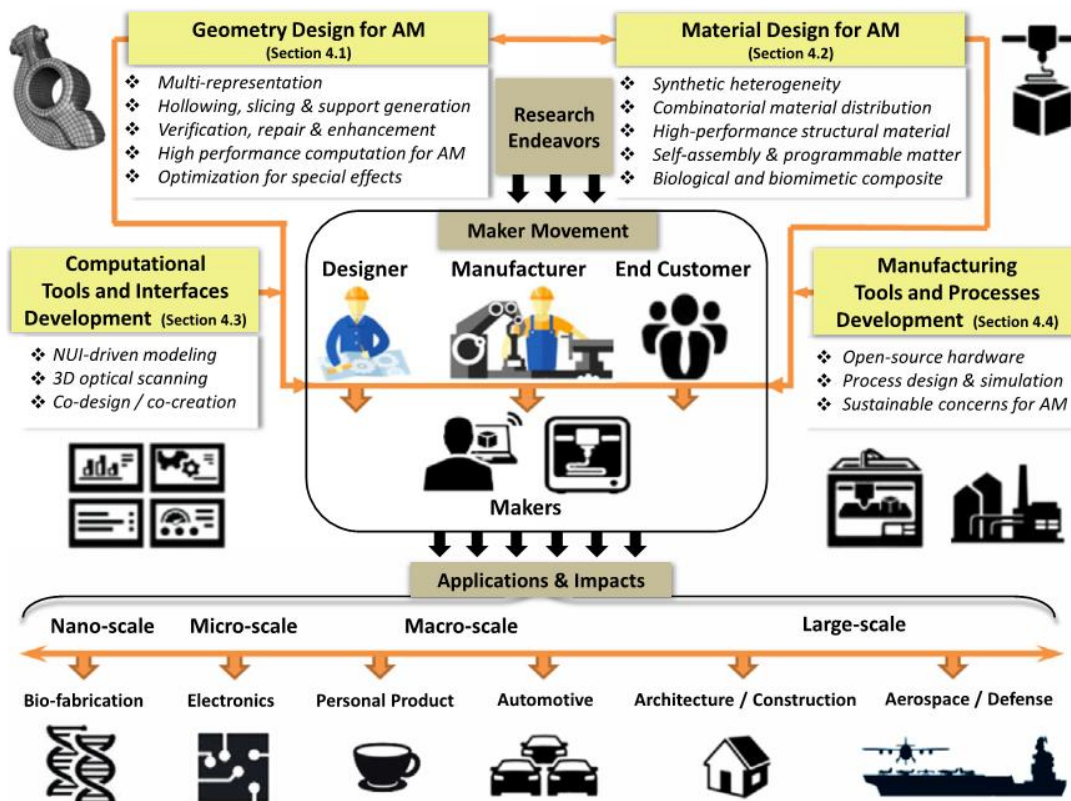


Figura 19. Proceso Geometría-material-máquina para AM. Fuente: Gao et al. (2015)

Ventajas:

- **Flexibilidad de diseño:** debido a la naturaleza del proceso AM se puede lograr casi cualquier forma ya que por el contrario las técnicas sustractivas como el desprendimiento de viruta dependen de restricciones herramientas, como son el riesgo de colisión, el espacio necesario para el cortador, variedad de herramientas etc.
- **Necesidad de ensamble:** Existe productos que de ser producidos por medio de técnicas convencionales necesitarían ser ensamblados por partes, la tecnología AM ofrece poder hacer componentes en una sola pieza con esto reduciendo tiempos de logística y costos de producción.
- **Eficiencia de tiempo y costo de producción:** los métodos convencionales como el moldeo por inyección son muy eficientes cuando se produce en masa, pero requieren una mayor inversión de herramientas para su implementación, mientras que la manufactura aditiva ofrece una ventaja con numero de

producción más pequeños y reduce la cantidad de material desperdiciado en su fabricación.

Desventajas:

- **Consistencia y estabilidad estructural:** Los materiales disponibles para AM son actualmente limitados, estos sufren de anisotropía al mostrar defectos de adhesión entre capas.
- **Tiempo de fabricación:** este parámetro depende de la velocidad de impresión de la máquina, el tamaño de la parte, el espesor de capa y la orientación de impresión, sin contar el tipo de proceso de impresión entre más alta sea la impresión, mayor el número de capas por lo tanto mayor es el tiempo de impresión.
- **Post procesamiento:** las piezas hechas con material de soporte requieren post procesamiento para su separación, cuando el material de soporte es soluble en agua se puede lavar, cuando no es el caso requiere de proceso de corte y pulido para tener un acabado final. (Gao 2015).

## 2.9 Direct Metal Laser sintering

El sinterizado metálico Laser directo por sus siglas en inglés DMLS es una forma de manufactura aditiva que deposita delgadas capas de material (micras), estas capas son fundidas por un rayo láser de 100  $\mu\text{m}$  de diámetro. El láser funde áreas específicas de cada capa: estas áreas solidifican y forman secciones de la pieza final. El proceso se repite a medida que se agregan capas adicionales. El equipo es capaz de desarrollar velocidades de desplazamiento de laser en el orden de unos pocos metros por segundo y acumular distancias de muchos kilómetros de desplazamiento. Una pieza terminada típicamente tiene miles de capas de material depositado. (Peralta 2016).

Como referencia se presenta el costo de la materia prima para este proceso en la Tabla 2.

Tabla 2. Costo por libra de polvo de aleaciones de Aluminio para DMLS

Material	\$/lb	Density (lb/in <sup>3</sup> )
AL (Al-Si-10mg)	\$ 25.00	0.06
AL (F357)	\$ 33.00	0.06

Fuente: Documentación Honeywell.

## 2.10 Proceso Hand lay up Prepeg

Prepeg o Pre impregnado es el nombre común que se le da al material de refuerzo en tela pre impregnado con resina. Esta resina típicamente epoxica ya tiene agregado el catalizador para el curado, como resultado el prepeg viene listo para montarse en el molde sin la necesidad de agregar resina, para poder hacer un buen curado es necesario aplicar calor y presión (Fibreglast 2019).

### 2.10.1 Ventajas of Prepregs

- A continuación, algunas ventajas del Prepeg:
- Máximas propiedades de resistencia mecánica. en este proceso es posible alcanzar un contenido 35% de resina controlando el exceso de resina y evitando defectos de producción como tenidos de material quebradizo que disminuyen el desempeño de la parte fabricada.
- Uniformidad y repetitividad esto significa que como el material tiene la cantidad necesaria de resina no habrá áreas secas o áreas con exceso de resina, facilitando así el acomodo de las capas de material compuesto y reduciendo los defectos.
- Es un proceso más limpio debido a que no se tiene que drenar tanta resina durante el curado.
- Menor tiempo de curado, una vez sacada la pieza del horno se puede utilizar para su función.
- Mejor estética, esta característica disminuye la aparición de burbujas o cámaras de aire entre láminas de material.
- 

### 2.10.2 Desventajas de Prepregs

- Es más costoso que implementar la resina la tela y el curado por separado.

- Vida de anaquel el material puede durar hasta 6 meses si es almacenado a 75°F. sin embargo si no se le da el almacenamiento adecuado el material puede empezar a curarse haciendo que no pueda ser utilizado para fabricación.
- Es necesario aplicar calor a una temperatura mínima de 270°F por un periodo de 4 horas. Muchos fabricantes utilizan autoclaves.

## 2.11 Materiales compuestos

Un material compuesto es cualquier material que consiste en al menos dos componentes, en este caso uno denominado matriz y otro refuerzo, estos dos componentes se combinan para sacar mejor provecho de las características de cada uno. Existe una gran variedad de fibras como fibra de vidrio, grafito, cuarzo, Kevlar etc, los materiales tipo matriz suelen ser termo fijos como epóxidos, poliésteres, fenólicos, poliamidas, bismaleimidias etc., o también pueden ser termoplásticos o metales como aluminio o acero.

El bloque básico de construcción es la lámina, estas son apiladas entre sí para formar un laminado.

Las láminas más comunes son de fibra o refuerzo unidireccional donde todas las fibras están alineadas en una dirección o también las láminas de tela donde las fibras son tejidas para brindar refuerzo en dos direcciones perpendiculares. Cada ensamble de laminado se controla con la orientación de sus laminas con respecto a un eje relativo.

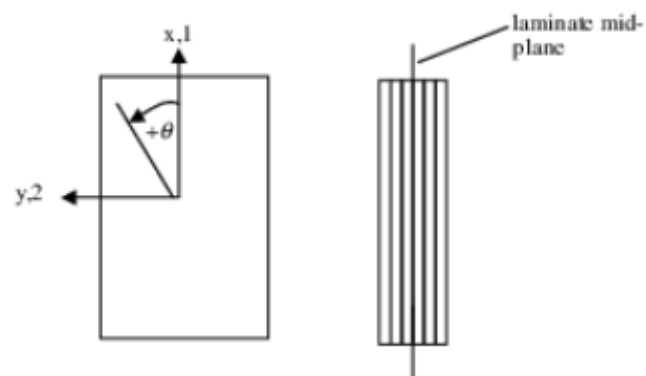


Figura 20. Proceso de laminado. (Design analysis of composite structures, documentación honeywell).

Los materiales compuestos han sido extensamente utilizados en la industria aeroespacial donde el requerimiento de reducir peso es una prioridad. En el pasado el costo no tenía tanta importancia como el desempeño, por lo tanto, muchos desarrollos de materiales compuestos se orientaron hacia el desempeño y resultaron siendo procesos muy costosos, como el proceso de la autoclave, este proceso requiere una inversión inicial muy costosa, así como el mantenimiento y operación de la misma.

El proceso fuera de autoclave (OOA) representa ahorros significativos en la fabricación lo que convierte a los materiales compuestos una opción donde antes no era posible por cuestiones de presupuesto.

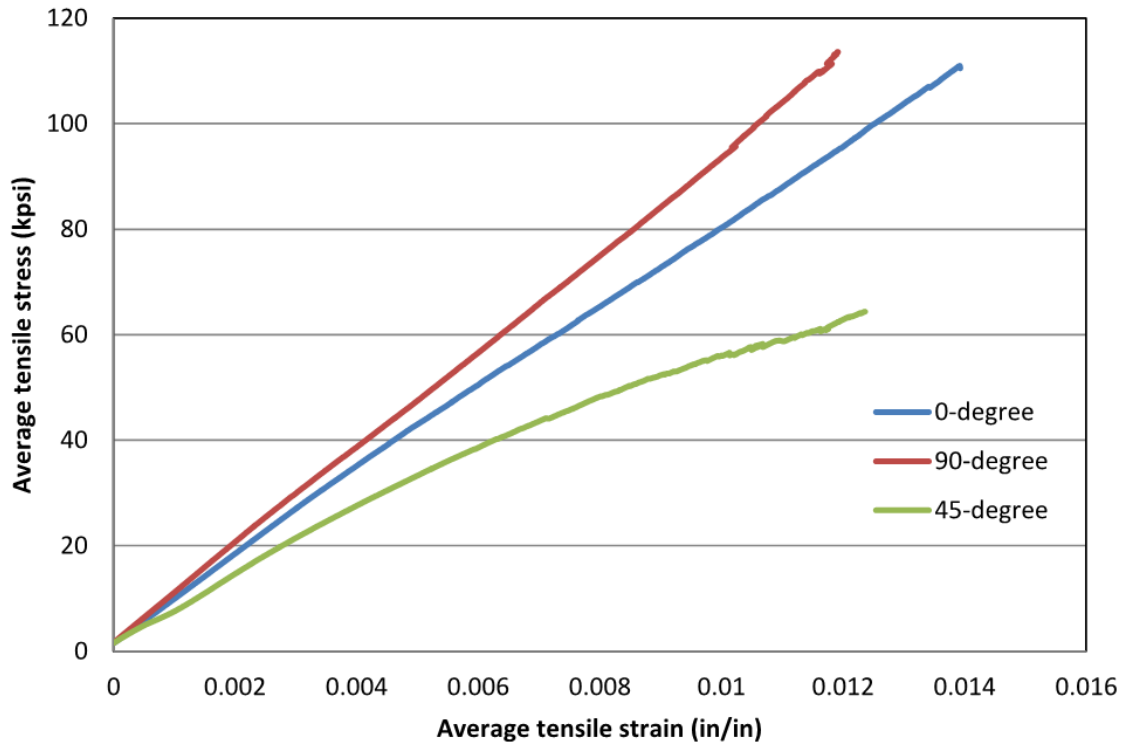
La resina BMI ha existido por más de 25 años en la industria y aún sigue siendo la matriz de compuestos con mayor resistencia mecánica. Los compuestos de BMI combinan excelente resistencia mecánica y una alta temperatura de servicio por encima de los 190 C(375 F).



*Figura 21. Herramental hecho 100% de BMI utilizado en 50 ciclos a 221C (430F).(Documentacion Honeywell).*

Los resultados obtenidos en esta prueba mecánica muestran que el Modulo de Young de la configuración BMI/IM7 tuvo un valor máximo de 867.99 KPsi con la carga a 90 de orientación de fibra, mientras que las otras orientaciones muestran valores menores.

### BMI-2/IM7 Tensile Testing



Gráfica 1. Pruebas de tensión realizadas a muestras BMI-2 con fibras de carbono IM7-GP-6K, fuente: Documentación Honeywell.

Tabla 3. Información del desempeño de los paneles sometidos a pruebas de tensión.

BMI-2/IM7 Tensile Testing Performance Data			
Layup	Maximum Average Tensile Strain, $\epsilon_{avg}$	Maximum Average Tensile Stress, $\sigma_{avg}$	Young's Modulus, $E_{avg}$
$[0^\circ]_4$	0.0152 in/in	110.99 kpsi	7297.46 kpsi
$[90^\circ]_4$	0.0139 in/in	113.58 kpsi	8165.45 kpsi
$[+45^\circ, 90^\circ, 90^\circ, -45^\circ]$	0.0123 in/in	64.39 kpsi	5209.15 kpsi

Fuente: Documentación Honeywell

## 2.12 Fundición.

La fundición es una de las primeras tecnologías utilizadas para la fabricación de producción de productos de origen metálico. Aproximadamente desde el siglo VII a.C. se fabrican productos de fundición evolucionando desde utensilios básicos para ornamentación y seguridad, hasta complejas geometrías de turbinas hidráulicas. Esto ha generado una gran tradición y especialización en la producción de piezas cada vez más complejas. Aunque desde sus comienzos hasta estos últimos siglos la fundición se ha centrado en metal como material de fundición, se ha ampliado su aplicación a otras familias de materiales. La fundición consiste en una serie de operaciones mediante las cuales se obtiene un molde que reproduce la forma de la pieza a fabricar y en el que se vierte el metal en el interior de un molde previamente fabricado. Se emplea fundamentalmente en piezas como motores, cigüeñales, componentes de turbinas hidráulicas, trenes de aterrizajes para aviación, entre otras.

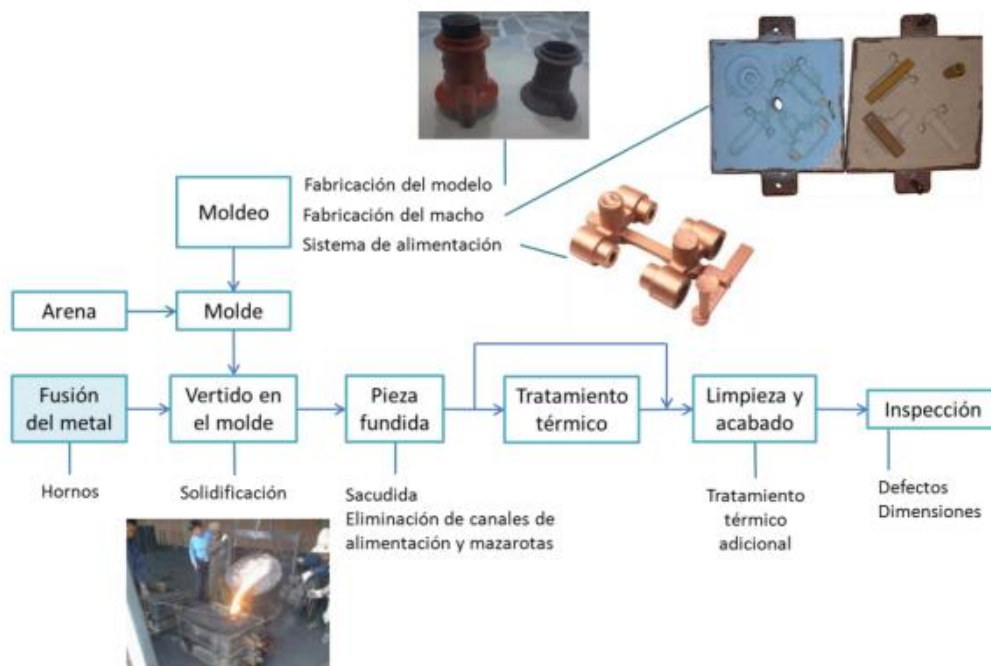


Figura 22. Esquema del proceso de fundición manual de Arena, fuente: Garcia (2016).



Tabla 4. Características generales de procesos de fundición.

Proceso	Material a fundir	Peso (kg)		Acabado superficial Ra [μm]	Porosidad (*)	Complejidad de forma (*)	Precisión dimensional (*)	Espesor de la sección (mm)	
		Mín.	Máx.					Mín.	Máx.
Arena	Todos	0,05	Sin límite	12,5-25	4	1-2	3	3	Sin límite
Moldeo en cáscara	Todos	0,05	100+	6,3	4	2-3	2	2	--
Modelo desechable	Todos	0,05	Sin límite	5-20	4	1	2	2	Sin límite
Molde de yeso	No ferroso	0,05	50+	1-2	3	1-2	2	1	--
Cera perdida	Todos	0,005	100+	1,6	3	1	1	1	75
Molde permanente	Todos	0,5	300	2-3	2-3	3-4	2	2	50
Troquel	No ferroso	<0,05	50	1-2	1-3	3-4	1	0,5	12
Centrifugo	Todos	--	5000+	2-20	1-2	3-4	3	2	100

\*Calificación relativa: 1 el mejor, 5 el peor.

Nota: Estas calificaciones son solo generales; dependiendo de los métodos utilizados pueden ocurrir variaciones significativas.

Fuente: Garcia (2016).

### 2.12.1 Ventajas del proceso de fundición.

Algunas ventajas del proceso de fundición son mostradas a continuación:

- Puede crear geometrías complejas de la forma más económica.
- No existe un límite de tamaño de pieza.
- El objeto producido tiene una alta resistencia a la compresión.
- Toda la estructura tiene una amplia gama de propiedades.
- Se pueden crear objetos con buena tolerancia.
- Todos los materiales pueden ser fundidos.
- Crean estructuras isotrópicas.
- Es el proceso de manufactura más barato.
- Se pueden crear materiales compuestos en el proceso.

## 2.12.2 Desventajas del proceso de fundición.

Algunas desventajas del proceso de fundición se muestran a continuación.

- Acabados superficiales pobres que requieren procesos adicionales.
- Defectos de fundición como fracturas, burbujas, rasguños etc.
- Las piezas presentan una baja resistencia a la fatiga.
- No es económico para producción en masa.

(Mech4study 2019)

## 2.13 Rolado de lamina

El rolado es definido como el proceso de manufactura de hojas metálicas que son formadas en curvas cilíndricas o formas con radios suaves.

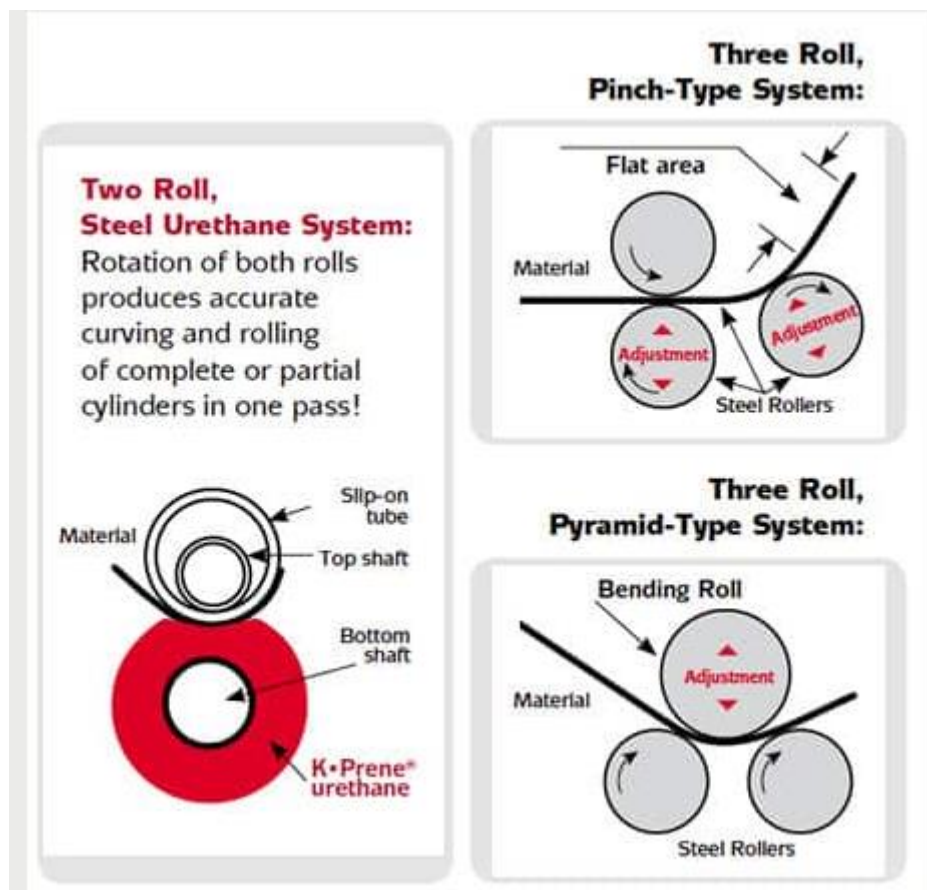


Figura 23. Tipos de sistema de rolado, fuente: Acrotechnic(2019).

### 2.13.1 Calibres de lámina comerciales:

Al considerar Rolado de lámina metálica es necesario también tomar en cuenta los espesores disponibles en el mercado, en la Tabla 4.

Tabla 5. Calibres comerciales en hojas de aluminio.

Aluminum Gauge Chart*		
Gauge Number	Inches	MM
7	.1443	3.665
8	.1285	3.264
9	.1144	2.906
10	.1019	2.588
11	.09074	2.305
12	.08081	2.053
14	.06408	1.628
16	.05082	1.291
18	.04030	1.024
20	.03196	.812
22	.02535	.644
24	.02010	.511
26	.01594	.405
28	.01264	.321
30	.01003	.255

Fuente: Metalsupermakets (2019).

<b>Price</b>			
Price	* 1.02	- 1.16	USD/lb
<b>Physical properties</b>			
Density	0.0965	- 0.0986	lb/in <sup>3</sup>

Figura 24. Costo por libra de Al 6061, fuente: Software CES selector 2016.

## 2.14 Diseño para manufactura aditiva

Este proceso consiste en 3 fases diseñadas para encontrar el balance entre las especificaciones funcionales y las especificaciones del proceso de manufactura seleccionado, esta metodología se utiliza para crear diseños de piezas metálicas de paredes delgadas.

### 2.14.1 Orientación

En este proceso se determinan las áreas funcionales del diseño de estudio para determinar el “área de diseño”, este proceso de selección de orientación tiene que ver tanto con las capacidades de volumen de trabajo de la maquina como con acabados superficiales, calidad, tiempo, material de soporte generado, es necesario negociar entre estos parámetros para obtener la mejor selección.

### 2.14.2 Optimización funcional.

En este proceso se determina la geometría optima en función de los objetivos funcionales del diseño de estudio. Esta geometría es llamada “geometría inicial”, esto garantiza vencer la inercia de pensar en soluciones existentes ya que se definen el máximo espacio disponible, las cargas aplicadas y las restricciones de interfaces, en esta parte se utilizan las herramientas de optimización numéricas más adecuadas para la manufactura aditiva.

### 2.14.3 Optimización de trayectorias de manufactura

Esta parte del proceso se buscan todas las combinaciones posibles de rutas para el proceso de manufactura aditiva.

Primero se establece una geometría inicial para establecer las trayectorias de manufactura de acuerdo a las características del proceso.

Después los parámetros del modelo son adaptados al proceso mediante el establecimiento de reglas de manufactura basadas en la experiencia del proceso.

El resultado es una serie de diferentes parámetros de modelo que son manufacturables dentro del espacio de diseño.

Una vez establecidas las diferentes trayectorias, se obtienen las geometrías con ayuda de las reglas de manufactura, de esta forma con trayectorias de manufactura y geometrías del modelo se pueden evaluar las opciones desde un punto de vista funcional y de manufactura mediante el uso de indicadores funcionales (ifunct) e indicadores de manufactura (imanuf), como resultado final se obtiene la mejor trayectoria de manufactura y el modelo CAD 3d.

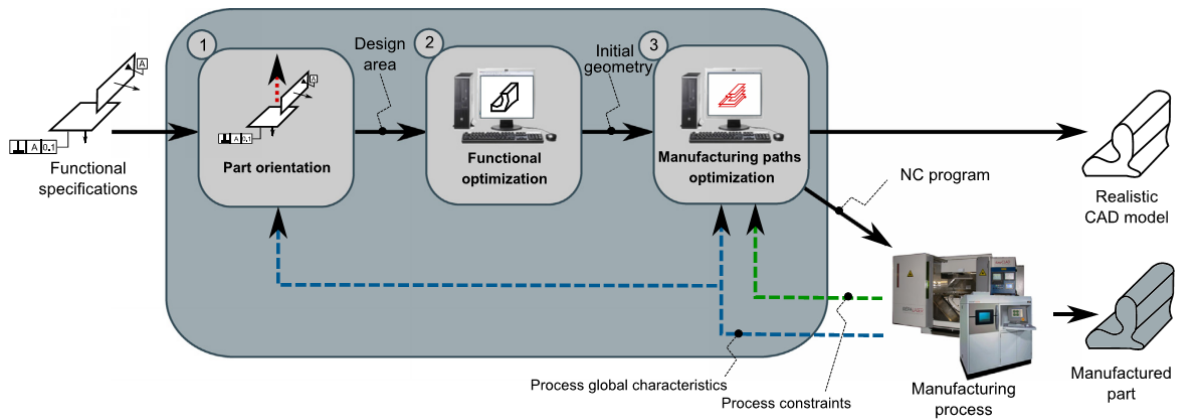


Figura 25. Proceso de diseño para manufactura aditiva. Fuente: Ponche et al. (2014).

## 2.15 Casos de estudio

Según Seabra et al (2016) encontraron que mediante la aplicación de Tecnologías de optimización y Tecnología de manufactura aditiva se pueden lograr reducciones de peso en 28% y el volumen en 54% cambiando el proceso de manufactura y el material de Aluminio a Titanio.

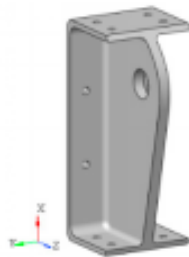


Figura 26. Componente original, fuente: Seabra (2016).

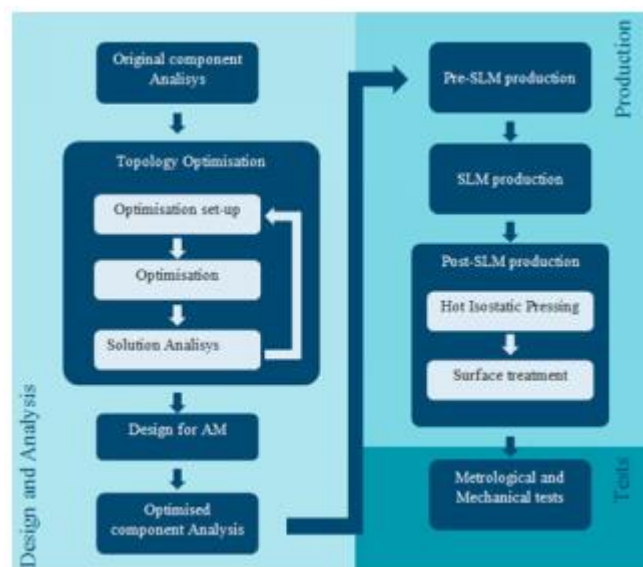


Figura 27. Metodología utilizada, fuente: Seabra (2016).

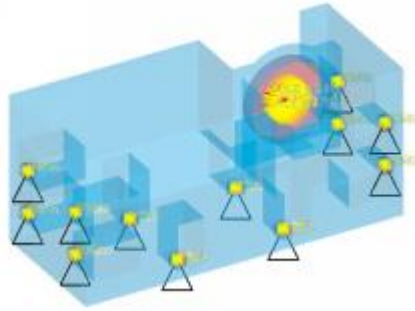


Figura 28. Restricciones del componente, Fuente: Seabra (2016).

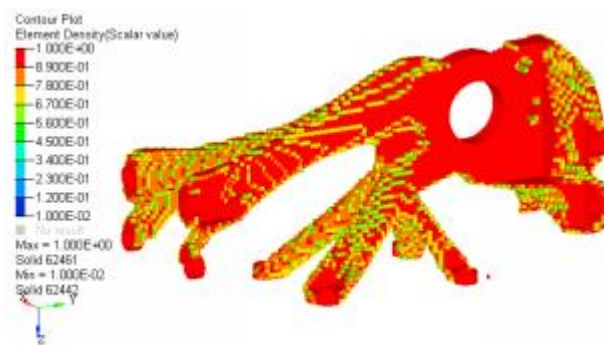


Figura 29. Resultado de optimización, Fuente: Seabra (2016).

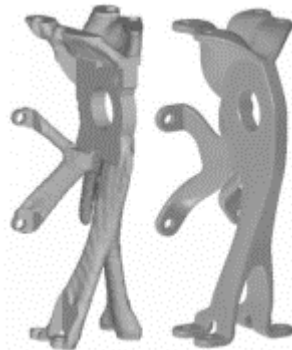


Figura 30. Transición a geometría final, fuente: Seabra (2016).



Figura 31. Componente fabricado, fuente: Seabra (2016).

Usando una combinación de optimización dimensional, de forma y topológica L. Krog et al. Dan un ejemplo de cómo optimizar un componente estructural del ala de un avión Airbus, la figura 32 muestra el ciclo de diseño seguido para mejorar la rigidez y reducir el peso del componente, primeramente el modelo fue optimizado usando métodos de topología de acuerdo a las condiciones frontera, después el material redundante es removido para reducir peso, sin embargo el resultado es poco manufacturable por lo tanto el modelo resultante es refinado y se extrae la geometría para construir le modelo para los procesos de dimensionado y forma, subsecuentemente las alturas de las costillas y distribución de espesores son optimizados por el método de dimensionamiento las formas de los espacios vacíos en las placas son optimizados por la optimización de forma para poder cumplir con las restricciones de manufacturabilidad, al final la combinación de la optimización de topología, dimensionamiento y forma lograron un diseño de peso ligero y mejoraron la rigidez del componente. (Korg et al., 2002, citado por Zhu,2018).

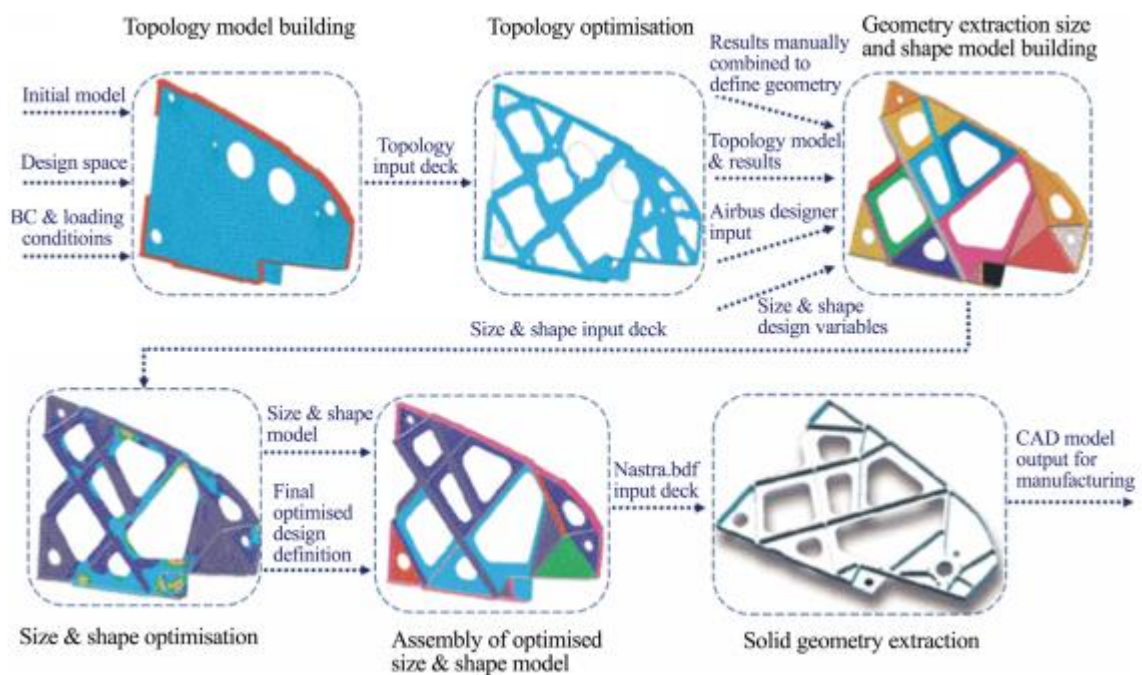


Figura 32. Proceso de optimización y reducción de peso de componente estructural wing box rib, Fuente: Krog et al. 2002 citado por Zhu, 2017, p.110).

En su trabajo (Reddy et al. 2016), aplicaron optimización topológica al diseño de una espiga para un vehículo de carreras (ver Figura 33), este componente transfiere la carga del suelo al chasis del vehículo, para mejorar el desempeño y conservar bajo peso se implementa optimización topológica combinada con manufactura aditiva.



*Figura 33. Diseño original de Espiga, Fuente: Reddy et al. 2016.*

El primer paso en la optimización topología fue la distinción de espacios de diseño y de no diseño. El espacio de diseño es el dominio donde la distribución de material va ser aplicada. El espacio de no diseño es un volumen fijo que será declarado no optimizable. Normalmente son interfaces, pernos bisagras etc.

El autor utiliza un software llamado 3D Topopt para definir los espacios ya mencionados los resultados se muestran en la Figura 34, espacios de no diseño (azul), espacios vacíos (gris), cargas (rojo) y soportes (verde).



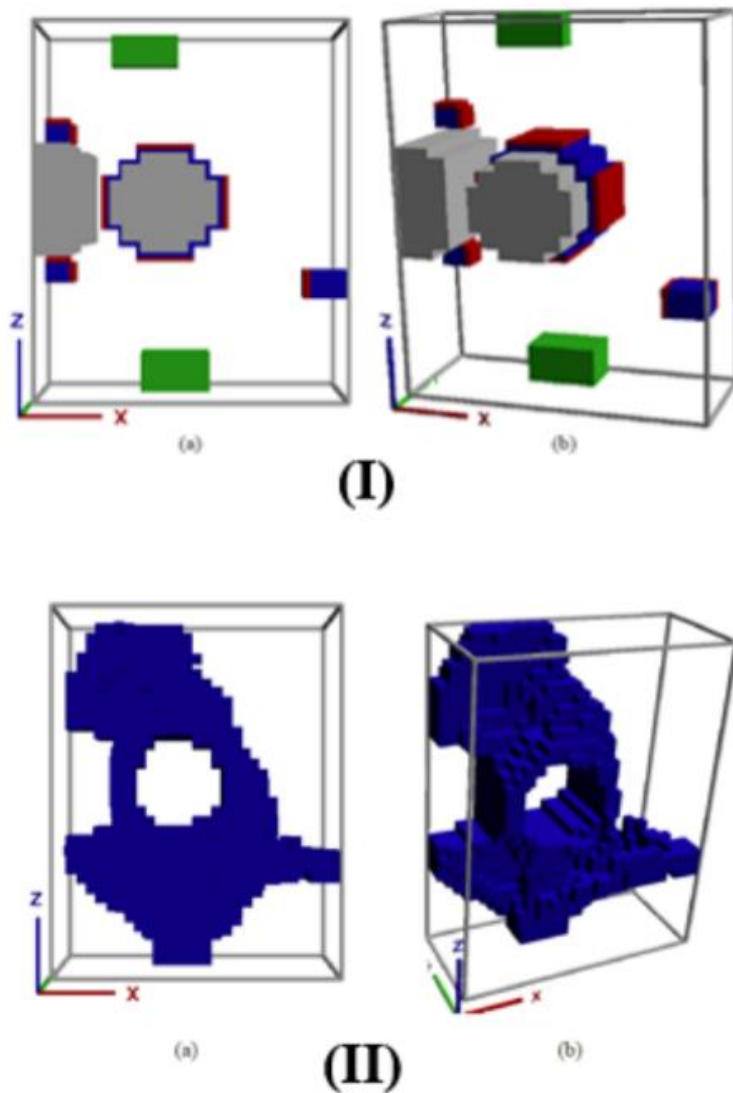


Figura 34. Configuración para optimización topologica (I) y resultado de optimizacion (II), Fuente: Reddy et al. (2016).

Después de varias iteraciones en su proceso de optimización en función del proceso de manufactura seleccionado, el autor desarrolla una topología menos costosa de fabricar por medio de manufactura aditiva en metal. Los resultados de estas iteraciones son mostrados en la Figura 35.



Figura 35. Iteraciones de diseño en función de reducir el material de soporte. Fuente: Reddy et al. (2016).

Las mejoras entre cada iteración son mostradas en la Tabla 6. Los criterios son Volumen de modelo (in<sup>3</sup>), Volumen de soportes(in<sup>3</sup>), porcentaje de volumen de soporte con respecto al volumen del modelo(%), tiempo de impresión (Hrs), costo(\$) y complejidad para remover el material de soporte(alta, media y baja).

Tabla 6. Criterios de evaluación de iteraciones de diseños optimizados.

Design	Volume of the model (in <sup>3</sup> )	Volume of supports (in <sup>3</sup> )	Volume of support as % volume of the model	Build time (Hrs)	Cost (\$)	Complexity of support removal
Design 0 (Horizontal orientation)	10.2	10.0	97.6	14	2015	High
Design 0 (Side orientation)	10.2	20.7	202.4	28	2995	Med
Redesign 1	12.8	1.7	13.2	11	1495	Low
Redesign 2	11.8	1.7	14.3	11	1448	Low

Fuente: Reddy et al. (2016).

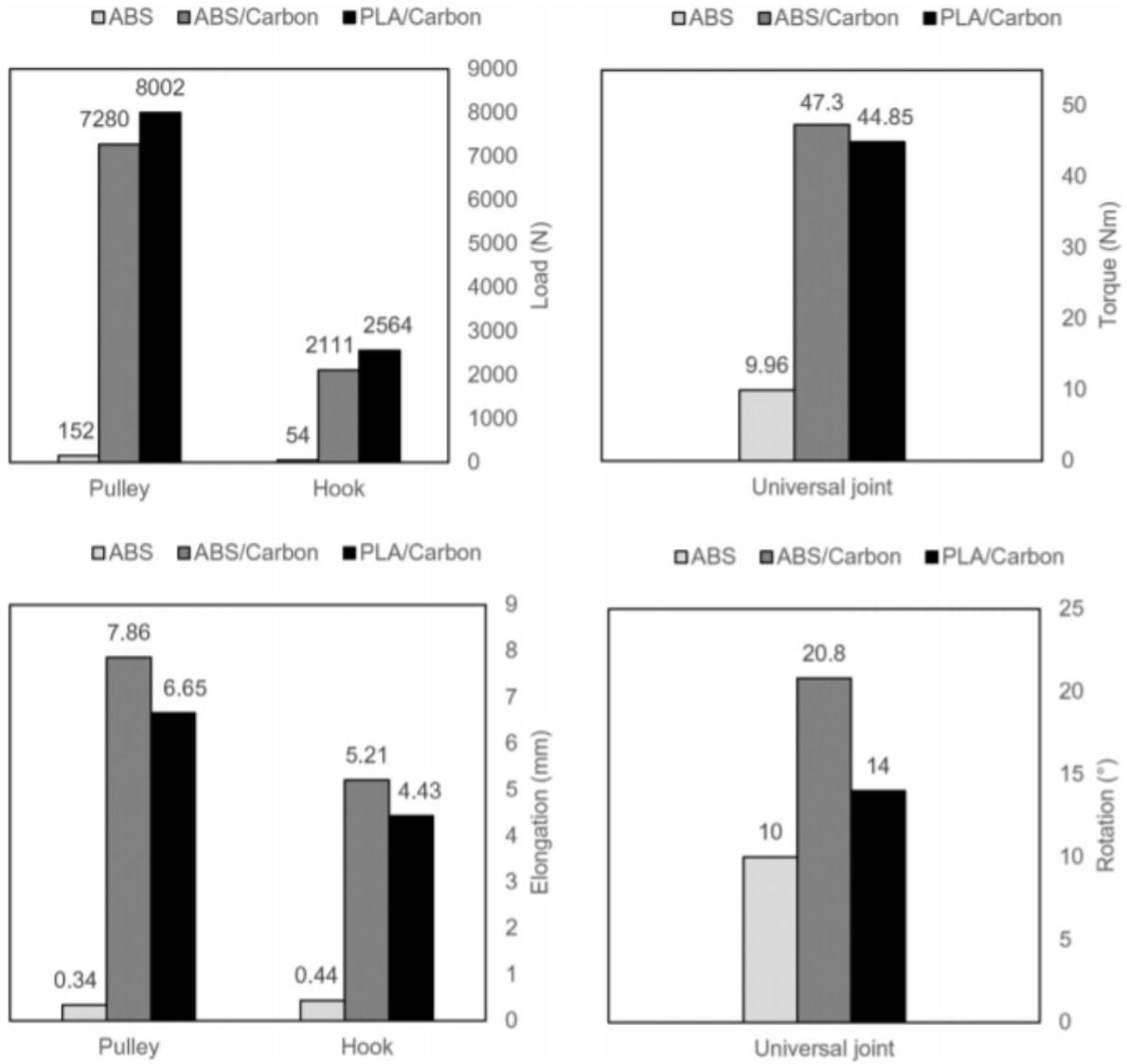
En el caso de estudio de Brooks y Molony (2016) se maneja la manufactura aditiva de plásticos (ABS y PLA) y se combina con refuerzo de fibras de kevlar, Primeramente define el espacio total de diseño, después definen un módulo de elasticidad compuesto por medio de la regla de mezclas, una vez establecido esto utilizan el método de optimización topológica donde definen los espacios que la fibra debe de ocupar, entonces con esta información hacen un diseño en plástico

que tenga las cavidades para poder colocar la fibra, los resultados se muestran en a Figura 36.



Figura 36. Proceso de optimización topológica para generar componentes de material compuesto, Fuente: Brooks y Molony (2016).

Los resultados se traducen en un incremento de la fuerza y disminución en la deformación, esto se puede ver en la Gráfica 2.



Gráfica 2. Desempeño medido en carga(N) y deformación (mm), Fuente: Brooks y Molony (2016).

# Capítulo 3: Metodología

## 3.1 Metodología general

En esta sección se presentarán los pasos estructurados del trabajo de investigación que va tener la intención de llegar al diseño indicado en los objetivos.

Debido a que se tomaran en cuenta datos de los análisis estructurales y de dinámica de fluidos se tomaran en cuenta aspectos cuantitativos, de igual manera por la naturaleza del proceso de diseño hay aspectos que dependen de la creatividad y criterio del diseñador se tomaran en cuenta aspectos cualitativos; por lo tanto el trabajo presentado es considerada una investigación de tipo mixta de carácter correlativa ya que se obtendrán datos del diseño propuesto para después compararlos con el diseño existente.

## 3.2 Procedimiento

El procedimiento para llevar a cabo esta investigación y lograr el objetivo establecido se dividió en 3 fases: Funcionalidad, Manufactura y diseño y optimización, este proceso es mostrado en la gráficamente en la Figura 37 donde se ven las actividades relacionadas con cada fase:

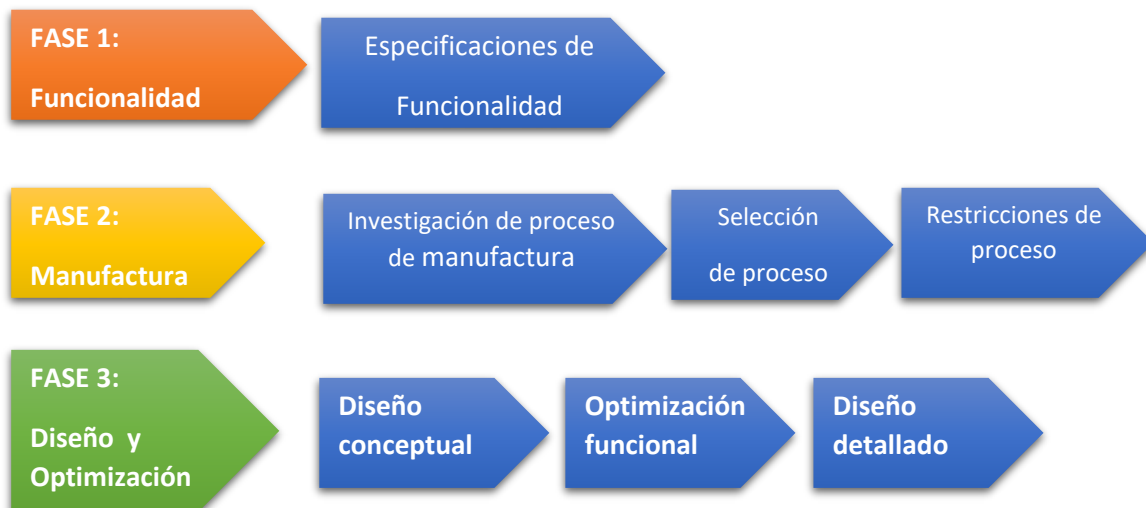


Figura 37. Metodología propuesta para la investigación, fuente: Elaboración propia.

### 3.2.1 Fase 1: Funcionalidad

Mediante la consulta de documentos del diseño anterior y componentes relacionados se identificarán los aspectos funcionales requeridas por el sistema de control ambiental que el diseño del Plena debe cubrir, por ejemplo: interfaces de conexión, cargas, temperaturas, restricciones, presiones etc.

### 3.2.2 Fase 2: Manufactura

Basado en procesos que ya se realizan en la planta de manufactura se identifican posibles métodos de manufactura para el nuevo diseño tomando en cuenta los datos de la fase 1, una vez identificados se realiza una etapa de selección en función de criterios como el costo de materia prima, la complejidad geométrica que el proceso puede alcanzar, la estructura isotrópica y los procesos adicionales que cada proceso requiere.

Al final se selecciona un proceso con las condiciones más favorables al objetivo y alcance de la investigación para poder obtener las restricciones del proceso.

### 3.2.3 Fase 3: Diseño y optimización

En esta fase se integran los datos de la fase 1 y 2 para desarrollar inicialmente un diseño conceptual que es una etapa preliminar del diseño, este primer diseño es el punto de inicio de la etapa de optimización funcional donde mediante una serie de iteraciones se pretende llegar a una topología que satisfaga lo establecido en las primeras fases, pero con el valor agregado de reducir el material utilizado, por lo tanto, el peso del diseño.

En la etapa final de esta fase se toma el diseño optimizado y se le agregan componentes que no son parte del proceso de optimización como tornillería, sellos, empaques etc.

Al final de esta fase se logra llegar al resultado final que es un diseño con una topología que cumpla las especificaciones de funcionalidad del sistema de control ambiental.

### 3.3 Plan de trabajo

En esta sección se presenta la planeación de actividades para la ejecución de la investigación, para la cual se muestran en los entregables, cronograma y recursos.

#### 3.3.1.1 Entregables

Se presenta de manera estructurada la serie de actividades a cumplir durante el proceso de investigación, así como la descripción de cada uno de los entregables y su tiempo requerido, esto es mostrado en la Tabla 7.

Tabla 7. Lista de actividades.

ACTIVIDAD	ENTREGABLE	DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	TIEMPO PARA REALIZACIÓN
Actividad 1.1	Lista de especificaciones funcionales	Documento con la información de los requerimientos del sistema de control ambiental	2 días
Actividad 2.1	Investigación de procesos de manufactura	Listado de posibles procesos para el Plena	2 semanas
Actividad 2.2	Selección del proceso de manufactura	Se selecciona el proceso de manufactura más adecuado para el Plena	1 día
Actividad 2.3	Lista de restricciones de proceso de manufactura	Tabla con las restricciones del proceso de manufactura	1 día
Actividad 3.1	Diseño conceptual	Diseño de topología en bruto sin detalles de interfaces o componentes adicionales.	1 semana
Actividad 3.2	Optimización funcional	Proceso iterativo de modelado CAD para obtener solución que satisfaga los requerimientos funcionales y del proceso de fabricación.	3 semanas
Actividad 3.3	Diseño detallado	Proceso de diseño que involucra piezas adicionales en el ensamble, así como análisis de espacios para su manufactura y ensamblaje	2 semanas
Actividad 4.1	Documentación	Redacción del reporte de investigación	3 semanas
Actividad 4.2	Diseño detallado	Elaboración y ejecución de la presentación del proyecto.	1 semana

fuelle: elaboración propia.

### 3.3.2 Cronograma

En esta sección se presentan las actividades ordenadas secuencialmente a lo largo de la duración de la investigación, para que la información pueda ser revisada de una manera más sencilla se presenta en la siguiente tabla en la Tabla 8.

Tabla 8. Cronograma de actividades.

Semana		NOV.		DIC.				ENE.				FEB.				MAR.			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Actividad 1.1	lista de especificaciones funcionales	■																	
Actividad 2.1	Investigación de procesos de manufactura	■	■																
Actividad 2.2	Selección del proceso de manufactura		■																
Actividad 2.3	lista de restricciones de proceso de manufactura			■															
Actividad 3.1	Diseño conceptual				■	■	■	■											
Actividad 3.2	Optimización funcional							■	■	■	■								
Actividad 3.3	Diseño detallado											■	■						
Actividad 4.1	Documentación													■	■	■			
Actividad 4.2	Presentación																	■	

fuentes: elaboración propia.

### 3.3.3 Recursos

En esta sección se listan los recursos dispuestos de parte de la empresa ya que únicamente se necesitó:

- Software de dibujo asistido por computadora Siemens NX 10.
- Software de optimización Inspire Altair.
- Software de manejo de información Siemens Team center.
- CES Selector 2016.
- Acceso a documentación Honeywell



## **Capítulo 4: Resultados**

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la investigación la cual tuvo el propósito general de diseñar un modelo con una topología que reduzca peso, costo de fabricación y cumpla las especificaciones de desempeño requeridas por el sistema, para un mejor entendimiento se organizó la información en función de las 3 fases establecidas en la metodología establecida en el Capítulo 3 de este documento.

### **4.1 Fase 1: Funcionalidad**

Para poder identificar las especificaciones funcionales requeridas por el Plenum del GV, se realizó una investigación en la documentación de la empresa específicamente en los dibujos del diseño del Plenum anterior y se tomó información importante como las interfaces con los equipos, montajes a fuselaje y condiciones de operación máxima.


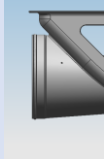
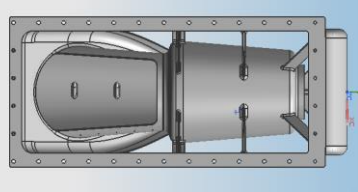
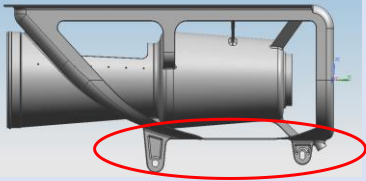
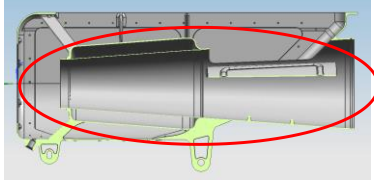
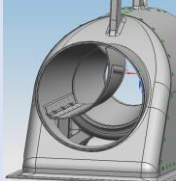
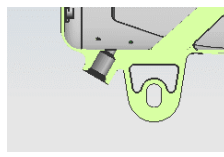
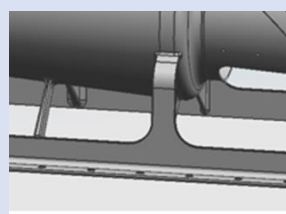
Los elementos tomados en cuenta para nuevo diseño del Plenum se muestran en las siguientes clasificaciones: Requerimientos funcionales y condiciones de operación.

#### **4.1.1 Requerimientos funcionales:**

Los requerimientos funcionales definen las especificaciones de conexión con los demás componentes, así como también otros elementos que se integraron al diseño de la carcasa.

Los Requerimientos funcionales identificados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Requerimientos Funcionales.

Requerimientos funcionales	Descripción	Vista previa
Conexión ACM	distribución de barrenos para la conexión con el componente "air cycle machine"	
conexión Salida	Conexión a terminal de salida del aire "exhaust"	
Conexión intercambiador de calor	Brida de conexión para el intercambiador de calor primario.	
Montaje Avión	Montajes para ensamblar el Plenum con el fuselaje del Avión.	
Ensamble de difusor	Integración de ensamble de difusor junto con carcasa de plenum	
Puerta de difusor	Instalación para puerta de difusor	
Puerto de purga	Especificación de conector para purgado del Plenum.	
Soporte cubierta	Elemento de sujeción para cubierta	

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.1.2 Condiciones de operación:

En esta sección se presentan los valores de cargas, restricciones y condiciones de operación del Plenum, estos se obtuvieron a partir de la investigación realizada por el proceso **FEA**(Martinez 2019), las cargas y restricciones derivados de los componentes ensamblados se presentan en la Figura 38.

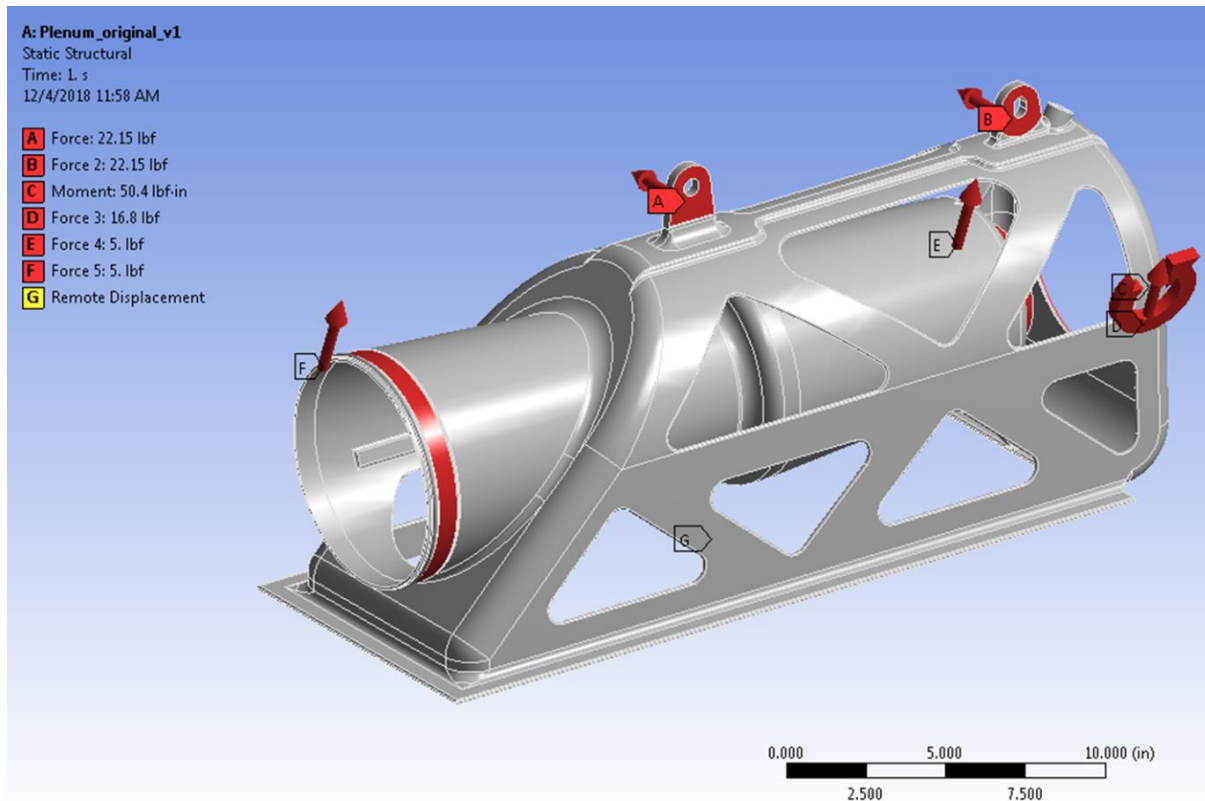


Figura 38. Restricciones y condiciones de carga, fuente: Proceso FEA(martinez 2019)

También deben de considerarse valores de presión y temperatura de operación, esta información también fue obtenida a partir de la investigación realizada por el proceso **FEA**(Martinez 2019), los valores son mostrados en la Tabla 10.

Tabla 10. Parámetros y cargas para realización de análisis estructural en el Plenum del Gulfstream V.

Parámetros	Magnitud
Temperatura máxima de operación:	400°F
Presión de operación:	-1 a 0 psig
Presión de prueba (excede condiciones normales de operación):	2 psig
Pesos	Libras (lb)
Plenum	12.75
Máquina de ciclos (ACM)	16.80
Intercambiador de calor primario (PRI <sub>HX</sub> )	22.00
Intercambiador de calor secundario (SEC <sub>HX</sub> )	28.40
Difusor	5.00
Bota flexible en salida	5.00
Momentos	Libras pulgada (lb in)
Máquina de ciclos (ACM)	50.40

fuelle: Proceso FEA(Martinez 2019).

## 4.2 Fase 2: Manufactura

Para Proponer alternativa de proceso de fabricación para reducir costos de manufactura e identificar sus restricciones, Primeramente se hace una propuesta de procesos candidatos basada en procesos que ya se realizan en la planta de manufactura y en los requerimientos establecidos en la fase 1 de este trabajo de investigación , se identifican 4 posibles procesos: Fundición, Hand lay up Prepreg, Impresión 3D DMLS y rolado de lámina, a continuación se muestra una justificación para cada proceso:

- **Prepreg Hand layup de materiales compuestos**, debido a que es el proceso actualmente utilizado y se tomara como proceso de referencia.
- **Fundición**, debido a que este proceso es muy común entre los productos estructurales que fabrica Honeywell, representa una buena opción para fabricar piezas metálicas en serie, es buen proceso donde las formas complejas no permiten el uso de maquinados convencionales.

- **Impresión 3D DMLS**, este proceso tiene mayor libertad de lograr formas complejas, al ser un proceso relativamente nuevo esta aun en su fase de desarrollo sin embargo representa una tendencia dentro de los objetivos de Honeywell.
- **Rolado de lámina metálica**, este proceso es considerado debido a su bajo costo, fácil implementación y la posibilidad de incorporar elementos más delgados que lo que posibilita la fundición.

Una vez establecidas las opciones es necesario un proceso de selección, se implementa una tabla comparativa donde se consideraron factores relevantes para cumplir el objetivo final, como son: el costo de materia prima, la complejidad geométrica que el proceso puede alcanzar, la estructura isotrópica y los procesos adicionales que cada proceso requiere.

Los criterios son descritos de la siguiente manera:

- **Costo de materia prima:** Es el costo unitario en dólares por cada libra de material a utilizar.
- **Complejidad geométrica:** Es la capacidad del proceso de lograr formas con curvaturas complejas, características propias de ductos, carcasas con pasajes internos, etc.
- **Estructura isotrópica:** Es la capacidad del proceso de generar piezas cuyos materiales tienen un comportamiento isotrópico, lo que esto significa es que el proceso de simulación estructural va poder ser realizado por el proceso FEA.
- **Procesos adicionales:** Es cuando el proceso involucra otros procesos posteriores para tener un acabado final como, por ejemplo: pulido, tratamientos térmicos, curado, etc.

Con el objetivo de complementar las capacidades de un Plenum fabricado en metal, se propone separar el diseño en dos elementos:

- **Carcasa:** es el elemento del Plenum que resuelve la parte estructural, geometrías complejas y las conexiones con los componentes alrededor del mismo.

- Cubierta: es un elemento de espesor delgado que tiene el fin de contener el aire presurizado dentro del Plenum, este elemento resuelve las geometrías sencillas.

Al separar el diseño en dos elementos se tienen dos casos de procesos de selección: la selección para la carcasa y la selección para la cubierta.

#### 4.2.1 Carcasa:

En esta sección se presenta el proceso de selección para la fabricación de la carcasa, los criterios utilizados se pueden observar en la Tabla 11.

Tabla 11. Análisis comparativo de Procesos de manufactura de carcasa.

Proceso para carcasa	Costo materia prima USD/lb	Estructura isotrópica	Complejidad geométrica	Procesos adicionales
Polymide Prepreg hand layup	65.63	no	limitada	si
Rolado de lamina	1.1	si	limitada	no
Fundición Al	1.35	si	amplia	si
Impresión 3D DMLS	33	no	amplia	si

Fuente: elaboración propia.

En el caso de la carcasa se seleccionó la fundición de aluminio como la más viable ya que representa un bajo costo y una amplia cobertura de geometrías complejas, a pesar de tener procesos adicionales.

#### 4.2.2 Cubierta:

En esta sección se presenta el proceso de selección para la fabricación de la cubierta, los criterios utilizados se pueden observar en la Tabla 12.

Tabla 12. Análisis comparativo de Procesos de manufactura de cubierta.

Proceso para cubierta	Costo materia prima USD/lb	estructura isotrópica	Procesos adicionales
Polymide Prepreg Hand layup	65.63	no	si
Rolado de lamina	1.1	si	no
Fundición Al	1.35	si	si
impresión 3D DMLS	33	no	si

Fuente: elaboración propia.

Para el caso de la cubierta se descartó el criterio de complejidad geométrica debido a que el motivo de la separación del diseño del Plenum en dos fue precisamente para dejar las formas sencillas a este componente en particular, dejando fuera ese criterio el rolado de lámina es la opción más conveniente debido a su bajo costo de materia prima, que el material a trabajar tiene un comportamiento isotrópico y que no requiere procesos adicionales la chapa metálica es cortada y formada, una vez hecho esto está lista para usarse.

#### 4.2.3 Restricciones de proceso

En esta sección se contemplan las restricciones de cada uno de los procesos seleccionados:

##### 4.2.3.1 Fundición

Según lo consultado en el capítulo 2 de esta misma investigación, las restricciones consideradas fueron las siguientes:

- Espesor de pared o sección transversal de .080 pulgadas (2.032mm).
- Densidad de Aluminio A332.

##### 4.2.3.2 Rolado de lamina

Este proceso es sencillo y trabaja con espesores delgados de láminas metálicas, se encontró que las restricciones fueron las siguientes:

- Espesores de lámina comercial Calibre 30-7 (.010-.144")
- Un solo doblado, de radio amplio.
- Densidad de material Aluminio 6061-T6.

### 4.3 Fase 3: Optimización

Con el fin de encontrar la topología que cumpla con los requerimientos de proceso y los requerimientos de desempeño del sistema de control ambiental, se toman los requerimientos de funcionalidad y manufactura establecidos previamente en las fases 1 y 2, se puede comenzar el proceso de Optimización del diseño este proceso se describe en la Figura 39.

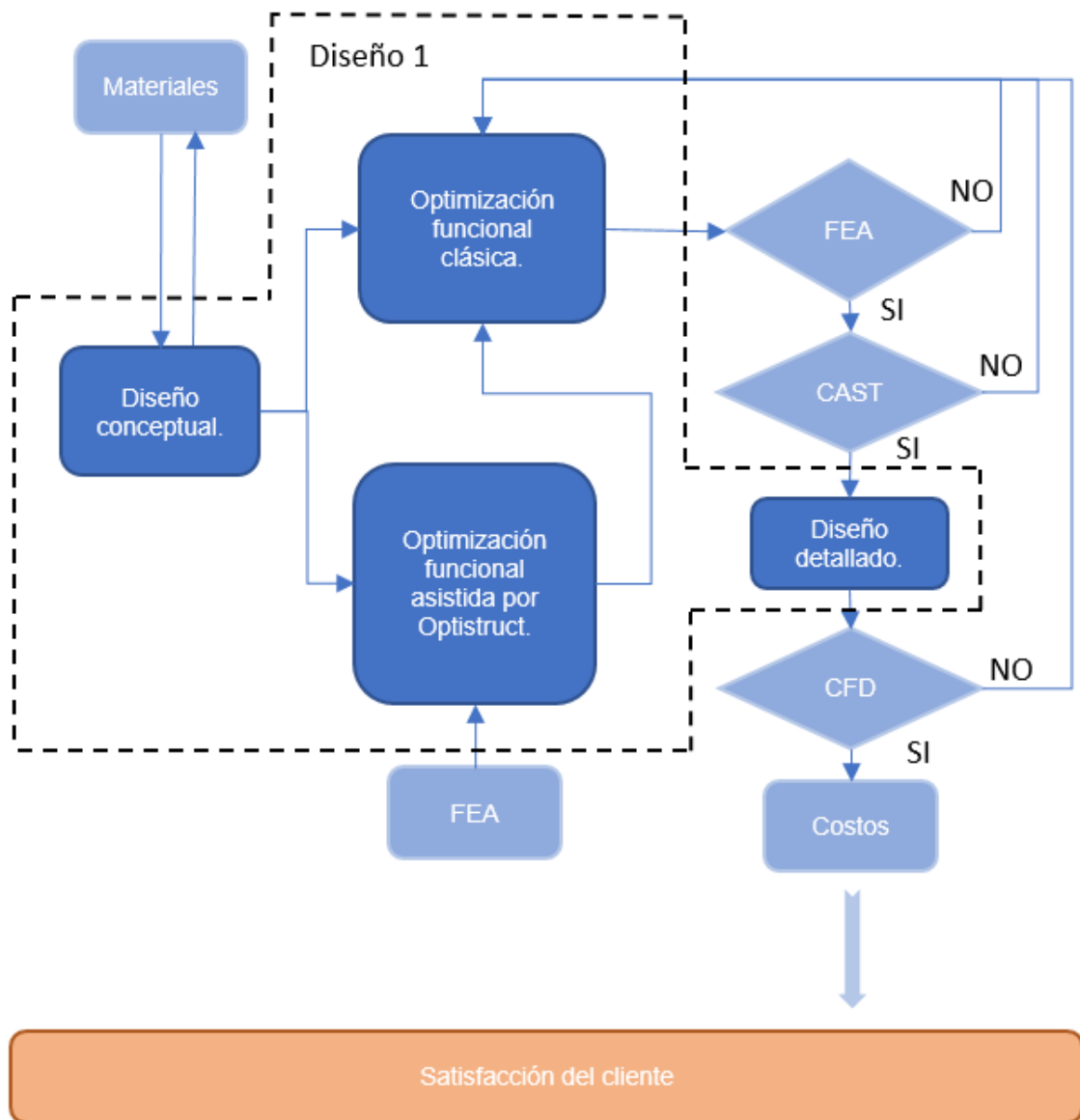


Figura 39. Proceso de Diseño 1, fuente: elaboración propia.

Los procesos internos de la optimización de diseño son descritos de la siguiente manera:

- **Diseño conceptual:** es la etapa donde se crea el primer modelo 3D que integra la primera versión del diseño esta va tener como única limitante los requerimientos funcionales de interfaz y peso máximo requerido.
- **Optimización funcional clásica:** este es el proceso clásico de iteraciones donde el diseño va cambiando a medida que se recibe retroalimentación del proceso **FEA**.



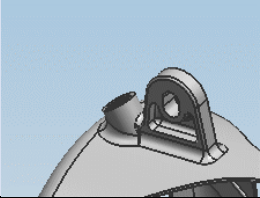
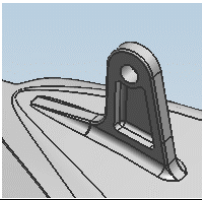
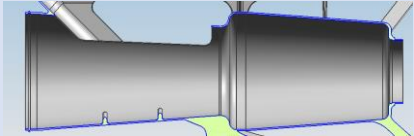

- **Optimización funcional asistida por Optistruct:** Este es el proceso en paralelo con la optimización clásica donde las iteraciones de diseño son realizadas en una subrutina del software de tal manera que el usuario introduce restricciones, condiciones de carga, espacios de diseño y espacios fijos. Al final de este proceso se obtiene un modelo optimizado con la cantidad mínima de material para garantizar la máxima rigidez del diseño.
- **Diseño a detalle:** En este proceso la mayoría de las retroalimentaciones ya fueron satisfechas, lo que queda por agregar al diseño son componentes como tornillería, sellos, componentes internos que no eran parte del proyecto de rediseño etc.

#### 4.3.1 Diseño conceptual:

Antes de utilizar el software de optimización se trabajó en un diseño preliminar el cual incorpora los cambios más drásticos del diseño.

Se buscó implementar una ventaja del diseño para manufactura aditiva llamada necesidad de ensamble, la cual nos permite integrar elementos en la misma pieza de trabajo presentadas en la Tabla 13.

Tabla 13. Elementos integrados en carcasa.

Componente integrado	Descripción	Vista previa
Base ACM	Base ubicada del lado del ACM que conecta el Plenum con el fuselaje del avión.	
Base central	Base ubicada en la parte central que conecta el Plenum con el fuselaje del avión.	
Carcasa de difusor	Estructura exterior del difusor.	
Topes de compuerta	Elementos que retienen la puerta del difusor y limitan su movimiento.	

fuentes: elaboración propia.

También fue necesario asignar un material al modelo conceptual ya que es importante controlar la variable el peso desde una etapa temprana de diseño, a continuación, en la Tabla 14 se muestra el material seleccionado:

Tabla 14. Características del material para fundición.

	Aluminum, A332.0, cast, T5
^ Price	
Price (USD/lb)	1.26 - 1.45
^ Physical properties	
Density (lb/in <sup>3</sup> )	0.0965 - 0.0986
^ Mechanical properties	
Yield strength (elastic limit) (ksi)	17.9 - 19.8
Tensile strength (ksi)	28.9 - 32
^ Thermal properties	
Melting point (°F)	977 - 1040
Maximum service temperature (°F)	338 - 392
^ Electrical properties	
Galvanic potential (V)	-0.72 - -0.64
^ Processing properties	
Metal casting	Excellent
^ Durability	
Water (fresh)	Excellent

fuelle: Proceso Materiales(Hernandez 2019).

Una vez establecidos los elementos a integrar el diseño, interfaces y características de material se pudo generar el primer modelo 3D en la Figura 40 y 41 se puede observar el diseño conceptual inicial de la carcasa y la cubierta respectivamente.

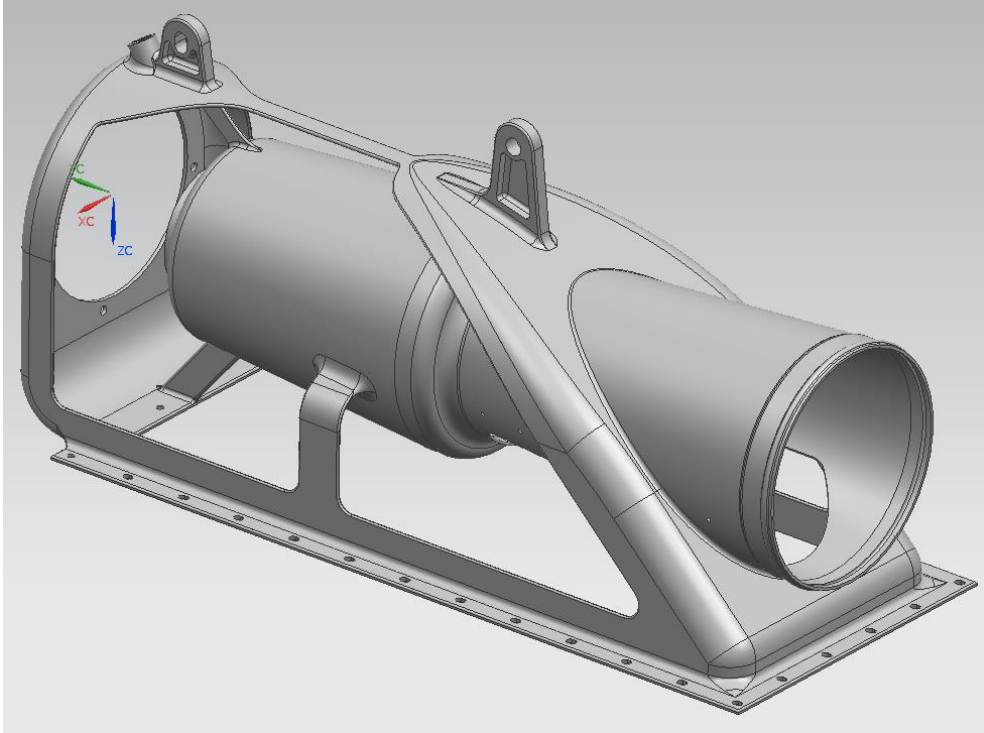


Figura 40. Diseño Conceptual de la carcasa del Plenum, fuente: creación propia.

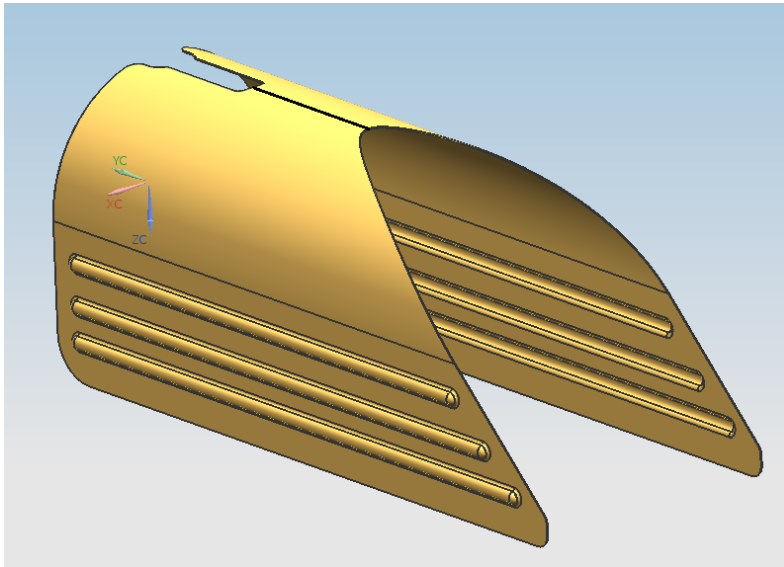


Figura 41. Diseño Conceptual de la cubierta del Plenum, fuente: creación propia.

#### 4.3.2 Optimización funcional:

Con el fin de reducir la cantidad de material a utilizar cumpliendo así con el objetivo de Desarrollar un modelo con una topología que reduzca peso, costo de fabricación y cumpla las especificaciones de desempeño requeridas por el Sistema, para la carcasa es necesario llevar a cabo un proceso de optimización estructural, esta optimización se realizó en dos vertientes una la optimización clásica que fue la serie de iteraciones trabajadas en conjunto con el proceso **FEA** que tiene como objetivo validar estructuralmente el diseño y otra optimización asistida por la herramienta optistruct de Altair inspire.

Para la cubierta el proceso fue más sencillo ya que con el fin de simplificar su fabricación se restringió a que debía de ser un elemento con un espesor de pared de lámina comercial esto facilito su análisis en el proceso **FEA**.

##### 4.3.2.1 Optimización funcional Asistida por optistruct:

Este proceso alterno se realizó con el fin de complementar la parte estructural del proceso principal de optimización ya que esta herramienta solo contempla variables mecánicas en su proceso de optimización.

Establecidos ya las interfaces, se pueden establecer espacios de diseño para el software de optimización, se establecen ciertas restricciones para el espacio de diseño, así como las cargas a las que es sometido el Plenum, en la Figura 42 se pueden observar los espacios a optimizar (color café), estos espacios son los que el software va modificar para obtener la geometría de mínimo volumen para garantizar máxima rigidez, también se puede observar espacios de no diseño (color gris) que son áreas que no van a ser modificadas ya que son parte de las interfaces del diseño.

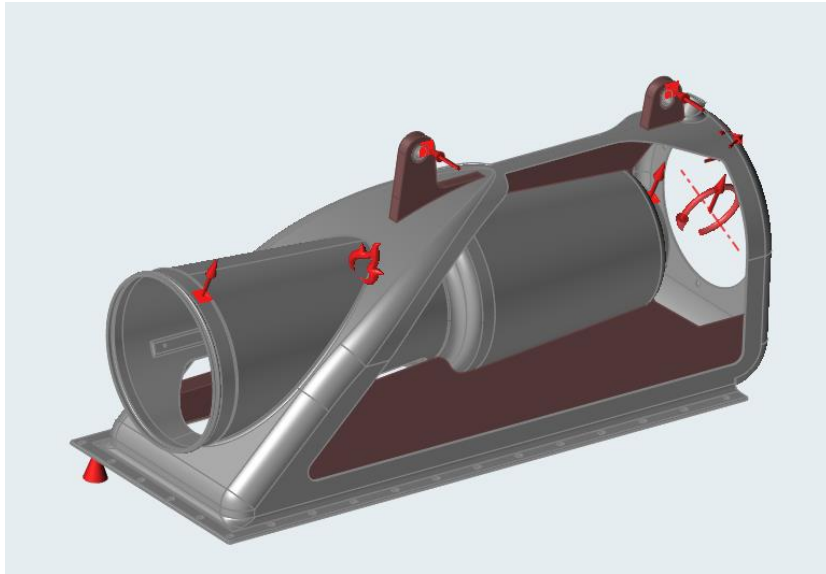


Figura 42. Configuración de espacios de diseño para optimización.

Después de la rutina de optimización para obtener la máxima rigidez, el resultado mostrado en la Figura 43 identifica las áreas donde hay que conservar el material, se puede observar como el material se orienta hacia los puntos más críticos representados dentro de los óvalos rojos.

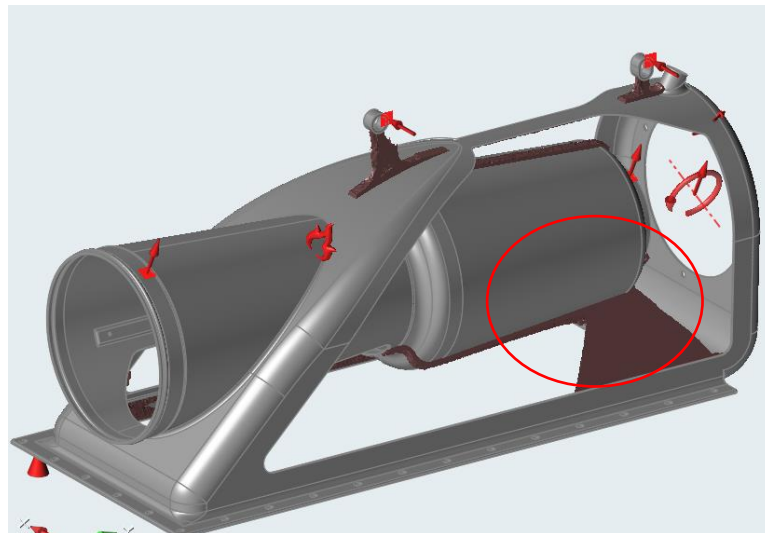
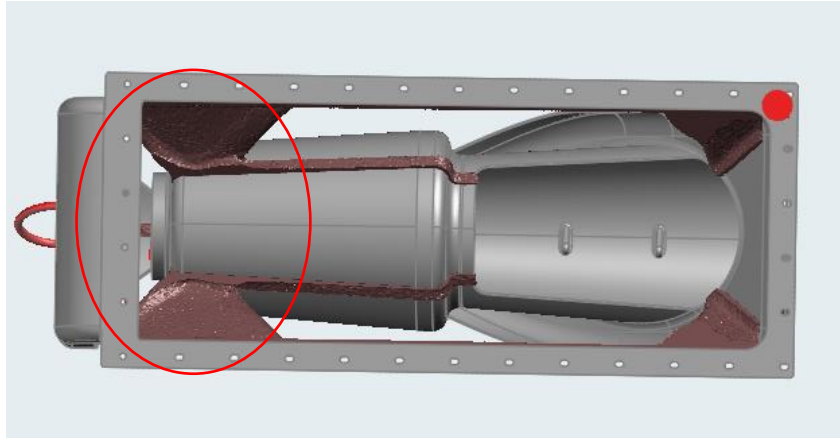


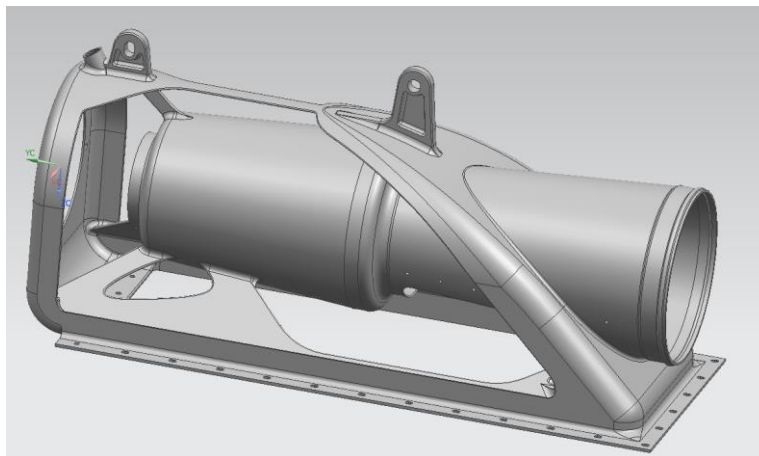
Figura 43. Espacio de diseño optimizado, Fuente: elaboración propia.

En la Figura 44 se agrega una vista inferior del modelo para poder tener una mejor apreciación del resultado de la optimización.



*Figura 44. Vista inferior de espacio optimizado, Fuente: elaboración propia.*

Con los resultados obtenidos a partir del software de optimización se procede a modelar esa aproximación, esto se muestra en la Figura 45.



*Figura 45. Modelo 3d basado en optimización estructural, Fuente: elaboración propia.*

#### 4.3.2.2 Optimización funcional Clásica:

Paralelamente se sigue un proceso de optimización clásica donde se llevan a cabo iteraciones de diseño basados en los comentarios del proceso **FEA**.

Tomando en cuenta el resultado de la optimización asistida se reconfiguran las orientaciones de los soportes para solucionar los puntos más críticos.

En la figura 46 se puede observar cómo se combinan ambas aproximaciones para llegar a un resultado final de carcasa optimizada.

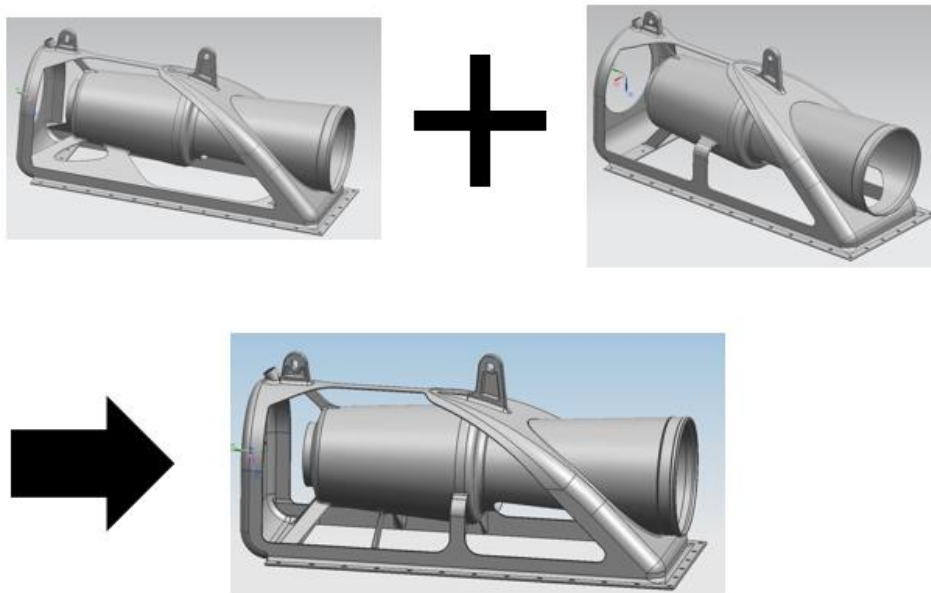
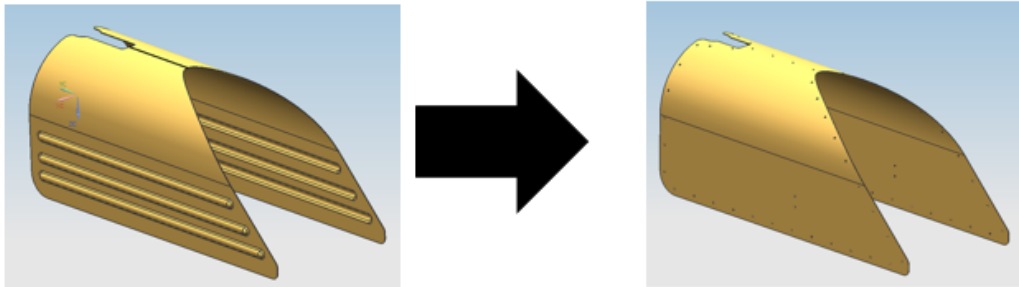


Figura 46. Geometría final de carcasa. Fuente: elaboración propia.



Para el caso de la cubierta se eliminaron los refuerzos para reducir concentraciones de esfuerzos, por lo que se reemplazó por una geometría aún más sencilla en la figura 47 se puede ilustrar la transición.



*Figura 47. Geometría final de la cubierta. Fuente: elaboración propia.*

#### **4.4Diseño a Detalle:**

Después del proceso iterativo de 11 versiones de diseño se encontró que es posible obtener un diseño para un Plenum que se fabrica utilizando la fundición de aluminio y rolado de lámina metálica como procesos más críticos, se agregaron componentes estándar como tornillería y remaches.

Es importante mencionar que el peso total del diseño final es de **10.6 lb** aproximadamente.

En las figuras 48, 49 y 50 se pueden ver los modelos 3D resultantes.

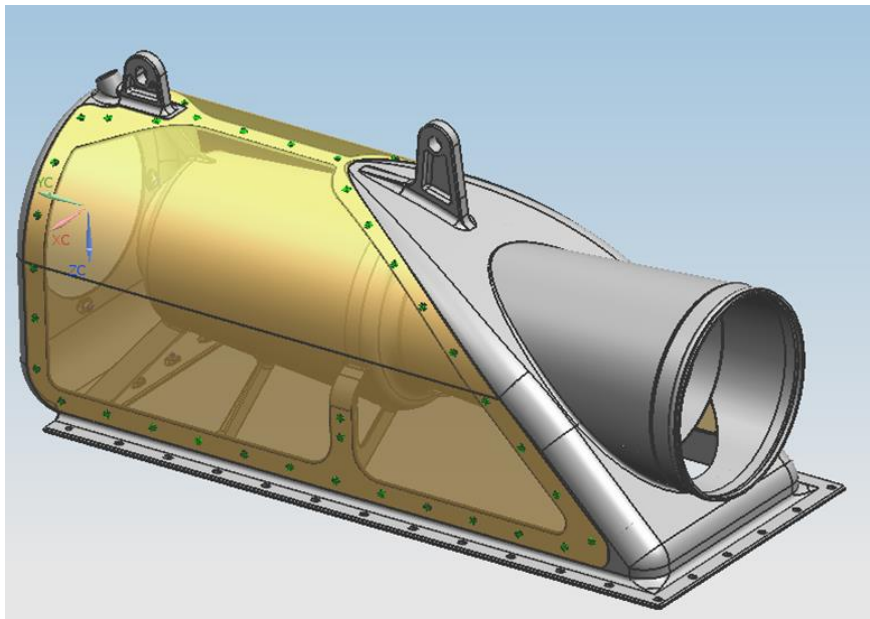


Figura 48. Versión final de diseño del Plenum, fuente: elaboración propia.

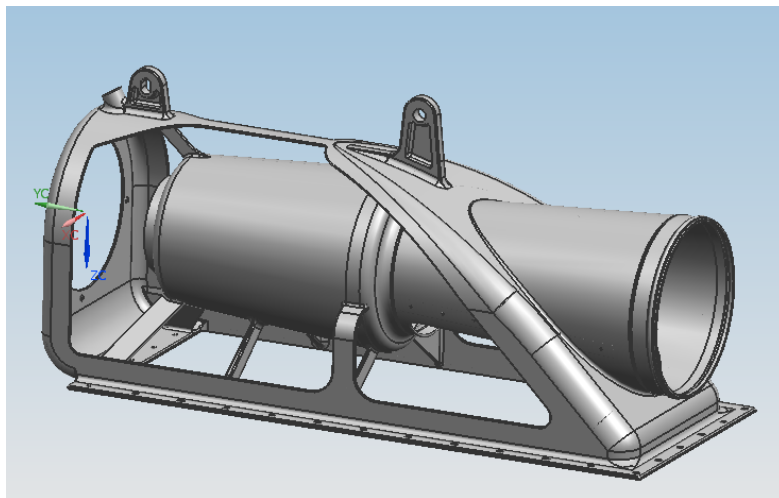
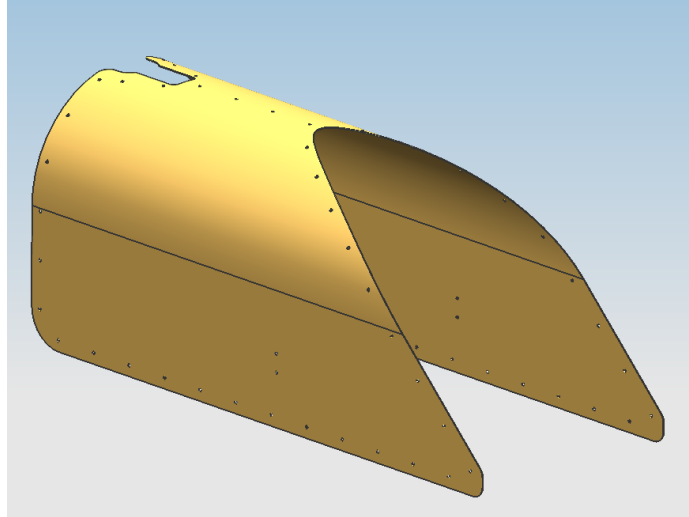


Figura 49. Estructura de Aluminio vaciado del Plenum, Fuente: elaboración propia.



*Figura 50. Cubierta de chapa metálica del Plenum, fuente: elaboración propia.*

## Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

### 5.1 Conclusión.

De acuerdo con la metodología establecida en el capítulo 3 de esta línea de investigación se dividió el trabajo en 3 fases las cuales se dividieron en actividades para cubrir los objetivos de este trabajo.

Las conclusiones serán presentadas siguiendo la misma estructura que la metodología.

La **fase 1** tuvo como objetivo identificar las especificaciones funcionales requeridas por el sistema de control ambiental para esto se obtuvo la información de Planos y especificaciones del diseño existente y del **Proceso FEA**(Martinez 2019) que es parte de la investigación global.

Con la información concentrada en **Tabla 9** para requerimientos funcionales **Figura 38** y **Tabla 10** para las condiciones de operación se concluye que este objetivo puede ser alcanzada mediante trabajo interno entre las líneas de investigación y se cuenta con la información suficiente dentro del acervo digital de Honeywell.

La **Fase 2** tuvo como objetivo proponer alternativa de proceso de fabricación para reducir costos de manufactura e identificar sus restricciones, para esto se dividió el diseño en 2 partes con el fin de aprovechar mejor las capacidades de los procesos de manufactura, se propusieron 4 candidatos de proceso de manufactura, se establecieron criterios preliminares para seleccionar los procesos de acuerdo a la información disponible sobre los procesos en el **Capítulo 2** de este trabajo de investigación poder seleccionar el mejor de los casos esto es mostrado en la **Tabla 11** y **Tabla 12**.

Con los procesos seleccionados se obtuvieron las restricciones de cada uno consultando la literatura, esto es mostrado en la sección **4.2.3 restricciones de proceso**.

Con esto se concluye que criterios como costo de materia prima, uso de materiales isotrópicos y capacidad de alcanzar geometrías complejas son buenos criterios para descartar procesos en una etapa temprana del desarrollo del producto, también que

limitaciones como el espesor de pared del proceso de fundición justifican la separación del diseño en 2 componentes para poder implementar secciones más delgadas y así hacer un componente con menor peso que se alinea a una parte del objetivo de la investigación de desarrollar un modelo con una topología que reduzca peso.

La **Fase 3** tuvo como objetivo encontrar la topología que cumpla con los requerimientos de proceso y los requerimientos de desempeño del sistema de control ambiental, para esto se consideró la información recopilada en las secciones **4.1 Fase 1: Funcionalidad**, **4.2 Fase 2: Manufactura** y los datos de material y peso máximo proporcionado por el **Proceso Materiales**(Hernandez 2019) que es parte de esta investigación global de tal manera que se pudo comenzar con el diseño conceptual para iniciar las iteraciones de diseño, con ayuda de la herramienta Optistruct de Altair inspire y los procesos de **FEA**(Martinez 2019), **Fundición**(Hernandez 2019) y **CFD**(Romero 2019) se logró desarrollar el diseño desde una etapa conceptual a un diseño a detalle.

Se puede concluir que la herramienta de optimización sirve como auxiliar para el proceso de diseño donde las variables a controlar son más que mecánicas, es posible hacer soluciones convergentes para reducir las iteraciones de diseño, al final de fase y una vez validado el diseño por los 3 procesos **FEA**(Martinez 2019), **Fundición**(Hernandez 2019) y **CFD**(Romero 2019) se concluye también que el diseño obtenido cumple con el objetivo de cumplir los requerimientos del proceso de fabricación y de desempeño del sistema de control ambiental.

Obteniendo un peso total de **10.6 libras** que representa el **83%** del peso del diseño original de **12.753 libras**, al fabricarse por medio de fundición de aluminio y rolado de chapa metálica es una alternativa para reducir los costos de fabricación comparado con los altos costos de materia prima y reprocesamiento del proceso Hand layup de prepreg del diseño existente.

Basado en los resultados de las 3 fases de la investigación y a los resultados de los procesos **FEA** (Martinez 2019), **Fundición**(Hernandez 2019), **CFD**(Romero 2019), **Costos**(Romero 2019) se presenta **Tabla 15**.

Tabla 15. Características principales del diseño final.

	Propuesta Diseño 1 Plenum				
	Peso(lb)	Costo(USD)	FDS(SU)	CFD	Fundición
Diseño 1	10.6	\$3,093.18	2.35	Cumple	Viable
Diseño existente	12.753	\$5,076.91	NA	Cumple	NA
Balance	-2.153	\$1,983.73			

Fuente: elaboración propia.

Con lo presentado en la **Tabla 15** se puede concluir que el resultado del diseño detallado cumple con el objetivo general de desarrollar un modelo con una topología que reduzca peso, costo de fabricación y cumpla las especificaciones de desempeño requeridas por el sistema de control ambiental.

Esto también cumple la hipótesis que establece que mediante la implementación de distintos procesos de fabricación se puede replantear el diseño del Plenum Gv con el fin reducir peso, costo de fabricación y cumplir las especificaciones de desempeño requeridas por el sistema de control ambiental.

### 5.1.1 Hallazgos.

Durante la investigación se adaptó la metodología del diseño para manufactura aditiva, siendo el proceso de fundición un proceso de naturaleza aditiva comparte la manufactura aditiva o impresión en 3D características como poder lograr formas complejas, integrar componentes en uno solo, fenómenos de enfriamiento y restricciones de espesor de pared.

Contrario a lo que se esperarían los procesos de fundición actuales son capaces de permitir espesores de pared relativamente delgados, con este dato en consideración el resultado más impactante es un diseño donde la aleación de aluminio resulta más ligera que su versión en material compuesto, esto indica también que posiblemente el diseño en material compuesto estaba sobre estimado pidiendo soportar

condiciones de uso más extremas que los que el sistema de control ambiental requiere.

#### 5.1.2 Limitaciones.

Se observó que la gran limitación de este proyecto fue el tiempo y los recursos disponibles, se pudo haber investigado a mayor profundidad opciones de procesos y materiales, pero debido al alcance de esta investigación se tomó la opción del diseño basado en proceso de fundición como la más adecuada para obtener un resultado en tiempo y forma.

#### 5.1.3 Impacto.

El impacto de esta investigación evidencia que a pesar de ser un proceso más antiguo la fundición sigue vigente incluso en aplicaciones donde procesos como el hand layup de materiales compuestos es preponderante y también sienta las bases para replicar la investigación con otros Plenums en plataformas distintas de Honeywell.

#### 5.1.4 Líneas de investigación futuras.

Esta adaptación de metodología se puede tomar como un preámbulo a una posible implementación de diseño para manufactura aditiva ya que una vez que el desarrollo en los procesos avance y reduzcan sus costos operativos se podría estar hablando de un Plenum impreso en 3D, Eliminando mucho del costo herramental que el proceso de vaciado requiere.

## 5.2 Conclusión General

El proyecto Global de esta investigación tuvo como propósito *“Desarrollar una propuesta de diseño para el plenum del Gulfstream V que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad, y permita reducir el costo del proceso de fabricación”*. Para lograrlo, fue necesario dividir el proyecto en áreas de investigación, en las cuales se incluyen Diseño 1, Diseño 2, FEA, Materiales, CFD, Fundición y Costos.

De acuerdo a las aportaciones basadas en los resultados de cada área de investigación, se pudo obtener la Tabla 16. En la primera parte se muestran los resultados de factor de seguridad de la estructura en resistencia (Martinez, 2019), el peso total de Diseño 1 (Dávila, 2019) y Diseño 2 (Lizárraga, 2019), el Costo de cada diseño de acuerdo a los procesos de manufactura (Romero, 2019) y la funcionalidad

del Análisis Computacional de Fluidos (Romero, 2019). Se le asignó una ponderación en porcentaje de acuerdo a las prioridades establecidas durante la junta con los clientes.

Tabla 16. Criterios de ponderación de resultados de áreas de investigación para Diseño 1 y 2.

Ponderación	35%	30%	25%	10%
<b>Diseño</b>	Factor de Seguridad (SU)	Peso (libras)	Costo (dólares)	CFD
<b>Diseño 1</b>	2.35	10.6	\$3,093.18	Excede 4 de 4 parámetros
<b>Diseño 2</b>	3.05	11.08	\$3,061.94	Excede 3 de 4 parámetros

Fuente: Elaboración propia.

Al obtener los resultados de la Tabla anterior, se realizó Tabla 17 en la cual se le asignó el porcentaje correspondiente de acuerdo a los resultados obtenidos en cada Diseño. De esta manera, al Diseño 2 se le asignó el 35% de ponderación de Factor de seguridad debido a que es más seguro que el Diseño 1. En el caso del peso, el Diseño 1 tiene el 30% por tener un peso menor que el Diseño 2.

Para la cuestión de Costos, se incluyeron los precios de los procesos de manufactura, como el proceso de fundición, maquinado, soldadura, remachado, etc., y se obtuvo un costo final. El Diseño 2 tiene un precio menor por lo que se asignó el 25%. De igual manera, en los resultados del Análisis Computacional de Fluidos se obtuvo que el Diseño 1 tiene un mejor comportamiento que el Diseño 2, por lo que se otorgó al Diseño 1 el 10%, mientras que al Diseño 2, 7.5%.

Tabla 17. Ponderación de cada diseño designados por área de investigación.

Ponderación	35%	30%	25%	10%
<b>Diseño</b>	Factor de Seguridad (SU)	Peso (libras)	Costo (dólares)	CFD
<b>Diseño 1</b>	26.96%	30%	24.74%	10%
<b>Diseño 2</b>	35%	28.64%	25%	7.50%

Fuente: Elaboración propia.



Asimismo, en la Tabla 18 se obtuvieron los resultados totales de ponderación de cada área de investigación, y se eligió como mejor propuesta el **Diseño 2** (señalado en azul).

Tabla 18. Ponderación Total de Diseño 1 y 2.

Diseño	Total
Diseño 1	91.7%
Diseño 2	96.14%

Fuente: Elaboración propia

En base a estos resultados, se evaluaron las propiedades del Diseño 2 comparadas con el Diseño original, mostrando los resultados en la Tabla 19. En la columna de Factor de Seguridad, no se tiene el valor de factor de seguridad para el diseño original de compuestos, sin embargo, se sabe que es factible usarlo debido al reporte de calificación del ECS para Gulfstream V (Honeywell, 2002), en el que se evaluó el ensamble, más no por componente individual. Por otro lado, el factor de seguridad del Diseño 2 mostrado en la tabla, es de 3.05 (Martinez, 2019)

Asimismo, el peso del Diseño original es de 12.75 lb y fue obtenido del área de investigación de Materiales (Hernández, 2019), mientras que el peso del Diseño 2 es de 11.08 lb (Lizárraga, 2019), lo cual significa un ahorro en peso de 1.67 lb.

Además, el costo del diseño original es de \$5,076.91 dólares, mientras que el costo del Diseño 2 es de \$2,954.14 dólares. Esto se traduce en un ahorro de \$2,122.77 dólares por plenum. Si se considera la demanda de 322 plenum para el 2019, se obtendría un ahorro de \$683,531.94 dólares. Sin embargo, al considerar el costo del molde para fundición, se tiene un ahorro total de \$569,088.04 dólares (Romero, 2019).

Por último, en la cuestión de Análisis Computacional de Fluidos, se utilizó el análisis del diseño original como referencia base para evaluar el comportamiento del fluido a través del plenum. Una vez evaluado este componente, se obtuvo que el Diseño 2 excede 3 de 4 parámetros con respecto al original (Romero, 2019).

Tabla 19. Comparación de Resultados para Diseño original y Diseño 2.

Diseño	Factor de Seguridad (SU)	Peso (libras)	Costo (dólares)	CFD
<b>Diseño Original</b>	Desconocido	12.75	5,076.91	Referencia base
<b>Diseño 2</b>	3.05	11.08	3,061.94	Excede 3 de 4 parámetros

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, con base a estos resultados, se pudo determinar que el objetivo global “Desarrollar una propuesta de diseño para el plenum del Gulfstream V que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad, y permita reducir el costo del proceso de fabricación” se cumple. Puesto que se redujo el peso del diseño original, cumple con los requerimientos de funcionalidad y permitió reducir el costo del proceso de fabricación.

## Referencias

1. Rezaie R, Badrossamay M., Ghaie A., Moosavi H. (2013). Topology optimization for fused deposition modeling process. *The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)*, 6, 521-526. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827113001728>
2. Araque, G., & Vélez, E. (2016). Evolución y desarrollo estratégico organizacional del Diseño para la manufactura y montaje (DFMA): Una revisión. *CUADERNO ACTIVA*, 9(9), 143-167. Recuperado de <http://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/424>
3. Garcia J. (2016), Estudio de la influencia de diferentes diseños de los sistemas de alimentación y compensación en la fundición en arena. En la biblioteca de la escuela superior de ingenieros de Sevilla. Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60372/fichero/PFC+Jose+2+La+fundici%C3%B3n+en+arena.pdf>.
4. Acrotechinc (2019), Art of bending. Recuperado de <https://www.acrotechinc.com/art-of-bending>
5. Ponche R., Kerbrat O., Mognol P., Hascoet J., (2014) A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Volumen 30,(4), Pages 389-398, Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584513001026?via%3Dihub>
6. Gao W., Zhang Y., Ramanujan D., Ramani K., Chen Y., Williams B., Wang C., Shin Y., Zhang S., Zavattieri P.,(2015) The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering, *Computer-Aided Design*, 69, 65-89, Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448515000469?via%3Dihub>
7. Adiji B., & Ibiwoye T.,(2017). Effects of Graphics and Computer Aided Design Software on the Production of Embroidered Clothing in South Western Nigeria. *Art and Design Review*, 5(4), 230-240. Recuperado de <https://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=80449>
8. Techterms(2019) CAD definition, Recuperado de <https://techterms.com/definition/cad>

9. Fibre Glast (2019), Learning center – About Prepregs, Recuperado de [https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning\\_Center](https://www.fibreglast.com/product/about-prepregs/Learning_Center)
10. Altair (2019), Optistruct OPTimization V2017.2.pdf, Altair Engineering, Inc. All Rights Reserved.
11. Metal super Markets (2019), Sheet metal Gauge Chart, recuperado de <https://www.metalsupermarkets.com/sheet-metal-gauge-chart/>
12. UNAM (2019), Diseño de productos y sistemas, Recuperado de <http://www.ingenieria.unam.mx/~quiaindustrial/disen/menu3.htm>
13. Peralta, A., Enright M., Megahed, M., Gong J., Roybal M., Craig J. (2016) Towards rapid qualification of powder-bed laser additively manufactured parts, 5, 8. Recuperado de <https://rd.springer.com/article/10.1186%2Fs40192-016-0052-5>
14. Mech4study (2019), What is casting, working process, Advantages, disadvantages, terminology and Application?, recuperado de <http://www.mech4study.com/2017/04/what-is-casting-working-process-advantages-disadvantages-terminology-and-application.html>
15. Seabra M., Azevedo J., Araújo A., Reis L., Pinto E., Alves N., Santos R., Mortágua J.(2016), Selective laser melting (SLM) and topology optimization for lighter aerospace componentes, Procedia Structural Integrity, 1, 289-296, Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2452321616000408?via%3Dihub>
16. Zhu L., Li N., Childs P. (2017). Light-weighting in aerospace component and system design, Propulsion and Power Research, 7(2), 103-119, Recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212540X18300191>
17. Reddy K. S, Maranan V, Simpson TW, Palmer T, Dickman CJ. (2016). Application of Topology Optimization and Design for Additive Manufacturing Guidelines on an Automotive Component. ASME. Presentado en *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Charlotte, Carolina del norte, Estados unidos, Recuperado de <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=2591598>
18. Brooks H., Molony S. (2016). Design and evaluation of additively manufactured parts with three dimensional continuous fibre reinforcement, Materials & Design, 90, 276-283, recuperado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264127515307012>

19. Honeywell (2018). TODAY'S HONEYWELL Recuperado de:  
<https://www.honeywell.com/who-we-are/overview>
20. Honeywell Aerospace (2016). ECS Plenum Part Family. [Manual de Diseño].  
Copia en posesión del autor de este trabajo.
21. Honeywell(2002), Delta Qualification Test report. Random vibration,  
Operational Shock, and Crash Safety Air Conditioning Pack. Honeywell.
22. Hernandez, B. (2019). Rediseño para el Plenum del Gulfstream V Análisis por  
Computadora del Proceso de Fundición y Selección de Materiales para el  
nuevo diseño de Armadura del Plenum del Gulfstream V(Maestría). Centro de  
Enseñanza Técnica Y Superior.
23. Martinez, C. (2019). Rediseño para el Plenum del Gulfstream V Análisis de  
Elemento Finito para Plenum de Gulfstream V (Maestría). Centro de  
Enseñanza Técnica Y Superior.
24. Romero, A. (2019). Rediseño para el Plenum del Gulfstream V Validación de  
Fluidos por CFD y estimación de costos (Maestría). Centro de Enseñanza  
Técnica Y Superior.
25. Lizarraga, H. (2019). Rediseño para el Plenum del Gulfstream V - Propuesta  
de diseño 2 del Plenum del Gulfstream V orientada al DFMA y reducción de  
peso. (Maestría). Centro de Enseñanza Técnica y Superior.