

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Tesis/Proyecto de Ingeniería e Innovación
Proyecto de Aplicación

Rediseño para el *Plenum* del *Gulfstream V*

Propuesta de diseño 2 del *Plenum* del *Gulfstream V* orientada al DFMA y reducción de peso.

para obtener el grado de
Maestría en Ingeniería e Innovación
LGAC: Diseño y Sistemas de Manufactura
Área de énfasis: Diseño Aeroespacial

Presenta

Equipo *Honeywell*

Director de Proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

Co-director de Proyecto: Dr. Jesús Mora

Asesores 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 Ingeniería e Innovación

Proyecto de Aplicación

Rediseño para el *Plenum* del *Gulfstream V*

Propuesta de diseño 2 del *Plenum* del *Gulfstream V* orientada al DFMA y reducción de peso.

para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería e Innovación

LGAC: Diseño y Sistemas de Manufactura

Área de énfasis: Diseño Aeroespacial

Presenta

Equipo *Honeywell*

Director de Proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

Co-director de Proyecto: Dr. Jesús Mora

Asesores 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

Proyecto de Ingeniería e Innovación
Rediseño para el *Plenum* del *Gulfstream V*
Propuesta de diseño 2 del *Plenum* del *Gulfstream V* orientada al DFMA y reducción de peso.

para obtener el grado de
Maestro en Ingeniería e Innovación

Presenta

Equipo *Honeywell*

Director de Proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

Co-director de Proyecto:

Asesores de la Industria: Dr. Nicolás Díaz

Comité evaluador:

Dr. Alan Humberto
Escamilla Rodríguez

Dr. Juan Ignacio
Rodríguez del Prado

Dr. Miguel A.
Ponce Camacho

Mexicali, Baja California. Marzo 2019

Agradecimientos

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que me han ayudado y me han apoyado a lo largo de estos últimos dos años por la maestría realizada en el Centro de Enseñanza Técnica y Superior. En primer lugar, quiero agradecer el apoyo recibido por parte de toda mi familia, desde mi esposa, madre y hermanos hasta mis tíos.

Mi esposa, gracias a ella porque en todo momento fue un apoyo incondicional para mí, fue el ingrediente perfecto para poder lograr alcanzar esta dichosa y muy merecida victoria en la vida, el poder haber culminado este proyecto final de maestría con éxito, y poder disfrutar del privilegio de ser agradecido, ser grato con esa persona que se preocupó por mí en cada momento y que siempre quiso lo mejor para mi porvenir. Te agradezco por tantas ayudas y tantos aportes no solo para el desarrollo de mi tesis, sino también para mi vida; eres mi inspiración y mi motivación.

Mi madre, que siempre ha estado apoyándome desde que empecé a estudiar desde la primaria hasta ahora la maestría, y que siempre me ha sabido inyectar moral en mis peores momentos, no solo vividos a causa de mis estudios sino como consecuencia de la vida, incluso cuando ella no encontraba moral para ella misma. A mis hermanos, que por supuesto son los compañeros de vida. Mis tíos, sobre todo a mis tías Rosa Alicia y María quienes me han apoyado moralmente desde el inicio de mi educación.

Quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a todos los profesores que he tenido durante mi vida académica, no sólo en esta etapa sino también desde pequeño, porque entre todos han formado la base para que hoy pueda ser lo que soy. Entre los profesores, cabe una mención especial para la directora del proyecto, Dra. Dania Licea Verduzco, que gracias a sus consejos y correcciones hoy puedo culminar este trabajo. A los Profesores que me han visto crecer como persona, y gracias a sus conocimientos hoy puedo sentirme dichoso y contento.

Carta Institucional



HONEYWELL INGENIERIA Y TECNOLOGIA AEROESPACIAL DE MEXICO S DE RL DE CV
Calzada del Oro 1755
Dos División 2
C.P 21399, Mexicali, Baja California
Tel. 01-686-842-5500

14 de Marzo de 2019.

Al Centro de Enseñanza Técnica y Superior:

A través de este medio deseo confirmar que el estudiante Hector Daniel Lizarraga Flores realizó las actividades requeridas para llevar a cabo el proyecto *“Rediseño para el Plenum del Gulfstream V/Propuesta de diseño conceptual 2 del Plenum del Gulfstream V orientada al DFMA y reducción de peso”*, el cual se concluyó exitosamente en Honeywell Aerospace.

Atentamente,

Mrto. Oscar Alvarez Armenta
Mechanical Design Manager

ÍNDICE

Capítulo 1	7
1.1 Introducción	7
1.2 Antecedentes.....	15
1.3 Justificación General.....	18
1.4 Planteamiento del Problema	19
1.5 Descripción del Proyecto Global	23
1.5.1 Pregunta Global de Investigación	23
1.5.2 Objetivo Global.....	23
1.5.3 Estrategia General de Solución	23
1.6 Preguntas de Investigación.....	26
1.6.1 Problemática.....	26
1.7 Justificación Especifica	26
1.8 Objetivo General de Investigación.....	27
1.8.1 Objetivos Específicos.....	27
1.9 Planteamiento de Hipótesis	28
Capítulo 2	29
2.1 Marco Teórico.....	29
2.1.1 Diseño para la Manufactura y Ensamble (DFMA)	29
2.1.2 Diseño para Manufactura (DFM).....	30
2.1.3 Diseño para Ensamble (DFA)	31
2.1.4 Diseños Asistidos por Computadora (CAD)	32
2.1.5 Proceso de Diseño	33
2.1.6 Procesos de Manufactura	35
2.2 Casos de Estudio.....	38
Capítulo 3	40
3.1 Metodología.....	40
3.2 Procedimiento.....	40
3.3 Plan de trabajo.....	42
3.4 Recursos	43
Capítulo 4	44
4.1 Resultados.....	44
4.1.1 Fase 1.....	44
4.1.2 Fase 2.....	46
4.1.3 Fase 3.....	47
4.1.4 Fase 4.....	51
4.1.5 Fase 5.....	53
Capítulo 5	55
5.1 Conclusiones	55
5.2 Recomendaciones	58
5.1. Conclusión del Proyecto Global	58
Referencias.....	62

Índice de Figuras

Figura 1 – Diagrama de las diferentes divisiones dentro de Honeywell.	7
Figura 2 – Diagrama de los diferentes rubros que abarca el Sector Aeroespacial en Honeywell.	9
Figura 3 – Principales componentes del Sistema de Control Ambiental.	10
Figura 4 – Diagrama del proceso de manufactura del <i>Plenum</i> para el Gulfstream V.	11
Figura 5 – Modelo 3D actual del <i>Plenum</i> del Gulfstream V.	12
Figura 6 – Configuraciones de capas en distintas zonas del <i>Plenum</i>	13
Figura 7 – Configuración de corte de prepeg anterior and actual.	15
Figura 8 – Caul plates diseñados para ejercer presión en zonas críticas.	16
Figura 9 – Izquierda. Proceso sin utilizar Caul Plates. Derecha: <i>Plenum</i> utilizando Caul Plates.	16
Figura 10 – Configuraciones de Paneles.	17
Figura 11 – Rediseño del <i>Plenum</i> de aluminio.	17
Figura 12 – Defectos en diseño actual <i>Plenum</i> Gulfstream V.	18
Figura 13 – Horas trabajadas en <i>Plenum</i> en el periodo de enero a octubre 2018.	20
Figura 14 – Porcentaje del costo de los procesos de manufactura para la demanda de <i>Plenum</i> en el 2018.	21
Figura 15 – Diagrama para la metodología del Proyecto Global.	24
Figura 16 – Elementos de DFMA.	29
Figura 17 – Proceso del DFMA.	30
Figura 18 – Ejemplos de características que facilitan el ensamble.	31
Figura 19 – Proceso de Diseño.	34
Figura 20 – Tipos de modelos computarizados.	35
Figura 21 – Diagrama de Procesos de Manufactura Primarios.	36
Figura 22 – Diagrama de Procesos de Manufactura Secundarios y terciarios.	37
Figura 23 – Secuencia de las Fases de la metodología de este proyecto.	40
Figura 24 – Diagrama del plan de trabajo.	42
Figura 25 - Vista 1 del diseño actual mostrando elementos críticos.	45
Figura 26 - Vista 2 del diseño actual mostrando elementos críticos.	45
Figura 27 - Vista Seccionada del Modelo CAD de Casting.	47
Figura 28 – Vista Isométrica del Modelo CAD de Casting.	47
Figura 29 – <i>Plenum</i> con cavidades en la carcasa.	49
Figura 30 – Vista Isométrica de la propuesta final de Diseño del <i>Plenum</i> Gulfstream V.	49
Figura 31 - Componentes no Integrados.	50
Figura 32 - Diseño Final del <i>Plenum</i> Gulfstream V.	54

Índice de Tablas

Tabla 1 – Costos de manufactura del <i>Plenum</i> actual y costos estimados de manufactura por fundición.	21
Tabla 2 – Ventajas y Beneficios del DFA	32
Tabla 3 – Elementos críticos por Diseño y Proceso de Manufactura.....	45
Tabla 4 – Ventajas Investment Casting vs Compuestos.....	46
Tabla 5 - Componentes Integrados Antes y Despues	48
Tabla 6 – Lista de Componentes no Integrados	50
Tabla 7 – Resultados de DFA	51
Tabla 8 - Resultados de DFM	52
Tabla 9 – Tabla Comparativa de Pesos	52
Tabla 10 – Tabla de iteraciones con los procesos de validación	53
Tabla 11 – Resultados del Modelo después de las iteraciones con los procesos de validación.....	54
Tabla 14. Criterios de ponderación de resultados de áreas de investigación para Diseño 1 y 2.....	59
Tabla 15. Ponderación de cada diseño designados por área de investigación.....	60
Tabla 16. Ponderación Total de Diseño 1 y 2.....	60
Tabla 17. Comparación de Resultados para Diseño original y Diseño 2.	61

Resumen

La aportación de este proyecto es desarrollar un diseño del *Plenum Gulfstream V* que contenga la metodología de DFMA para reducir los defectos de manufactura y mejorar el peso actual sin afectar su funcionalidad.

La metodología de este proyecto de investigación, se desarrolla mediante una metodología tipo mixta, donde realiza métodos descriptivos basados en entrevistas, así como de experimentación basados en el diseño de modelo y sus validaciones cuantitativas. A su vez, el procedimiento fue dividido en 5 fases principales en el cual se pretende alcanzar los objetivos específicos planteados en la investigación.

Así pues, se desarrolló un modelo 3D por medio del software NX que pudiera facilitar la fabricación del *Plenum Gulfstream V* utilizando un proceso de manufactura alternativo ya que el proceso actual tiene muchos problemas de defectos debido al diseño actual. Se ha escogido la metodología de DFMA ya que, como se ha puesto de manifiesto en esta investigación, es una técnica aplicada en la mejora y desarrollo de productos cuya finalidad es gestionar la minimización de costos de fabricación y ensamblaje.

El estudio de los resultados obtenidos con el cambio de proceso de manufactura, confirmará las ventajas de fabricar el nuevo producto por medio del proceso de *Investment Casting* validando por medio de DFMA que el diseño está enfocado a la manufactura ayudando a establecer la viabilidad de su producción y evitando incurrir en costos innecesarios. Además de ser innovador, el diseño reduce el peso final a comparación del diseño actual del *Plenum Gulfstream V* cumpliendo con el objetivo.

Así mismo, esta investigación será de gran contribución para *Honeywell* debido a que demuestra la importancia de implementar la metodología del DFMA desde la etapa de desarrollo conceptual para nuevos productos que ayuden a facilitar la fabricación y ensamblaje del producto.

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*”).

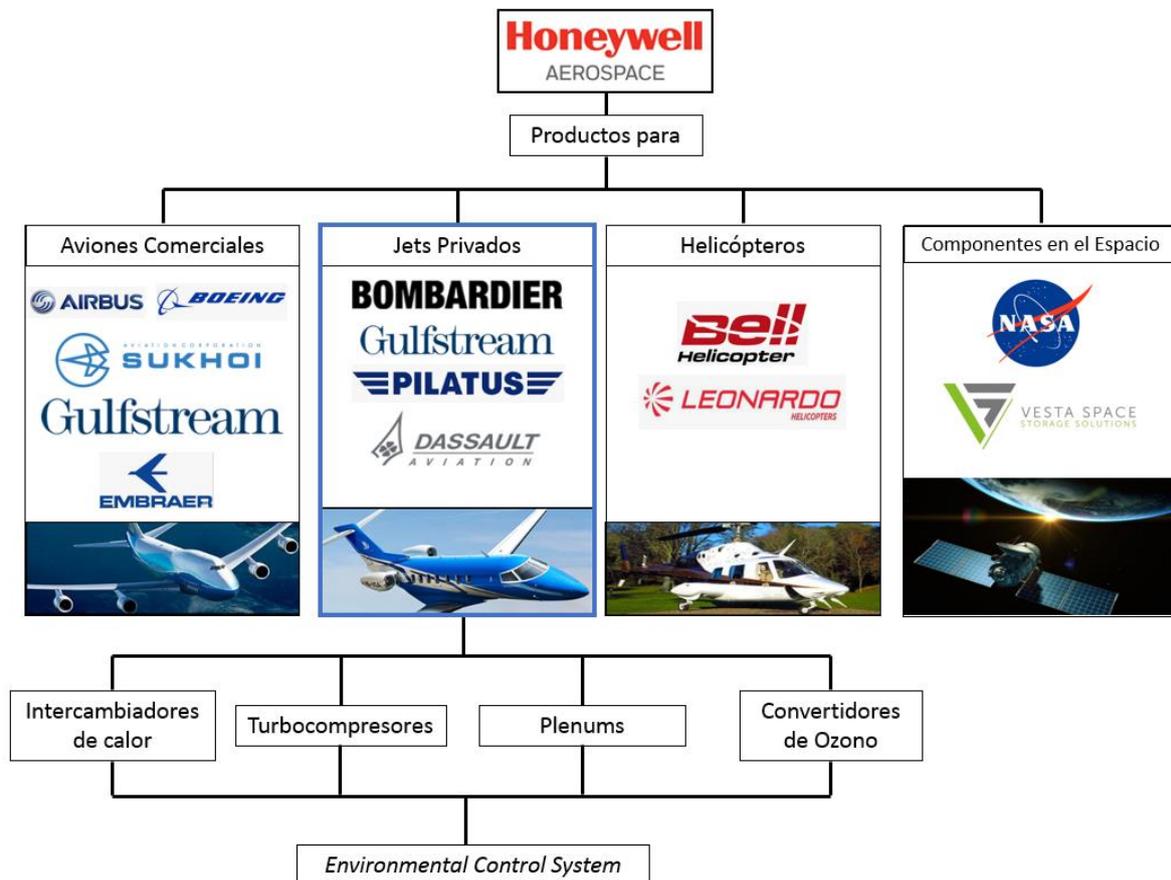


Figura 2 – Diagrama de los diferentes rubros que abarca el Sector Aeroespacial en Honeywell.
Fuente: Elaboración propia, basado en Honeywell (2018).

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.

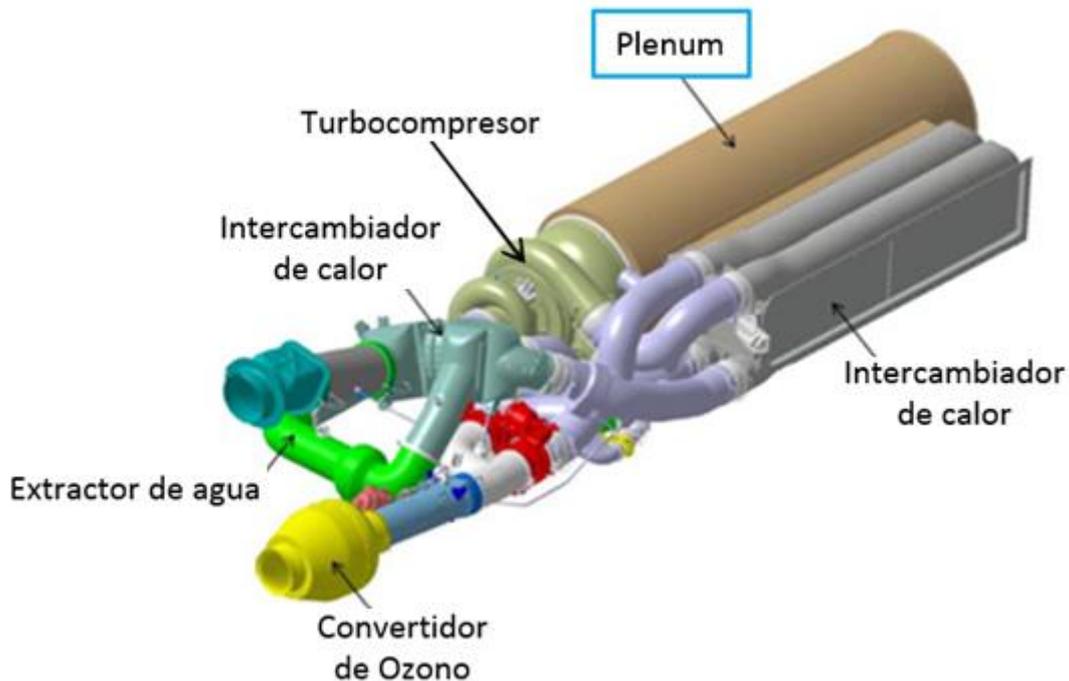


Figura 3 – Principales componentes del Sistema de Control Ambiental.
Fuente: Honeywell Aerospace (2016).

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 la 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.

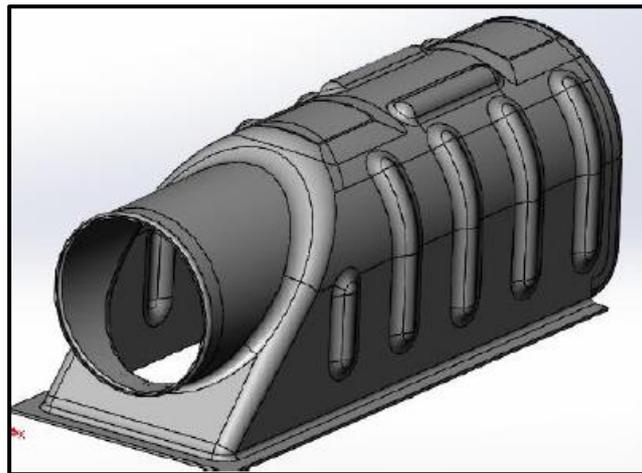


Figura 5 – Modelo 3D actual del Plenum del Gulfstream V.
Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

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 Figura 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 *Wrightlon 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*.

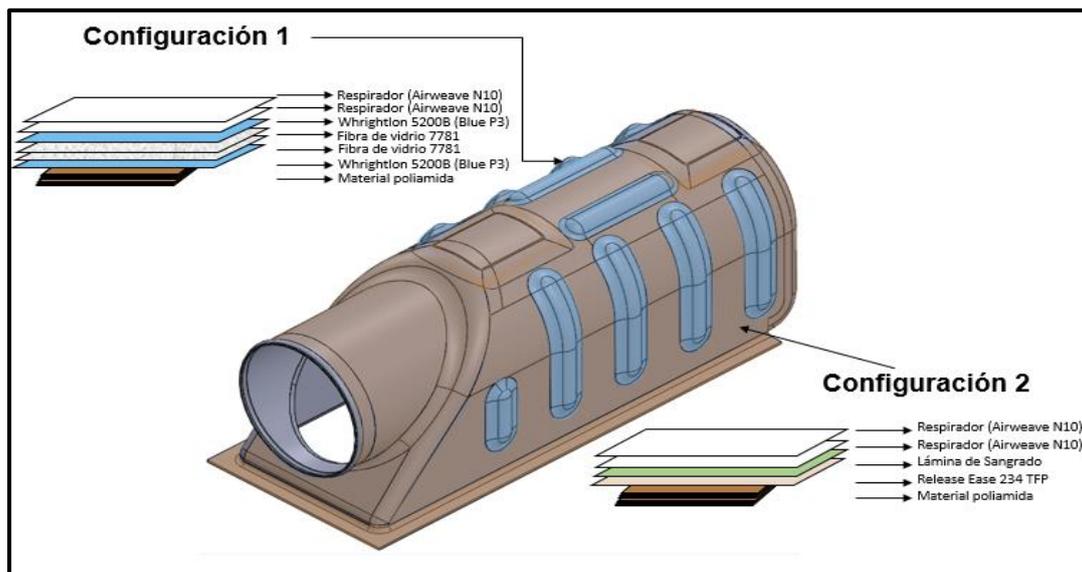


Figura 6 – Configuraciones de capas en distintas zonas del Plenum.
Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

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 empaqa 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.

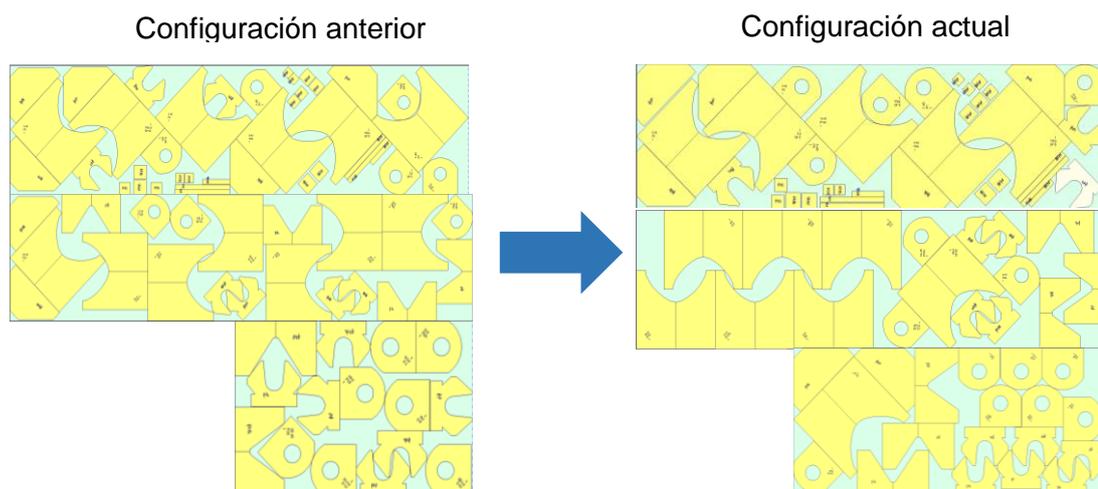


Figura 7 – Configuración de corte de prepreg anterior and actual.

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.

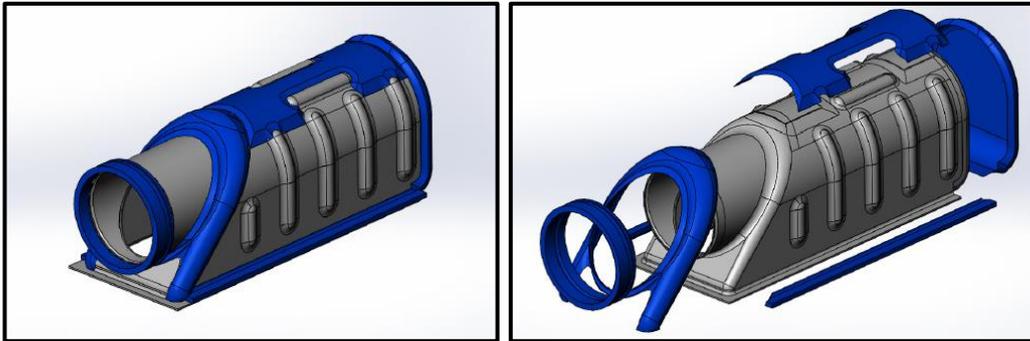


Figura 8 – Caul plates diseñados para ejercer presión en zonas críticas.
Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

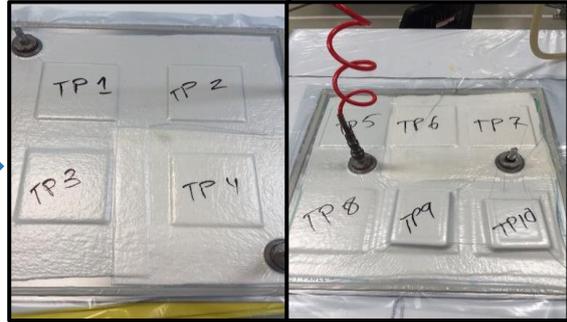


Figura 9 – Izquierda. Proceso sin utilizar Caul Plates. Derecha: Plenum utilizando Caul Plates.
Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

- 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 Figura 6.



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.

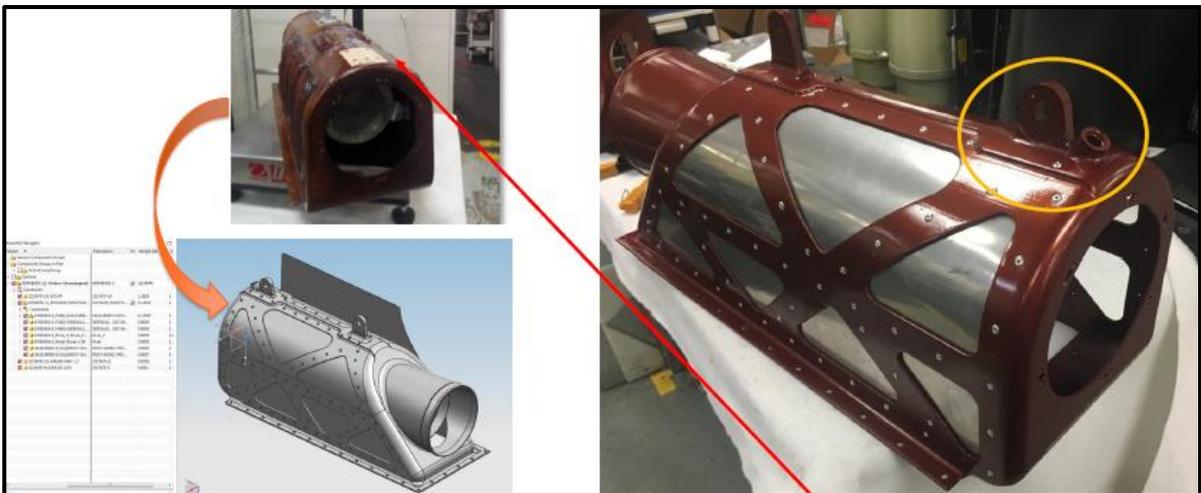


Figura 11 – Rediseño del Plenum de aluminio.
Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

En 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 Gulfstream V.
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 **Error! Reference source not found.** 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.

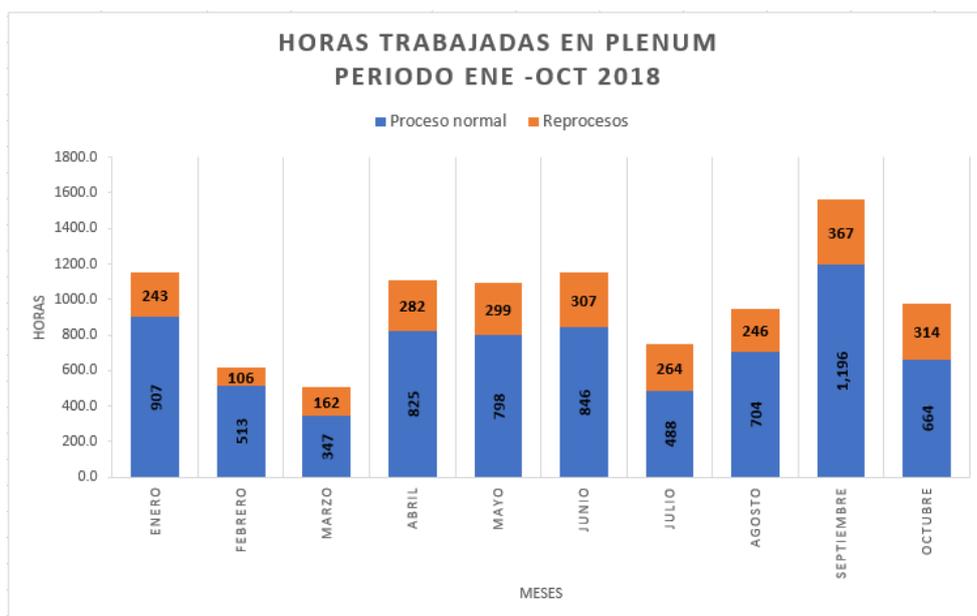


Figura 13 – Horas trabajadas en Plenum en el periodo de enero a octubre 2018

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.

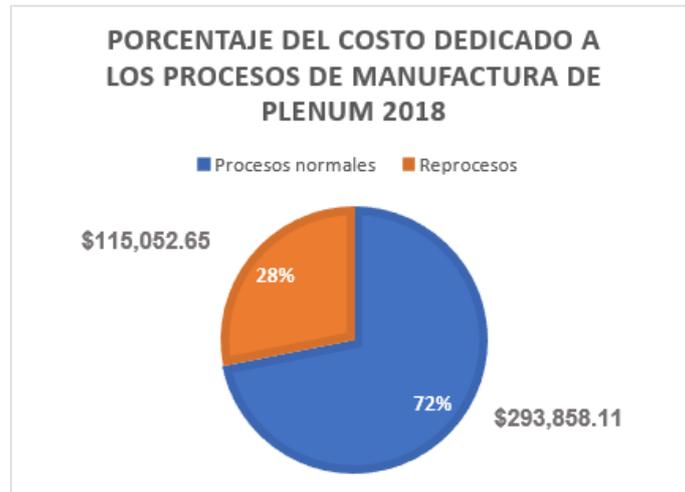


Figura 14 – Porcentaje del costo de los procesos de manufactura para la demanda de Plenum en el 2018.

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, la cual se muestra en la Tabla 1.

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

Fuente: Obtenido de documentación de Honeywell.

Proceso actual (compuesto)	Costo (dólares)
Plenum	3,331.94
Ensamble	1,744.97
Total	5,076.91
Proceso fundición (estimado)	Costo (dólares)
Plenum	1,650.00
Maquinado y Ensamble	1,744.97
Total	3,394.97
Ahorro por plenum	1,681.94

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

1.5.1 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?

1.5.2 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.

1.5.3 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 6 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.

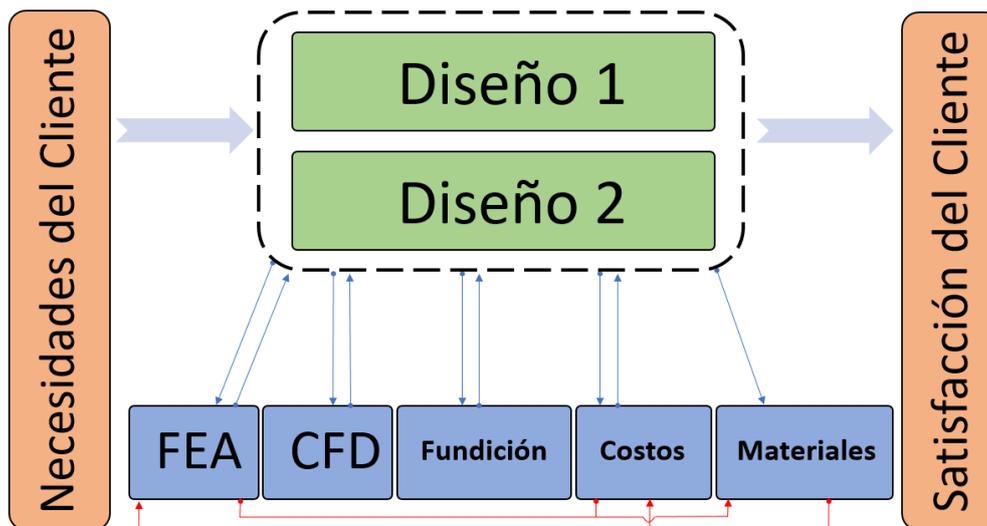


Figura 15 – Diagrama para la metodología del Proyecto Global.
Fuente: Elaboración propia.

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 retroalimentaciones de los procesos de análisis de elemento finito, análisis de fundición, selección de materiales, análisis de fluidos y costos. Tomando en cuenta el cumplimiento de los requerimientos de cada uno de estos procesos se planea obtener un diseño de *Plenum* que satisfaga las necesidades del cliente.

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 de selección 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.

Esta investigación tiene además el propósito de tener un impacto en el desarrollo industrial de nuestra comunidad permitiendo demostrar la calidad técnica, profesional e innovadora que se encuentra en el área de diseño aeroespacial en Mexicali, en el cual nos ayudará a posicionarnos en la mente de los inversionistas para traer más programas aeroespaciales enfocados a la tecnología e innovación.

1.6 Preguntas de Investigación.

Respecto a este proyecto global, la contribución de esta investigación está dirigida a responder la siguiente pregunta de investigación asociada al desarrollo de un diseño del *Plenum Gulfstream V*.

- ¿Cómo mejorar el diseño del *Plenum Gulfstream V* que permita reducir los defectos de manufactura y mejorar el peso actual sin afectar su funcionalidad?

1.6.1 Problemática

En el cual se descomponen en las siguientes preguntas específicas:

- ¿Cuáles son los elementos críticos del producto y proceso de manufactura actual que contribuyen al incremento de defectos de manufactura?
- ¿Existen proceso de manufactura alternativo que ayude a reducir los defectos de manufactura?
- ¿Cómo elaborar un diseño del *Plenum Gulfstream V* enfocado a la metodología de DFMA?
- ¿Cómo determinar si el diseño del *Plenum Gulfstream V* cumple con los principios de DFMA y mejore el peso del diseño actual?
- ¿Cómo determinar si el diseño del *Plenum Gulfstream V* cumple con los requisitos de operación de vuelo, costos y su proceso de manufactura?

1.7 Justificación Específica

El presente proyecto de investigación que aquí se presenta hacia el proyecto global, es desarrollar un diseño que contenga la metodología de Design for Manufacture and Assembly (DFMA) para reducir los defectos de manufactura y mejorar el peso actual sin afectar la funcionalidad del *Plenum* actual fabricado en la Planta de *Honeywell Integrated Supply Chain (ISC)* Mexicali. Con los resultados y aportaciones de esta investigación, se pretende que la compañía obtenga mejores resultados en el tiempo de ciclo de manufactura, entregas a tiempo y reducción de defectos del producto resultando en ahorros de costos significativos.

Por otra parte, el desarrollo de la presente investigación es totalmente factible debido a que se cuenta con la colaboración de expertos del producto de Honeywell Aerospace de la ciudad de Mexicali para proporcionar la información necesaria que permitan alcanzar los objetivos planteados, además de poseer los recursos materiales y el conocimiento teórico y práctico adquirido durante la maestría para llegar al éxito de la investigación.

1.8 Objetivo General de Investigación.

Considerando el objetivo global del proyecto, la investigación que aquí se presenta tiene como propósito contribuir al proyecto global planteando el siguiente objetivo general asociado al diseño del *Plenum Gulfstream V*.

- Desarrollar un diseño del *Plenum Gulfstream V* que contenga la metodología de DFMA para reducir los defectos de manufactura y mejorar el peso actual sin afectar su funcionalidad.

1.8.1 Objetivos Específicos

En el cual se descomponen en los siguientes objetivos específicos:

- Identificar los elementos críticos del producto y proceso de manufactura actual que contribuyen al incremento de defectos de manufactura.
- Evaluar un proceso de manufactura alternativo que ayude a reducir los defectos de manufactura.
- Elaborar un modelo 3D del nuevo diseño del *Plenum Gulfstream V* enfocado a la metodología de DFMA.
- Evaluar y analizar si el diseño del *Plenum Gulfstream V* cumple con los principios de DFMA y mejore el peso del diseño actual.
- Validar el diseño del *Plenum Gulfstream V* que cumpla con los requisitos de operación de vuelo, costos y su proceso de manufactura.

1.9 Planteamiento de Hipótesis

La manufacturabilidad del *Plenum Gulfstream V* se ha visto afectada a lo largo de su vida en *Honeywell Aerospace* de Mexicali debido a su mal diseño enfocado a la manufactura en el cual los altos índices de defectos en su fabricación contribuyen a pérdidas económicas significativas para la empresa.

Esta investigación plantea la hipótesis, de que es posible desarrollar un nuevo diseño para el *Plenum Gulfstream V* que cumpla con la metodología de Design for Manufacturing and Assembly (DFMA) utilizando un proceso de manufactura alternativo que sea capaz de reducir los defectos y mejore el peso actual sin afectar su funcionalidad.

Capítulo 2

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Diseño para la Manufactura y Ensamble (DFMA)

Araque y Velez (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 (Figura 16).

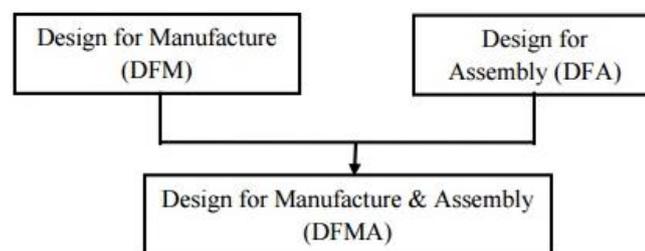


Figura 16 – Elementos de DFMA

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.

En el Caso de Barbosa y Carvalho (2013) es analizado el diseño para la manufactura y Ensamble (DFMA) como una técnica aplicada en la mejora y desarrollo de productos cuya finalidad es gestionar la minimización de costos de fabricación y montaje. Además, mencionan que la implementación de este nuevo tipo de pensamiento debe ser incorporado desde una etapa inicial del diseño con el objetivo de prever las probabilidades de ajuste y modificaciones necesarias en búsqueda de la reducción de número de componentes y partes asociadas al producto (Figura 17). Con lo se pueden obtener resultados de beneficio tanto para el producto como para los procesos de producción, como por ejemplo la reducción de numero de partes,

aumento de la calidad, simplicidad y estandarización de procesos de ensamble y reducción de costos de fabricación.

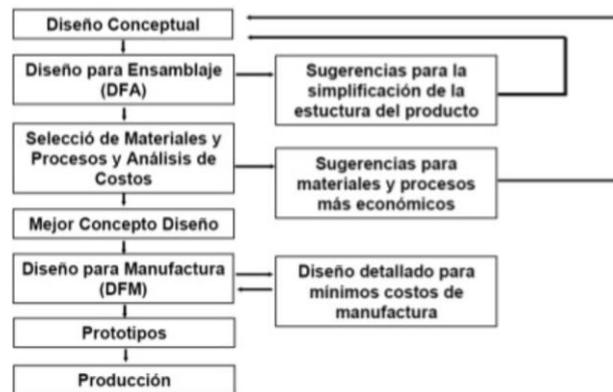


Figura 17 – Proceso del DFMA

Según Eastwood y Haapla 2015, desde la perspectiva de la etapa de diseño y considerarlo en fases tempranas del desarrollo del producto, es común encontrar metodologías con respecto DFMA, el cual permite reducir la complejidad y habilitar una reducción de costos significantes y tiempo operacional.

Las Características y beneficios de DFMA incluyen (Mesa, Maury, Arrieta, Corredor y Bris 2018):

- Análisis de los costos de la cadena de suministro.
- Simplificar los productos y mejorar la calidad.
- Trabajo en equipo más rápido entre el diseño y la fabricación.
- Reducción de costos de fabricación y montaje.

2.1.2 Diseño para Manufactura (DFM)

Esta técnica, que está orientada a mejorar la fabricación de piezas analizando geometrías, valores y tolerancias, es utilizada en las primeras etapas de diseño para disminuir los costos de los elementos a fabricar.

De acuerdo a Fortunet, Durieux, Chanal y Duc (2018) puede ser considerado como un método para optimizar la manufacturabilidad del diseño a la tendencia hacia un rentable proceso de manufactura o una toma de decisión para definir el proceso más efectivo.

2.1.3 Diseño para Ensamble (DFA)

El DFA es una metodología y técnica ampliamente usada, que permite analizar en forma sistemática la facilidad de ensamble y subensamble de cualquier producto, a partir de este análisis se proponen modificaciones al diseño existente con el objetivo de reducir el número de piezas, disminuir tiempo y herramientas de ensamble, con lo cual se reduce el tiempo de desarrollo de un producto enfocándose en la funcionabilidad, lo cual conlleva como resultado una mejora en la calidad del mismo y una minimización de costos (Gabriel Arreola, López Cano, Sánchez Zambrano & Santibáñez, 2018).

Synnes & Welo, (2016) orientan los diseños DFA hacia procedimientos enfocados en reducir los costos de producción por medio de procesos de transferencia y retroalimentación de conocimiento entre los departamentos de diseño e ingeniería de tal forma que se generen nuevos e innovadores prototipos que faciliten la fabricación de componentes del producto (Figura 18) y sean conservadas las características de calidad del mismo.

El-Nounu, Popov y Ratchev (2018) asumen que, en la industria aeroespacial, los productos tienen una vida muy larga, ya que con frecuencia se optimizan en lugar de introducir nuevos productos. Esto ha significado que los productos más antiguos, que son generadores de ingresos estables, no se hayan beneficiado del último diseño para los métodos de ensamblaje y la tecnología de fabricación que sufre la obsolescencia. Se ha establecido que un gran porcentaje del costo total del producto se determina en la etapa de diseño; Por lo tanto, los productos existentes sufren de costos precargados.

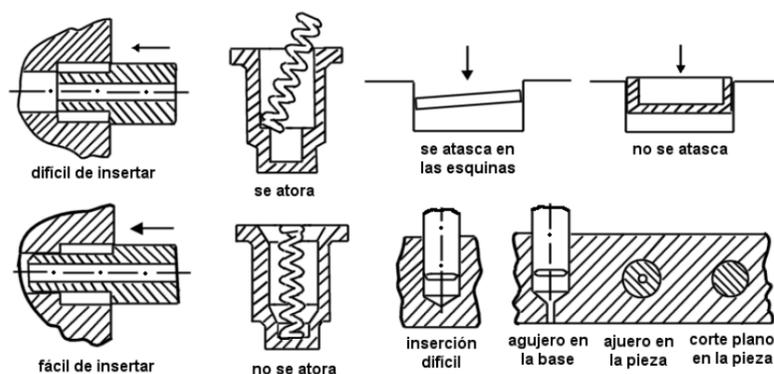


Figura 18 – Ejemplos de características que facilitan el ensamble.

Según Gabriel Arreola, López Cano, Sánchez Zambrano & Santibáñez (2018), las ventajas de utilizar esta metodología van más allá de disminuir el costo de ensamblar, sino que reduce costos de órdenes de producción y de almacenamiento. Otra ventaja notable de aplicar el diseño para ensamble es que la calidad del producto aumenta pues se evitan errores en el proceso, sobre todo cuando las piezas permiten el ensamble de una sola manera o la simetría en las piezas evita un ensamble incorrecto. Esto genera un menor porcentaje de productos defectuosos y reproceso.

La aplicación tanto de los métodos como de las reglas generales de diseño para ensamble produce diversos beneficios, los cuales se mencionan en la Tabla 2.

Tabla 2 – Ventajas y Beneficios del DFA

Pauta	Interpretación y Ventajas
Minimizar la cantidad de componentes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Menores costos de ensamble ▪ Mayor facilidad de desensamble para mantenimiento ▪ Facilita la automatización ▪ Menores costos de pedidos
Usar piezas comunes a través de las líneas de productos.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permite el desarrollo de celdas de manufactura ▪ Evita el manejo de múltiples tipos de piezas
Incrementar la simetría de las piezas.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ No se requiere orientación ▪ No permite que se cometan errores en el ensamble
Colocar biseles y chaflanes	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduce el tiempo de inserción
Eliminar o reducir el ajuste requerido	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducir tiempo de ensamble
En piezas forzosamente asimétricas, resaltar la asimetría.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reducir tiempo de orientación ▪ Eliminar errores de ensamble
Designar una pieza base.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Reduce tiempo de ensamble ▪ Facilita la adición de piezas subsecuentes ▪ Permite el uso de sujetadores
Realizar el ensamble en una dirección: vertical descendente.	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Facilita el ensamble ▪ Elimina tiempo de reorientación ▪ Permite el uso de sujetadores

2.1.4 Diseños Asistidos por Computadora (CAD)

El Diseño Asistido por Computadora CAD (*Computer-Aided Design*) utiliza herramientas informáticas para diseñar productos y procesos y a su vez preparar su documentación de ingeniería en forma interactiva. Los programas CAD hacen posible que los diseñadores usen dibujos tridimensionales para ahorrar tiempo y dinero al acortar los ciclos de desarrollo en la mayoría de los productos. Estos sistemas

permiten manipular, analizar y modificar los diseños complejos y hacen posible la revisión de numerosas alternativas antes de tomar una decisión final.

Bilalis (2000) afirma que los diseños asistidos por computadora CAD están compuestos por un software (elementos intangibles: aplicación tecnológica específica) y un sistema hardware (elementos tangibles: componentes físicos) que son utilizados en el diseño de productos y configuración de procesos de producción.

Los modelos tridimensionales paramétricos creados en un sistema de CAD son:

- Modelo de alambre “wireframe” (información geométrica de entrada, usada para la representación de los vértices y aristas).
- De superficie (visualización y trabajos superficiales, usados en control numérico).
- Sólidos (análisis de ingeniería, se le asignan propiedades, son usados en el análisis con elementos finitos).

El modelo debe representar lo mejor posible la realidad, y luego aplicar métodos matemáticos para darle la forma y disposición adecuada para poder obtener resultados numéricos. El diseñador debe determinar si el modelo de computadora satisface o no el criterio de diseño, y debe ser capaz de leer el dibujo, comprender su forma, tamaño e información relativa a su fabricación.

2.1.5 Proceso de Diseño

El diseño en ingeniería es el proceso de concebir ideas en el desarrollo de la solución de un problema tecnológico, para lo cual usa conocimientos, recursos y productos existentes para satisfacer una necesidad o resolver un problema.

El diseño puede dividirse en dos grandes categorías: diseño de productos y diseño de sistemas o procesos. A medida que se desarrolla el diseño de un producto o proceso, el equipo de diseño aplica principios de ingeniería, toma en cuenta las restricciones de presupuesto, funcionalidad, legales, psicológicos y sociales para lo cual requiere información de áreas como las necesidades del cliente, materiales, capital, energía, requerimientos de tiempo, habilidades humanas, etc.

Las gráficas son importantes en el proceso de diseño, se utiliza para visualizar soluciones posibles y documentar las ideas, incluyen el dibujo de las piezas, curvaturas, descripciones de color, información con respecto al logotipo, colocación de ilustraciones e instrucciones de fabricación, etc.

El diseño de un objeto debe realizarse respetando normas nacionales e internacionales como: ANSI (American National Standards Institute), ASME (American Society of Mechanical Engineers), ISO (Internacional Standards Organization), STEP (Standard for the Exchange of Product Data), HTML (Hyper Text Markup Language), etc. La Figura 19 se presenta el proceso lineal general seguido en un proceso de diseño en ingeniería, en las diversas etapas existirá retroalimentaciones.

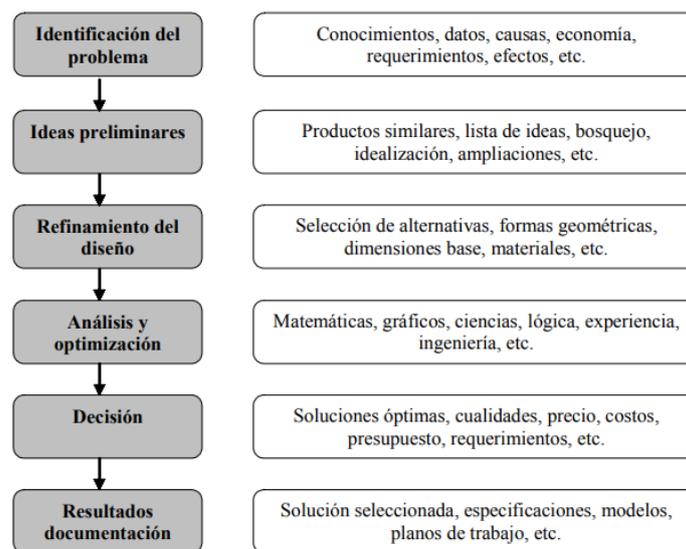


Figura 19 – Proceso de Diseño

El refinamiento del diseño es la etapa en que se comienza a trabajar con los sistemas CAD, está formada por tres áreas que se muestran en la Figura 20. El modelado es el proceso de representación de ideas abstractas, palabras y formas a través del empleo ordenado de texto e imágenes simplificadas con el objeto de generar un prototipo digital y comunicar, documentar, analizar y visualizar el proceso de diseño.

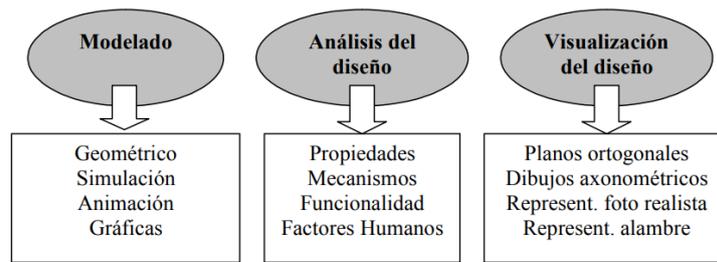


Figura 20 – Tipos de modelos computarizados

2.1.6 Procesos de Manufactura

El proceso de manufactura es la ciencia y tecnología por la cual un material es convertido a su forma final con la estructura y propiedades necesarias para su uso deseado. La mayor porción del proceso es darla la forma deseada. El procesamiento del producto puede ser simple, una operación de un solo paso o una combinación de varios procesos, dependiendo en que tan procesable es el material que se usa y las especificaciones para la parte terminada, lo cual incluye el acabado superficial, tolerancias dimensionales, entro otras. El método de selección del proceso apropiado esta cercanamente sujeto la selección del material.

- ¿Qué es lo que conduce a un exitoso proceso de manufactura? El desempeño de cualquier proceso de manufactura depende de:
- Tasa de producción: el flujo del material a través del sistema.
- Costo: material, mano de obra, herramental, equipamiento.
- Tiempo: tiempo de entrega para procurar materiales, tiempo de procesamiento, tiempo de preparación.
- Calidad: desviación del objetivo.

Todos estos factores resultan de la decisión hecha en la selección de la combinación proceso-material. Cuando diseñadores e ingenieros desarrollan un nuevo producto, en esta coyuntura, ya se tienen el dibujo básico de la parte y una selección de varias combinaciones de material-proceso posibles para la parte. La etapa siguiente es llegar a la combinación del material-proceso de manufactura que es técnicamente y económicamente posible. Figura 8 muestra el diagrama de los procesos de manufactura.

Los procesos están ordenados por similitud de función. Los procesos de manufactura pueden ser clasificados en general en tres categorías. Basado en la salida deseada, estos son procesos primarios, secundarios y terciarios (Castaño Meneses, V., Mital, A., Noriega Morales, S., & Lopez Jaquez, F., 2017).

Procesos Primarios

El proceso primario genera la forma principal del producto final. El proceso primario (Figura 21) es seleccionado para producir tantos atributos de forma requeridos de la parte como sea posible. Esos procesos aparecen en la parte superior de la secuencia de operación para una parte e incluye procesos como vaciado, forjado, moldeado, rolado, y extrusión (Castaño Meneses, V., 2017).

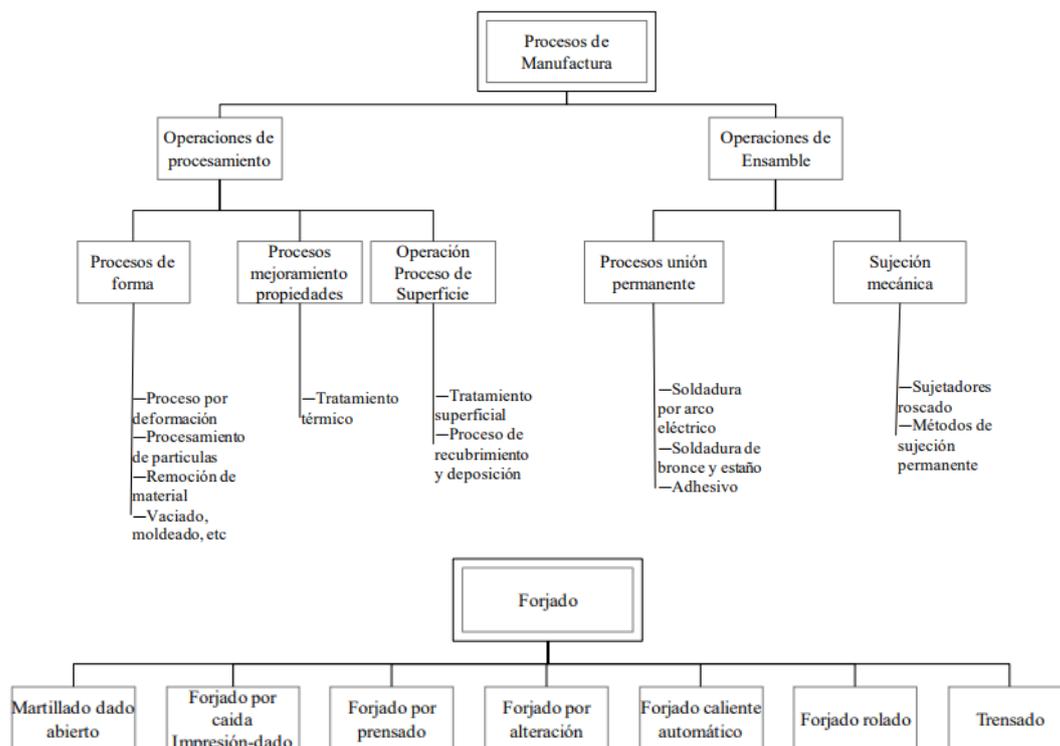


Figura 21 – Diagrama de Procesos de Manufactura Primarios.

Procesos Secundarios

Los procesos secundarios, además de generar la forma principal, forma y refina características de la parte. Estos procesos pueden aparecer al inicio o posteriormente en una secuencia de procesos. Estos incluyen todos los procesos de remoción de material y procesos como maquinado, esmerilado y mandrilado (Figura 22).

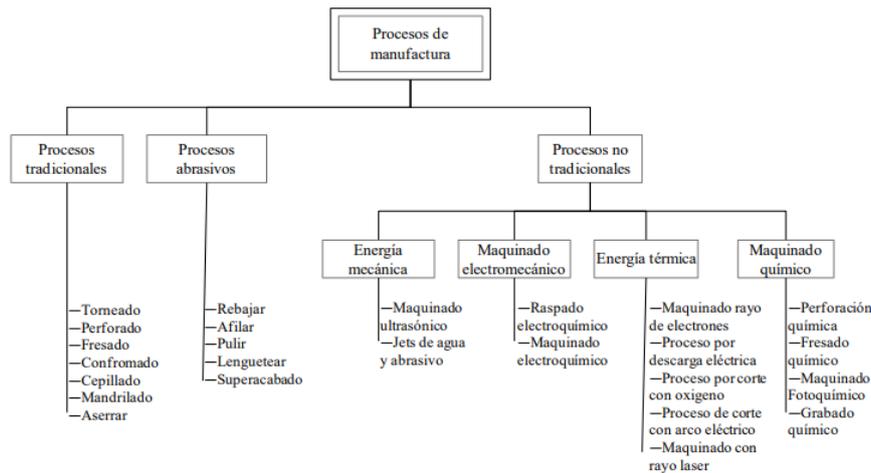


Figura 22 – Diagrama de Procesos de Manufactura Secundarios y terciarios

Maquinado es el proceso de remover material de una pieza de trabajo en forma de rebaba. El término de corte de metal es usado cuando el material es metálico. La mayoría de maquinado tiene muy poco costo de preparación comparado con los procesos de formado, moldeado, y vaciado. Sin embargo, maquinado es mucho más caro para altos volúmenes.

Es comúnmente dividido en las siguientes categorías: Por lo general el corte involucra herramientas de un solo punto o multipunto, cada una con una geometría claramente definida. Los procesos de maquinado no tradicionales utilizan electricidad, química, y fuentes opcionales de energía.

Los procesos de maquinado abrasivo están categorizados en tratamiento superficial y, por lo tanto, son tratados como procesos terciarios (Castaño Meneses, V., 2017).

Procesos Terciarios

Los procesos terciarios no afectan la geometría o forma del componente y siempre aparecen después de uno o más procesos primarios y secundarios. Esta categoría consiste de procesos de acabado, como tratamiento superficial y tratamiento térmico. La selección de un proceso terciario es simplificada porque muchos procesos terciarios afectan solo un atributo de la parte. Figura 22 muestra un resumen de algunos procesos de maquinado abrasivo (ambos tradicionales y no tradicionales) típicos (Castaño Meneses, V., 2017).

2.2 Casos de Estudio.

Un caso de estudio encontrado fue el de Naiju, Warier and Jayakrishnan (2019) que mencionan el diseño de producto como una forma de crear nuevos diseños para diversos productos que venderá una empresa a los clientes. Es muy eficiente ya que ciertos nuevos diseños e ideas pueden llevar a productos con menos costo. Mencionan que la metodología de diseño para fabricación y ensamblaje (DFMA) incluyen diseño para fabricación (DFM) que se concentra en reducir el número de piezas redundantes para facilitar la fabricación y también diseño para ensamblaje (DFA) que se concentra en reducir el tiempo de ensamblaje de las piezas incluidas en el diseño del producto. También ayuda a reducir la ineficiencia y el desperdicio en el diseño del producto.

El documento desarrollado por ellos, incluyó un caso de estudio sobre la estimación de los costos de fabricación y montaje de un carrito de compra que se utiliza ampliamente en supermercados y grandes almacenes de todo el mundo. El objetivo principal de ese documento era reducir el costo general de fabricación del carrito de compras utilizando la metodología de DFMA en la cual cumplieron exitosamente su objetivo.

El segundo caso de estudio presentado es el de Harlalkaa, Naijua, Janardhananb y Nielsen (2017), mencionan que para reducir el tiempo y los costos involucrados en el desarrollo del producto es muy importante mantenerse competitivo en el mercado. El Diseño para Fabricación y Ensamblaje (DFMA) es un marco de reducción de costos para que los diseñadores evalúen los aspectos de fabricación del diseño de un producto.

El caso de estudio fue sobre un procesador de alimentos en el mercado, en el cual tiene como objetivo demostrar la importancia de la implementación de DFMA en un producto de consumo indio. En esa investigación se identifican diversas oportunidades de reducción de costos en el diseño de un procesador de alimentos fabricado por una empresa de renombre en la India. Usando el estudio DFMA, las ideas de diseño se desarrollan con el objetivo de reducir el costo general de fabricación del producto.

Como resultado de la implementación de DFMA, lograron una reducción general de los costos de 0.25 USD (Dólar estadounidense) y se informó una mejora en el índice de Diseño para ensamblaje (DFA) de 15.99 a 19.93.

Otro caso de estudio encontrado fue por Garcia, Arantes y Loures (2014), en el cual presentan el uso de la aplicación del Método de Diseño para Fabricación y Ensamblaje (DFMA) durante la concepción de un producto espacial. Este enfoque les permitió capturar los requisitos de fabricación y montaje en las primeras fases de desarrollo.

Además, mencionan que DFMA guió los procesos de fabricación y los materiales que rigen la interfaz del Módulo de aletas a la estructura principal del Vehículo de lanzamiento de microsatélite (VLM-1). Los resultados obtenidos utilizando la metodología de DFMA permitió identificar y evitar problemas que generalmente ocurren en la etapa de fabricación y en la fase de ensamblaje, integración y prueba (AIT).

Capítulo 3

3.1 Metodología

El presente proyecto de investigación busca desarrollar un diseño del *Plenum* del *Gulfstream V* que contenga la metodología de DFMA para reducir los defectos de manufactura y mejorar el peso actual sin afectar su funcionalidad, para alcanzar los objetivos específicos del proyecto de investigación se planteó desarrollar una metodología tipo mixta, donde realiza métodos descriptivos basados en entrevistas, así como de experimentación basados en el diseño de modelo y sus validaciones cuantitativas.

3.2 Procedimiento.

El procedimiento utilizado para el desarrollo del proyecto de investigación fue dividido en 5 fases principales en el cual se pretende alcanzar los objetivos específicos planteados en la investigación. El esquema de este procedimiento es mostrado en la Figura 23, donde se presenta las fases y las actividades asociadas a cada una de ellas.

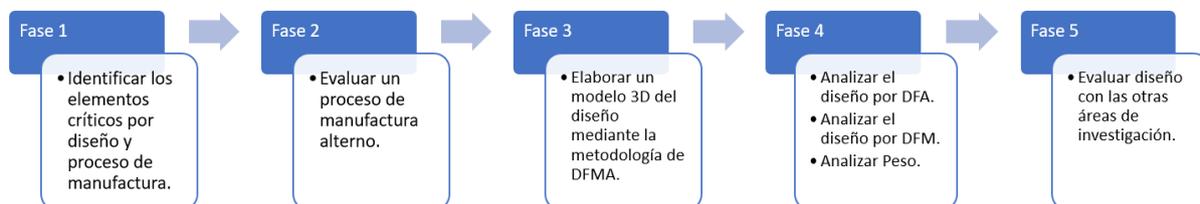


Figura 23 – Secuencia de las Fases de la metodología de este proyecto.
Fuente: Elaboración Propia.

La primera fase consiste en lograr el primer objetivo de la investigación que es identificar los elementos críticos del producto y proceso de manufactura que afecten su calidad mediante un método descriptivo en donde se llevará a cabo entrevistas estructuradas a dos expertos del producto y proceso de manufactura en la cual proporcionan los tipos de defectos más comunes en piso de producción.

La segunda fase consiste en evaluar un proceso de manufactura alternativo que ayude a reducir los defectos de manufactura mediante métodos descriptivos que

ayuden a identificar las ventajas de ser utilizado. Con el fin de identificar esas ventajas, se entrevistará a dos expertos en el diseño y proceso de manufactura ubicados en *Honeywell Aerospace* de Mexicali. También se realiza una investigación basada en literatura para el análisis de los casos de manufactura recomendados.

La tercera fase consiste en elaborar un modelo 3D del nuevo diseño mediante la metodología de DFMA y considerando reducir los elementos críticos del producto y proceso de manufactura actual. Con el fin de elaborar este modelo 3D, se utilizará un *software* de diseño asistido para la computadora (CAD) llamado “NX”.

La cuarta fase consiste en evaluar y analizar si el diseño del *Plenum Gulfstream V* cumple con los principios de DFMA y reduce el peso del diseño actual, esta cuarta fase se desarrollará en 3 partes principales:

- La primera de ellas, se analizará el diseño con respecto a la metodología de DFA mediante una Tabla comparativa cuyo objetivo será determinar si hubo una reducción en los componentes que forman el *Plenum Gulfstream V*, haciendo más eficiente su ensamblaje y reducción de costos.
- La segunda parte de la cuarta fase se analizará nuevamente el diseño, pero ahora con respecto a la metodología de DFM mediante las consideraciones de diseño desde la perspectiva de manufactura.
- La tercera parte de esta fase se desarrollará una Tabla comparativa mostrando el peso del diseño actual y el propuesto teniendo como objetivo estar por debajo del peso actual.

La quinta fase consiste en validar que la propuesta de diseño cumpla con los requisitos de operación de vuelo, costos y su proceso de manufactura mediante los resultados obtenidos de las otras áreas de investigación del proyecto global. De esta manera, se podrá medir el grado de confiabilidad del diseño con respecto al diseño actual y, así tomar una decisión, si el nuevo diseño presentado es la mejor opción para sustituir al diseño actual.

3.3 Plan de trabajo

A continuación, se presenta la planeación en cuanto a tiempos, y entregables para la ejecución del proyecto. En la Figura 24, se muestra el diagrama del plan de trabajo:

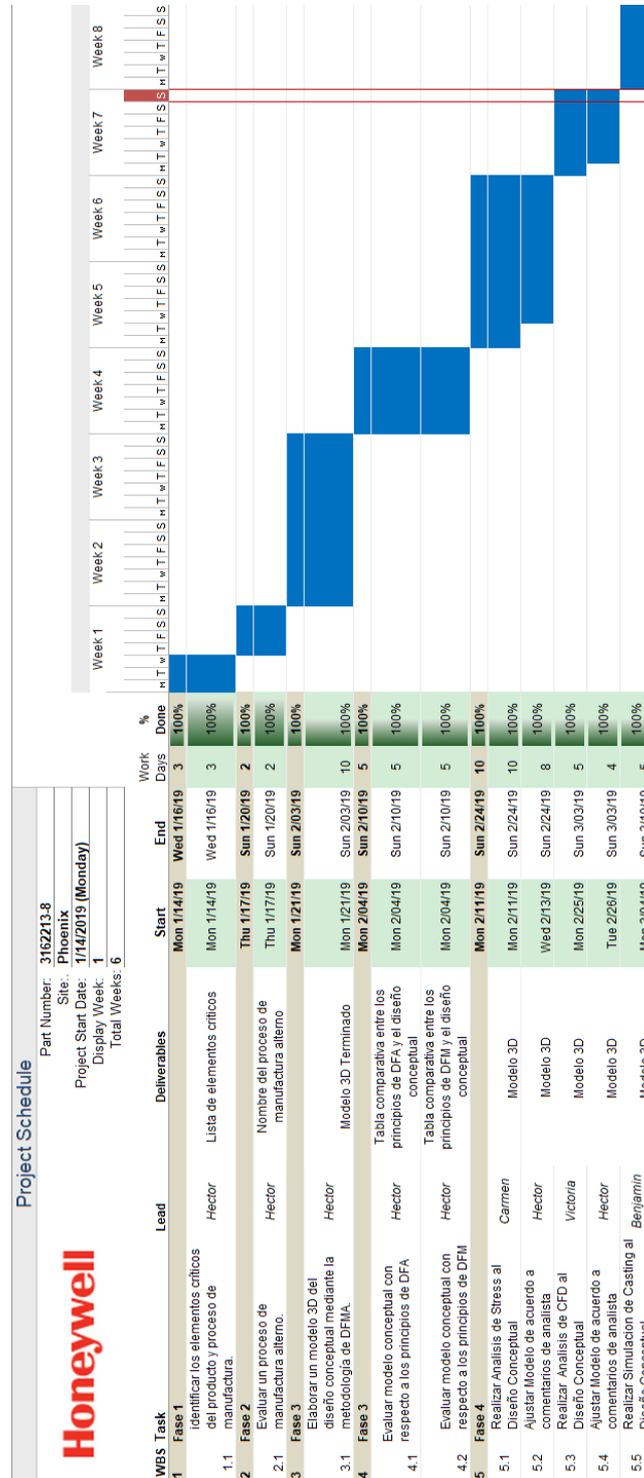


Figura 24 – Diagrama del plan de trabajo
Fuente: Elaboración Propia.

3.4 Recursos

En esta sección se presentan la lista de recursos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

- Metodología de Diseño para la Manufactura y Ensamble.
- Software NX CAD (Diseño asistido por computadora).
- Software Teamcenter (Manejo del ciclo del producto).
- Modelo 3D del diseño actual.
- Expertos del Producto y Proceso de Manufactura.

Capítulo 4

4.1 Resultados

En este capítulo presenta los resultados de la investigación, la cual tuvo como propósito que contenga la metodología de DFMA para reducir los defectos de manufactura y mejorar el peso actual sin afectar su funcionalidad. Para su desarrollo se realizaron 5 fases, entre las cuales se encontró el analizar los elementos críticos del diseño actual, seleccionar un proceso de manufactura alternativo, elaborar un modelo 3D del nuevo diseño que incluya la metodología de DFMA, realizar una Tabla comparativa entre los dos diseños y evaluar el diseño con las otras investigaciones del proyecto final, todo esto en un periodo de 3 meses.

A continuación, se presentan los resultados de acuerdo a la metodología definida en el Capítulo 3, la cual consiste en 5 fases principales.

4.1.1 Fase 1

Esta primera fase tuvo como propósito el identificar los elementos críticos del producto y proceso de manufactura actual que contribuyen al incremento de defectos de manufactura mediante un método descriptivo en cual la recolección de datos fue por medio de entrevistas estructuradas con dos expertos del tema proporcionaron datos cualitativos acerca de los tipos de defectos más comunes en piso de producción.

De acuerdo a estas actividades, en la Tabla 3, se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos recolectados de las entrevistas realizadas a los expertos (Ver Anexo 1). En ella se muestran los elementos críticos más relevantes identificados por diseño y por proceso de manufactura. Los defectos identificados fueron agrupados debido a que las respuestas de los expertos variaban un poco, pero tenían la misma conclusión.

Tabla 3 – Elementos críticos por Diseño y Proceso de Manufactura.
 Fuente: Elaboración Propia.

Defectos por Diseño	Defectos por Proceso de Manufactura
Radios pequeños	Desgaste del Molde es muy rápido
Costillas Estructurales	Mano de Obra no capacitada
Transiciones de superficies	Parámetros del Horno incorrectos

La Figura 25 y Figura 26 muestran una visualización de los defectos por diseño identificados con colores en el cual el color rojo muestra las costillas estructurales, el color azul identifica los radios pequeños y el color amarillo identifica las transiciones de superficies.

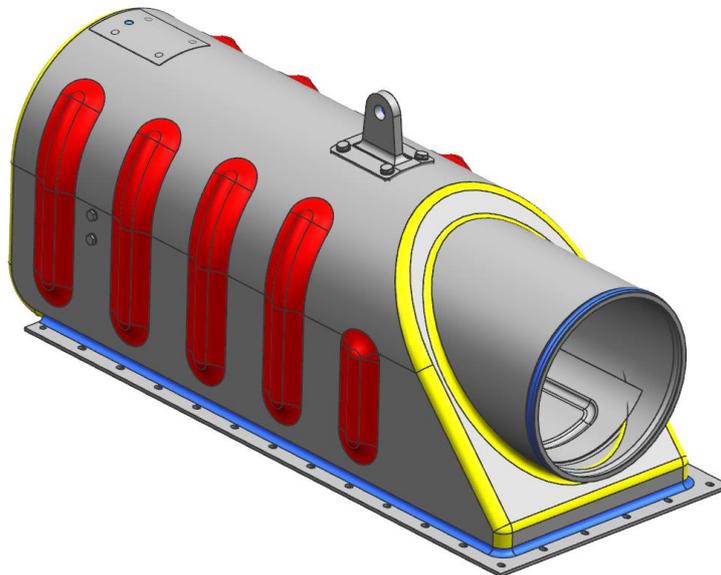


Figura 25 - Vista 1 del diseño actual mostrando elementos críticos.
 Fuente: Elaboración Propia.

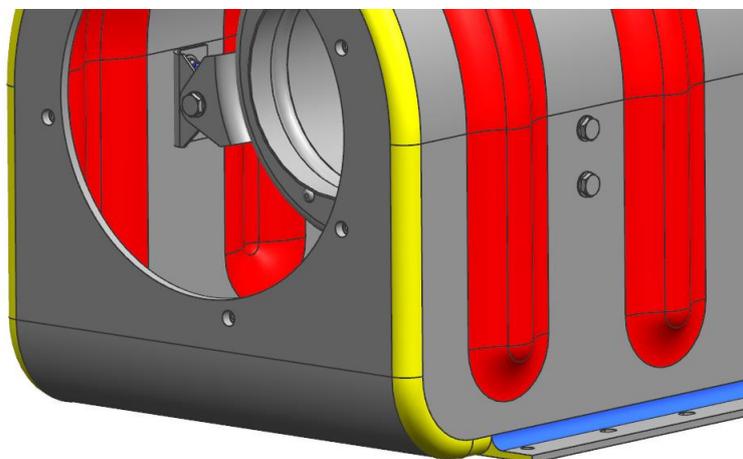


Figura 26 - Vista 2 del diseño actual mostrando elementos críticos.
 Fuente: Elaboración Propia.

4.1.2 Fase 2

El objetivo de esta fase consistió en evaluar un proceso de manufactura alterno que ayude a reducir los defectos de manufactura mediante métodos descriptivos que ayudaron a identificar las ventajas de ser utilizado. Con el fin de identificar esas ventajas, se entrevistó a dos expertos en el diseño y proceso de manufactura ubicados en *Honeywell Aerospace* de Mexicali. También se realizó una investigación basada en literatura para el análisis de los casos de manufactura recomendados.

De acuerdo a las entrevistas, ambos expertos tuvieron la misma conclusión de cambiar el proceso de manufactura actual (Compuestos) al proceso de manufactura de *Investment Casting* y las respuestas sobre las ventajas de utilizar este proceso a comparación del proceso actual, fueron agrupados debido a que los comentarios de los expertos variaban un poco, pero tenían la misma conclusión. De acuerdo a estas actividades, en la Tabla 4 – Ventajas Investment Casting vs Compuestos Tabla 4, se presentan los resultados obtenidos a partir de los datos agrupados de las entrevistas realizadas a los expertos sobre las ventajas del nuevo proceso.

Tabla 4 – Ventajas Investment Casting vs Compuestos
Fuente: Elaboración Propia

Categoría	Investment Casting	Compuestos
Proceso controlado.	Alto	Bajo
Costo de fabricación.	Bajo	Alto
Herramientas de modelo duraderas.	Alto	Bajo
Geometrías complejas y grandes.	Alto	Bajo

Una vez teniendo estos resultados, se hizo una investigación basada en literatura para confirmar y validar los resultados. De acuerdo con Soemardi, T., Suwandi, A., Kiswanto, G., & Kusumaningsih, W. (2016), las ventajas del Investment Casting es la habilidad de generar geometrías complejas e intrincitas de un producto además de ser una tecnología de precisión de fácil aplicación.

Ademas Guler, Kisasoz & Karaaslan (2013) confirman que casting investment es bien conocida por su capacidad para producir piezas fundidas con formas complejas. Las secciones delgadas se producen fácilmente por esta ruta de fundición

debido a la menor conductividad térmica del molde de inversión de cerámica en comparación con las matrices de acero utilizadas en la fundición por compresión.

De acuerdo a esta información recolectada en la literatura podemos validar que lo dicho por los expertos de *Honeywell* es correcto de acuerdo a estas investigaciones ya hechas relacionadas al proceso de *Investment Casting*.

4.1.3 Fase 3

La tercera fase consistió en elaborar un modelo 3D del nuevo diseño mediante la metodología de DFMA y considerando reducir los elementos críticos del producto y proceso de manufactura actual en cual se utilizó un *software* de diseño asistido para la computadora (CAD) llamado "NX".

En la Figura 27 y Figura 28 se muestra el diseño del *Plenum Gulfstream V* desarrollada en el software NX de manera que ayudo a visualizar la integración de componentes externos a la carcasa del nuevo *Plenum* y poderlos unir en una misma pieza por medio del proceso de *Investment Casting* que son mostrados en la Tabla 5 y, además, el material de aluminio A357 fue utilizado debido a que es un material comercial y tiene muy buena relación resistencia-peso para determinar el peso del diseño.

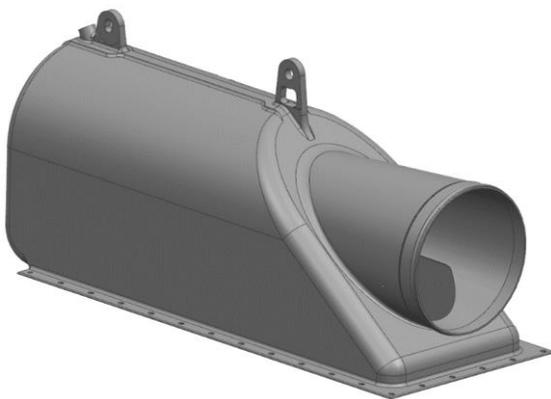


Figura 28 – Vista Isométrica del Modelo CAD de Casting
Fuente: Elaboración Propia.

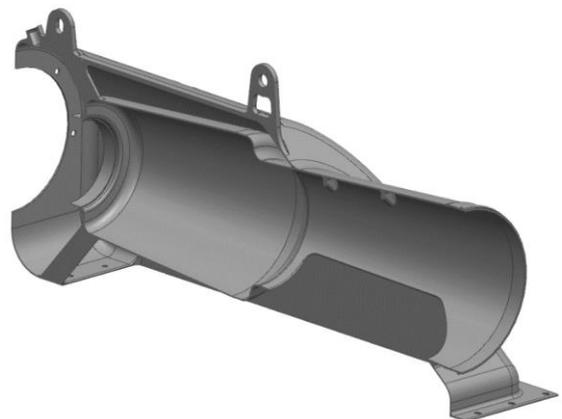
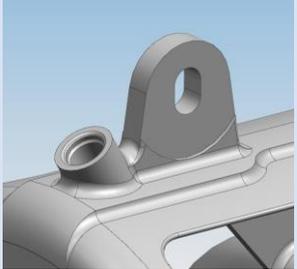
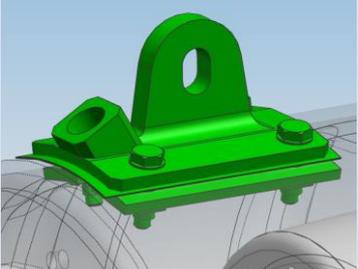
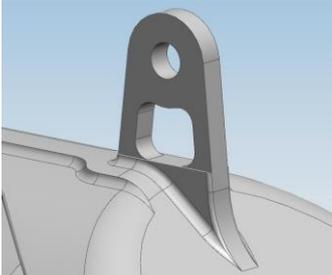
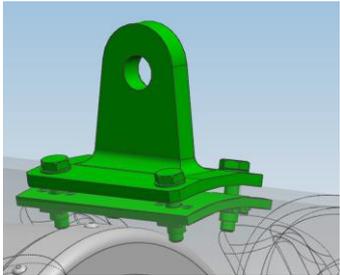
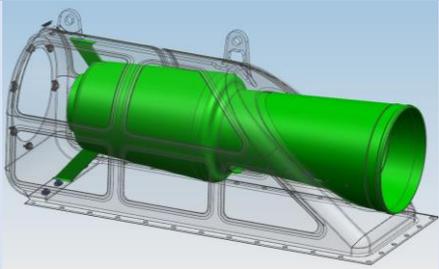
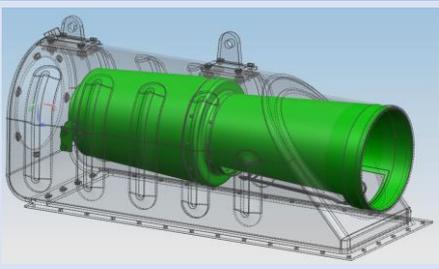
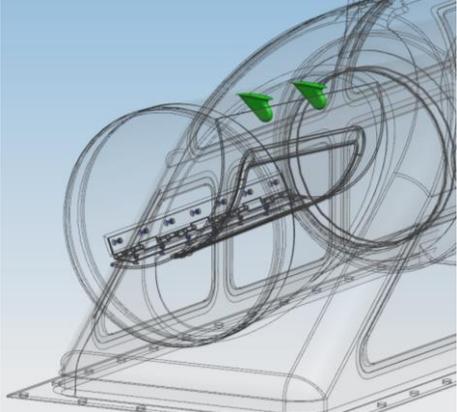
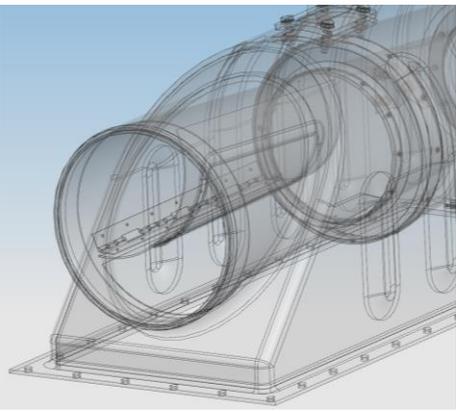


Figura 27 - Vista Seccionada del Modelo CAD de Casting
Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 5 - Componentes Integrados Antes y Despues

Componentes Integrados	Nuevo Plenum (Casting)	Plenum Actual (Compuestos)
Bracket ACM		
Bracket Central		
Carcasa del difusor		
Topes de compuerta		

Fuente: Elaboración Propia

Una vez terminado el modelo 3D, se analizó el peso del nuevo diseño desarrollado en este proyecto en contra del producto actual, y resultó ser mayor e incumpliendo con uno de los objetivos específicos que era reducir el peso. Para resolver ese problema, se agregaron cavidades (Figura 29) alrededor de la carcasa del *Plenum* para reducir peso.

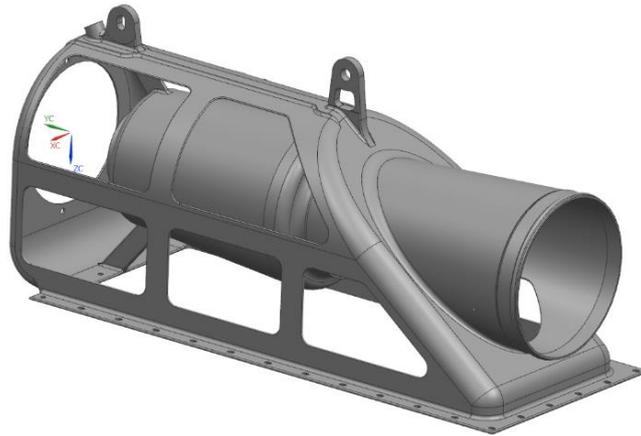


Figura 29 – Plenum con cavidades en la carcasa.
Fuente: Elaboración Propia

Una vez hecha las cavidades en el modelo 3D, se tuvo que utilizar unas hojas de metal de aluminio para cubrir esas áreas y por medio de soldadura de arco eléctrico se unieron a la superficie del casting para cumplir con la funcionalidad del *Plenum* de re-direccionar el aire a una sola salida y, aun así, el peso del nuevo diseño está por debajo del peso actual del producto.

En la Figura 30 se muestra la propuesta final de diseño del *Plenum Gulfstream V* desarrollada en el software NX que fue enfocada a la manufacturabilidad para el proceso de *Investment Casting* e incluyendo los componentes no integrados del producto actual mostrados en la Figura 31. La Tabla 6 muestra el número de componentes integrados en esta propuesta, para el proceso de manufactura del producto final.

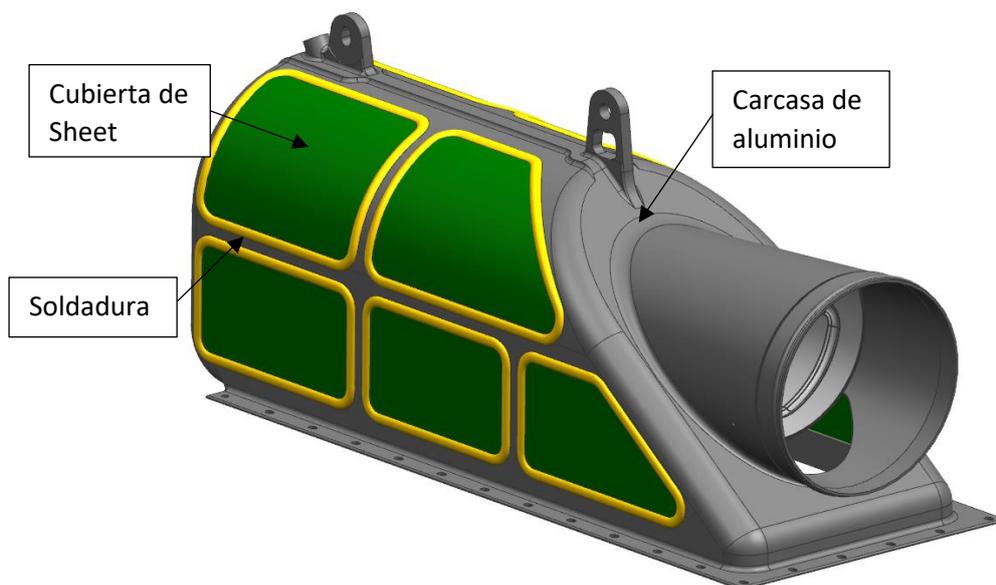


Figura 30 – Vista Isométrica de la propuesta final de Diseño del Plenum Gulfstream V.
Fuente: Elaboración Propia

Tabla 6 – Lista de Componentes no Integrados

ID	Componentes no Integrados
1	Puerta de Difusor
2	Bisagras
3	Placa interna del Difusor
4	Tuercas
5	Remaches

Fuente: Elaboración Propia

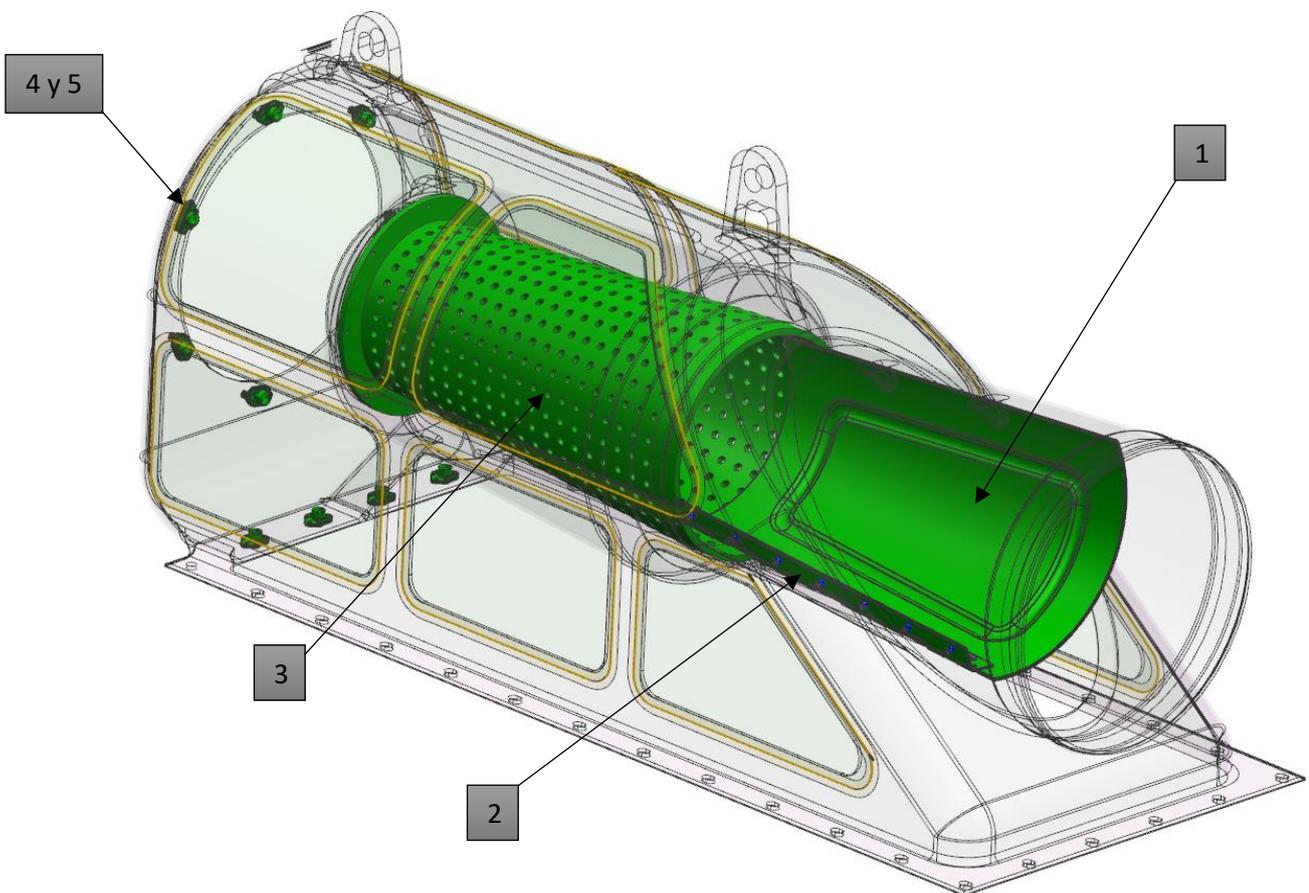


Figura 31 - Componentes no Integrados
Fuente: Elaboración Propia

4.1.4 Fase 4

El propósito de esta fase consistió en evaluar y analizar si el diseño del *Plenum Gulfstream V* cumple con los principios de DFMA y redujo el peso del diseño actual, esta cuarta fase se desarrollará en 2 partes principales:

- La primera de ellas, se analizó el diseño con respecto a la metodología de DFA en el cual los resultados se muestran en la Tabla 7, cuyo objetivo fue determinar si hubo una reducción en los componentes que forman el *Plenum Gulfstream V*, haciendo más eficiente su ensamblaje y reduciendo el costo.

Tabla 7 – Resultados de DFA

	<i>Plenum de Compuestos</i>	<i>Plenum de Casting</i>
Número de componentes	146	75

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar en la Tabla 7, que se obtuvo una reducción considerable de un 49% en el número de los componentes a comparación del producto actual. Esto se debió a la metodología de DFA que orientó analizar en forma sistemática el ensamble del producto con el objetivo de reducir el número de piezas, disminuir tiempo y herramientas de ensamble.

- La segunda parte se analizó nuevamente el diseño, pero ahora con respecto a la metodología de DFM mediante las consideraciones de diseño desde la perspectiva de manufactura utilizando como material el aluminio 6061. Los resultados de este análisis son mostrados en la Tabla 8 de acuerdo con las consideraciones de diseño para el proceso de *Casting* de Sánchez y Cortes (2005).

Tabla 8 - Resultados de DFM
Fuente: Elaboración Propia

Consideraciones de Diseño	Resultado
Espesor de pared Mayor igual a .040"	.090"
Radio del filete Mayor igual a .030"	.030"
Arreglo de costillas escalonadas	Si
¿Se utilizó un espesor uniforme?	Si
¿Se evitó esquinas filosas?	Si
¿Se agregó material de stock para el maquinado?	Si

Se puede observar en esta Tabla, estas consideraciones de diseño forman parte de la metodología de DFM orientada a mejorar la fabricación de piezas analizando geometrías, valores y tolerancias, ayudando a disminuir los costos de fabricación. De esta forma, se garantiza que el diseño tendrá mínimos problemas de manufactura por parte de la configuración del diseño.

- La tercera parte de esta fase se determinó el peso del nuevo diseño por medio del software NX obteniendo un peso menor al peso de diseño actual. La Tabla 9 muestra los pesos del diseño actual, nuevo diseño y la diferencia que hay entre ellos.

Tabla 9 – Tabla Comparativa de Pesos
Fuente: Elaboración Propia

Peso del diseño actual	Peso del diseño 2	Diferencia
12.75 lbs	10.3 lbs	-2.45 lb

Como se puede observar, el peso del nuevo diseño tiene una reducción que representa una mejora en porcentaje del 23% con respecto al modelo original.

4.1.5 Fase 5

El propósito de esta última fase consistió en validar que la propuesta de diseño cumpla con los requisitos de operación de vuelo, costos y su proceso de manufactura mediante los resultados obtenidos de las otras áreas de investigación del proyecto global, las áreas que fueron validadas son: FEA, CFD, Fundición, Costo y Materiales. Los resultados de estas iteraciones son mostrados en la Tabla 10 y el diseño sufrió unas modificaciones con el fin de cumplir con todos los requisitos antes mencionados.

Tabla 10 – Tabla de iteraciones con los procesos de validación

Proceso de validación	Responsable	Iteraciones del Modelo	Resultados
FEA	Martinez (2019)	15 iteraciones	Pasó la validación y los resultados son mostrados por Martinez (2019).
CFD	Romero (2019)	1 iteración	Paso la validación y los resultados son mostrados por Romero (2019).
Fundición	Hernandez (2019)	1 iteración	Paso la validación y los resultados son mostrados por Hernandez (2019).
Costo	Romero (2019)	1 iteración	Paso la validación y los resultados son mostrados por Romero (2019).
Materiales	Hernandez (2019)	1 iteración	Paso la validación y los resultados son mostrados por Hernandez (2019).

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo a la Tabla 10, se puede concluir que el diseño solo tuvo cambios en la iteración con el proceso de validación “**FEA**” debido a que el factor de seguridad del nuevo diseño no cumplía con el valor mínimo de 2.0 para el esfuerzo de cedencia y 2.25 para el esfuerzo ultimo establecido por Martinez (2019). El resto de las validaciones fueron exitosamente cumplidas con solo 1 iteración y debido a esto, el diseño no sufrió ningún cambio.

A continuación, la Tabla 11 y Figura 32 muestran un resumen de los resultados los cambios del proceso de validación del nuevo diseño del *Plenum Gulfstream V*.

Tabla 11 – Resultados del Modelo después de las iteraciones con los procesos de validación

	Sufrió Cambios?	Resultados	Diseño antes de las interacciones	Diseño después de las interacciones
Modelo 3D	Si	Se cambió de configuración soportes de carga para reducir las concentraciones de esfuerzos.	Figura 30	Figura 32
DFA	No	Ningún cambio sufrió	-	-
DFM	No	Ningún cambio sufrió	-	-
Peso	Si	Se incrementó el peso de la pieza debido a que se agregó material, pero aun así se encuentra por debajo del peso actual.	10.3 lbs	11.08 lbs

Fuente: Elaboración Propia

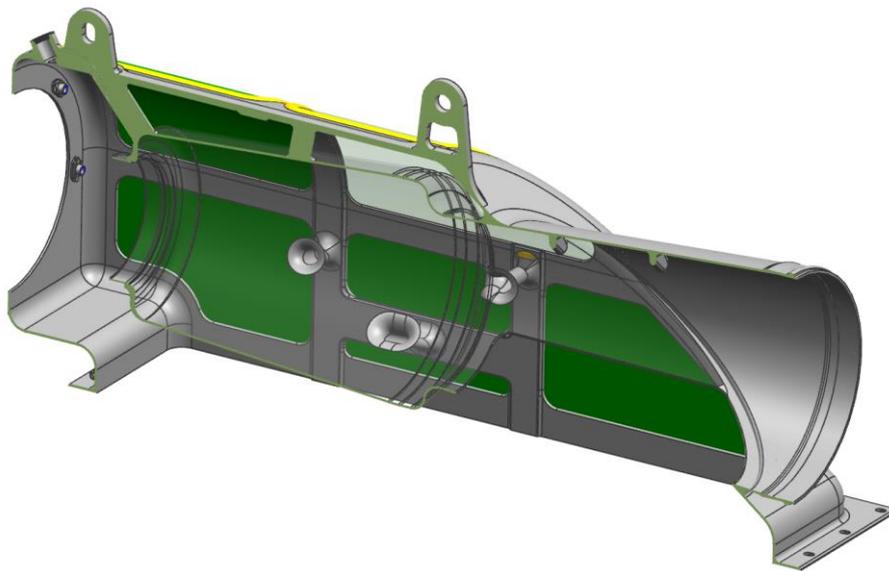


Figura 32 - Diseño Final del Plenum Gulfstream V

Fuente: Elaboración Propia

Como se puede observar, el modelo 3D tuvo varios cambios en la configuración de soportes de carga durante las interacciones con Martinez (2019) debido a que el factor de seguridad no alcanzaba los requerimientos mínimos de los factores de seguridad. En consecuencia, el peso del *Plenum Gulfstream V* fue afectado por el cambio de configuración de los soportes de carga en el cual se tuvo que agregar material para reforzar ciertas áreas.

Capítulo 5

5.1 Conclusiones

Este proyecto estaba enfocado en la problemática que tiene *Honeywell Aerospace* de Mexicali, la cual menciona que el departamento de producción de compuestos está teniendo problemas con el *Plenum del Gulfstream V* debido a la aparición de arrugas y delaminaciones por el diseño y tipo de material, lo cual provoca que tengan que retrabajar hasta 4 veces afectando su rendimiento y entregas al cliente.

Para iniciar con el proceso de investigación se planteó la siguiente pregunta, *¿Cómo desarrollar un nuevo diseño para el **Plenum Gulfstream V** asegurando que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad impartidos por *Gulfstream* y permita mejorar el proceso de fabricación actual?* En la cual, la contribución de este proyecto de investigación, planteó la pregunta de investigación que se muestra a continuación, *¿Cómo mejorar el diseño del **Plenum Gulfstream V** que permita reducir los defectos de manufactura y mejorar el peso actual sin afectar su funcionalidad?*

Con base a la pregunta general del proyecto global de investigación, el cual fue abordado por un equipo dividiéndolo en 5 fases, donde cada fase cuenta con un objetivo general. El objetivo general del proyecto global es el siguiente, la cual fue *desarrollar una propuesta de diseño para el **Plenum Gulfstream V** que cumpla con los requerimientos de peso y funcionalidad, y permita reducir el costo del proceso de manufactura.* De acuerdo al objetivo general del proyecto global, esta investigación que aquí se presentó, aportó el siguiente objetivo de investigación, la cual fue *desarrollar un diseño del **Plenum Gulfstream V** que contenga la metodología de DFMA para reducir los defectos de manufactura y mejorar el peso actual sin afectar su funcionalidad.*

A partir del objetivo general de esta investigación, se plantearon objetivos específicos en el cual se definió una metodología de 5 fases, permitiendo el desarrollo y resultados de este proyecto, todo esto con el fin de ir cumpliendo con cada uno de los objetivos específicos planteados para poder alcanzar el objetivo general.

En la primera fase se buscó [identificar los elementos críticos del producto y proceso de manufactura que afecten su calidad.](#)

Este objetivo se realizó en base a la primera fase planteada en la metodología explicada en Capítulo 3. En esta fase se utilizó un método descriptivo utilizando entrevistas estructuradas a dos expertos del producto y proceso de manufactura en la cual proporcionan los tipos de defectos más comunes en piso de producción.

Estos defectos identificados en las entrevistas, contribuyen a un alto grado de problemas de calidad y entregas a tiempo al cliente. Para ver más detalles, vea Capítulo 4 de este proyecto.

En la segunda fase se buscó [evaluar un proceso de manufactura alternativo que ayude a reducir los defectos de manufactura.](#)

Este objetivo se realizó en base a la primera fase planteada en la metodología explicada en Capítulo 3. En esta fase se utilizó métodos descriptivos que ayuden a identificar las ventajas de ser utilizado.

Las ventajas fueron identificadas por medio de entrevistas y literatura, en cual se tomó una decisión de cambiar el proceso de manufactura a *Investment Casting*, para ver más detalles, vea Capítulo 4 de este proyecto.

En la tercera fase se buscó [elaborar un modelo 3D del nuevo diseño mediante la metodología de DFMA y considerando reducir los elementos críticos del producto y proceso de manufactura actual.](#)

Este objetivo se realizó en base a la tercera fase planteada en la metodología explicada en Capítulo 3. En cual, un modelo 3D fue desarrollado mediante la metodología de DFMA y utilizando un *software* de diseño asistido para la computadora (CAD) llamado “NX”, que ayudaron a reducir los elementos críticos del producto y del proceso de manufactura actual, para ver más detalles, vea Capítulo 4 de este proyecto.

En la cuarta fase se buscó **evaluar y analizar si el diseño del *Plenum Gulfstream V* cumplía con los principios de DFMA y reducía el peso del diseño actual.**

Este objetivo se realizó en base a la cuarta fase planteada en la metodología explicada en Capítulo 3, fue desarrollada en 3 partes principales:

- La primera de ellas, se analizó el diseño con respecto a la metodología de DFA mediante una tabla comparativa cuyo objetivo fue determinar si hubo una reducción en los componentes que forman el *Plenum Gulfstream V*, haciendo más eficiente su ensamblaje y reducción de costos, para ver más detalles, vea Capítulo 4 de este proyecto.
- La segunda parte de la cuarta fase se analizó nuevamente el diseño pero ahora con respecto a la metodología de DFM mediante las consideraciones de diseño haciendo la pieza más fácil de fabricar, para ver más detalles, vea Capítulo 4 de este proyecto.
- La tercera parte de esta fase se desarrolló una Tabla comparativa mostrando el peso del diseño actual y el nuevo diseño, teniendo como objetivo estar por debajo del peso actual, para ver más detalles, vea Capítulo 4 de este proyecto.

En la quinta fase se buscó **validar que la propuesta de diseño cumpla con los requisitos de operación de vuelo, costos y su proceso de manufactura.**

Este objetivo se realizó en base a la quinta fase planteada en la metodología explicada en Capítulo 3. Una vez teniendo los resultados con las otras áreas de investigación, se pudo medir el grado de confiabilidad del diseño con respecto al diseño actual y, así tomar una decisión, si el nuevo diseño presentado es la mejor opción para sustituir al diseño actual, para ver más detalles, vea Capítulo 4 de este proyecto.

En resumen, el cambio de diseño del *Plenum Gulfstream V* utilizando un proceso de manufactura alternativo y la metodología de DFMA se completó exitosamente, logrando la reducción de elementos críticos (Tabla 2), reduciendo el peso (Tabla 8) y el número de componentes (Tabla 6) en comparación al diseño actual, por lo que la hipótesis planteada en este proyecto se cumple satisfactoriamente.

5.2 Recomendaciones

Las recomendaciones que se pueden aportar durante el proceso de realización de este proyecto, es la de tener en cuenta el utilizar metodologías de diseños para la manufactura y ensamblaje con el fin de que un producto mantenga su funcionalidad para la que ha sido desarrollado y, a la vez que su fabricación y ensamblaje resulten fácil y barato, es de suma importancia, seguir una serie de recomendaciones de DFMA para reducir al máximo los defectos que afecten a la fabricación y montaje.

5.3 Conclusión del Proyecto Global

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 14. 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 (área de investigación mostrado en este proyecto), 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 12. Criterios de ponderación de resultados de áreas de investigación para Diseño 1 y 2.

Ponderación	35%	30%	25%	10%
Diseño	Factor de Seguridad (SU)	Peso (libras)	Costo (dólares)	CFD
Diseño 1	2.35	10.6	\$3,093.18	Excede 4 de 4 parámetros
Diseño 2	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 la Tabla 15 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 13. Ponderación de cada diseño designados por área de investigación.

Ponderación	35%	30%	25%	10%
Diseño	Factor de Seguridad (SU)	Peso (libras)	Costo (dólares)	CFD
Diseño 1	26.96%	30%	24.78%	10%
Diseño 2	35%	28.64%	25%	7.5%

Fuente: Elaboración propia.

Asimismo, en la Tabla 16 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 14. Ponderación Total de Diseño 1 y 2.

Diseño	Total
Diseño 1	91.74%
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 17. 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 (en base a esta investigación), 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 \$3,061.94 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 15. Comparación de Resultados para Diseño original y Diseño 2.

Diseño	Factor de Seguridad (SU)	Peso (libras)	Costo (dólares)	CFD
Diseño Original	Desconocido	12.75	5,076.91	Referencia base
Diseño 2	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 exitosamente. 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

- Synnes, E. L., & Welo, T. (2016). Enhancing Integrative Capabilities through Lean Product and Process Development. *Procedia CIRP*, 221-226.
- Castaño Meneses, V., Mital, A., Noriega Morales, S., & Lopez Jaquez, F. (2017). Ingeniería de Manufactura en el siglo XXI [Ebook]. Mexico: Academia de Ingeniería de México. Recuperado de <http://www.ai.org.mx/publicaciones-de-la-aim/ingenier%C3%ADa-de-manufactura-en-el-siglo-xxi>
- Gabriel Arreola, J., López Cano, O., Sánchez Zambrano, C., & Santibáñez, A. (2018). Material didáctico para la enseñanza del diseño para ensamble (Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Eastwood MD, Haapala KR (2015) A unit process model based methodology to assist product sustainability assesment during design for manufacturing. *J Clean Prod* 108:54–64
- Mesa, J., Maury, H., Arrieta, R., Corredor, L., Bris, J. (2018) A novel approach to include sustainability concepts in classical DFMA methodology for sheet metal enclosure devices. *Res Eng Design* 29: 227-244.
- El-Nounu, A., Popov, A. & Ratchev, S. (2018) Redesign methodology for mechanical assembly. *Res Eng Design* 29: 107.
- Fortunet, C., Durieux, S., Chanal, H., Duck, E. (2018) DFM method for aircraft structural parts using the AHP method. *Int J Adv Manuf Technol* 95; 395-308.
- Soemardi, T., Suwandi, A., Kiswanto, G., & Kusumaningsih, W. (2016). (The effect of temperature increase, holding time and number of layers on ceramic shells using the investment casting process). Universitas Indonesia.
- Guler, K., Kisasoz, A., & Karaaslan, A. (2013). The fabrication and characterization of Al/SiC-MMC Casting produced by vacuum assisted solidmould investment casting process (Doctorado). Yildiz Technical University.
- 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.
- Martinez, C. (2019). Rediseño para el *Plenum* del Gulfstream V Análisis de Elemento Finito para *Plenum* del Gulfstream V (Maestría). Centro de Enseñanza Técnica Y Superior.
- 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.

Davila, C. (2019). Rediseño para el *Plenum* del Gulfstream V Propuesta de diseño 1 para el *Plenum* del Gulfstream V (Maestría). Centro de Enseñanza Técnica Y Superior.

Naiju, C.D. & V. Warriar, Pranav & Jayakrishnan, V. (2017). Redesigning of Shopping Cart for Cost Reduction Using DFMA. MATEC Web of Conferences. 95.

Akshay Harlalka, C. D. Naiju, Mukund Nilakantan Janardhanan & Izabela Nielsen (2016) Redesign of an in-market food processor for manufacturing cost reduction using DFMA methodology, *Production & Manufacturing Research*, 4:1, 209-227

Garcia, J., Arantes, A., & Vergueiro, L. (2019). Fins Module Conception of the Microsatellite Launch Vehicle Based on Design for Manufacture and Assembly Method. *Journal Of Aerospace Technology And Management*, (7), 93-100.

Honeywell (2018). TODAY'S HONEYWELL Recuperado de:
<https://www.honeywell.com/who-we-are/overview>

Honeywell Aerospace (2016). ECS *Plenum* Part Family. [Manual de Diseño]. Copia en posesión del autor de este trabajo.

Honeywell (2002). Delta Qualification Test Report. Random Vibration, Operational Shock, and Crash Safety Air Conditioning Pack. Honeywell.