

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

Validación de Fluidos por CFD y estimación de costos

para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería e Innovación

Presenta

Ana Victoria Romero Contreras

Director de proyecto: Dra. Dania Licea Verdugo

Co-director de proyecto: Dr. Juan Ignacio Rodríguez del Prado

Asesor de la Industria: Dr. Nicolás Díaz

Mexicali, Baja California. Marzo 2019.

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Tesis/Proyecto de Ingeniería e Innovación

Proyecto de Aplicación

Rediseño para el *Plenum* del Gulfstream V

Validación de Fluidos por CFD y estimación de costos

para obtener el grado de

Maestría en Ingeniería e Innovación

Presenta

Ana Victoria Romero Contreras

Director de proyecto: Dr. Dania Licea Verdugo

Co-director de proyecto: Dr. Juan Ignacio Rodríguez del Prado

Asesor de la Industria: Dr. Nicolás Díaz

Mexicali, Baja California. Marzo 2019.

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Tesis/Proyecto de Ingeniería e Innovación

Rediseño para el *Plenum* del Gulfstream V

para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería e Innovación

Presenta

Ana Victoria Romero Contreras

Asesor Académico: Dra. Dania Licea Verduzco

Asesor de la Industria: Dr. Nicolás Díaz

Comité evaluador:

Dr. Alan H. Escamilla R.

Dr. Juan I. Rodriguez del P.

Dr. Miguel A. Ponce C.

Mexicali, Baja California. Marzo 2019.

Agradecimientos y dedicatorias

Agradezco primeramente a la Dra. Dania Licea Verdugo por el apoyo brindado durante la realización de este proyecto, así como por asegurar el propio desarrollo del mismo.

De la misma manera me gustaría dar gracias a *Honeywell Aerospace* por darme la oportunidad de estudiar una maestría, despertar mi interés por el diseño y análisis de componentes aeroespaciales y brindarme la oportunidad de aplicar los conocimientos adquiridos durante mis estudios en la mejora de sus productos. A Ahuizotl Arellano, Sayuri Kyoto y Nicolas Díaz por facilitar la información requerida para el desarrollo del proyecto.

A Gibran Neme y Esthibaly Salazar, por todo el apoyo y confianza brindados durante mis estudios de maestría y por ser siempre facilitadores de mi desarrollo profesional y adquisición de conocimiento.

A mis compañeros de trabajo Benjamín Hernández, César Dávila y Héctor Lizárraga por ser partícipes en el desarrollo de este proyecto, facilitar información y conocimiento requerido y brindarme su apoyo siempre que fue requerido al igual que Pedro Peña.

También me gustaría agradecer a mis amigos Carmen Paola Martínez, Leo Sotelo, Kevin Morales y Sebastian Morales por su apoyo, tanto profesional como personal, por sus constantes palabras de aliento y por brindarme la motivación necesaria para concluir esta etapa de mi vida.

Por último, pero no menos importante, me gustaría agradecer y dedicarle este trabajo a mi madre, María Virginia Contreras Barrientos por brindarme la educación que me llevo a ser quien soy y a tener las oportunidades que he tenido hasta el momento, además de brindarme siempre su amor y apoyo incondicional, así como a mi hermana Fernanda Romero Contreras por siempre motivarme y apoyarme a seguir adelante y continuar mi desarrollo profesional y personal.

Carta Institucional

Honeywell Ingeniería y Tecnología Aeroespacial de México
S. de R.L. de C.V.
Calzada del Oro #1755
Colonia Dos División 2
Mexicali, BC. C.P. 21389
México



Mexicali, 20 de marzo de 2019

Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

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

Por medio del presente, hago constar que el proyecto:

“Validación de Fluidos por CFD y estimación de costos”

El cual fue desarrollado por la colaboradora:

Ana Victoria Romero Contreras
Matrícula: 23770

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

ATENTAMENTE



HONEYWELL INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
AEROSPACIAL DE MÉXICO, S. DE R.L. DE C.V.
Calzada del Oro, Lote 7, Parcela 1.2
Periferia Industrial el Vigía CP 21397
Mexicali, B.C. México
HONEYWELL

Dr. Nicolás Díaz
Principal Engineer

Contenido

Lista de abreviaturas	viii
Resumen	ix
Capítulo 1	1
1.1 Introducción	1
1.2 Antecedentes	9
1.3 Justificación Global	13
1.4 Planteamiento del Problema	14
1.5 Descripción del Proyecto Global	18
1.6 Preguntas de Investigación	21
1.7 Justificación Especifica	21
1.8 Objetivo General de Investigación	23
1.9 Planteamiento de Hipótesis	23
Capítulo 2	24
2.1 Marco Teórico	24
2.2 Marco Referencial	32
Capítulo 3	38
3.1 Metodología general	38
3.2 Procedimiento	38
3.3 Planificación	43
3.3.1 Entregables	43
3.3.2 Cronograma	44
3.3.3 Recursos	46
Capítulo 4	47
4.1 Resultados	47
Capítulo 5	86
5.1 Conclusiones	86
5.1.1 Conclusiones Generales del proyecto	86
5.1.2 Aportaciones	87
5.1.3 Limitaciones	87
5.1.4 Recomendaciones	87
5.1.5 Líneas de investigación futuras	88
5.2 Conclusión del Proyecto Global	88

Índice de figuras

Figura 1 Diagrama de las diferentes divisiones dentro de <i>Honeywell</i> .	13
Figura 2 Diagrama de los diferentes rubros que abarca el Sector Aeroespacial en <i>Honeywell</i> .	15
Figura 3 Principales componentes del Sistema de Control Ambiental.	16
Figura 4 Diagrama del proceso de manufactura del Plenum para el Gulfstream V.	17
Figura 5 Modelo 3D actual del Plenum del Gulsftream V.	18
Figura 6 Fase 7, configuraciones de capas en distintas zonas del Plenum .	19
Figura 7 a) Configuración de corte de prepreg anterior. b) Configuración de corte de prepreg actual.	21
Figura 8 Caul plates diseñados para ejercer presión en zonas críticas.	22
Figura 9 Izquierda. Proceso sin utilizar caul plates. Derecha. Plenum utilizando caul plates.	22
Figura 10 Configuraciones de paneles.	23
Figura 11 Rediseño de Plenum de aluminio.	23
Figura 12 Defectos en Diseño actual Plenum GV.	24
Figura 13 Horas trabajadas en Plenum en el periodo de enero a octubre 2018.	26
Figura 14 Porcentaje del costo de los procesos de manufactura para la demanda de Plenum en el 2018.	27
Figura 15 Diagrama para la metodología del Proyecto Global.	30
Figura 16 Gulfstream V ECS	36
Figura 17 Ubicación del APU	37
Figura 18 Air Cycle Machine	38
Figura 19 Plenum fabricado de material compuesto	39
Figura 20 Ducto de estudio	43
Figura 21 Ductos analizados	44
Figura 22 Modelo mallado para CFD	46
Figura 23 Resultados de CFD	46
Figura 24 Mallado del sistema	47
Figura 25 Resultados comparativos	48
Figura 26 Procedimiento y fases del proyecto de aplicación	50
Figura 27 Cronograma	56
Figura 28 Casos considerando APU	59

Figura 29 Casos con velocidad de aire diferente de cero	60
Figura 30 Mallado de diseño original	62
Figura 31 Superficies de interés	64
Figura 32 Dirección de flujo contraria	66
Figura 33 Vectores de velocidad, Caso 1	67
Figura 34 Vectores de velocidad, Caso 2	67
Figura 35 Resultados de presión, Caso 1	68
Figura 36 Resultados de presión, Caso 2	68
Figura 37 Presiones de Salida, Caso 1	69
Figura 38 Presiones de Salida, Caso 2	70
Figura 39 Velocidades de Salida, Caso 1	70
Figura 40 Velocidades de Salida, Caso 2	71
Figura 41 Mallado de Diseño #1	74
Figura 42 Mallado de Diseño #2	76
Figura 43 Vectores de velocidad, Diseño #1, Caso 1	77
Figura 44 Vectores de velocidad, Diseño #1, Caso 2	77
Figura 45 Resultados de presión, Diseño #1, Caso1	78
Figura 46 Resultados de presión, Diseño #1, Caso 2	78
Figura 47 Presiones de salida, Diseño #1, Caso 1	79
Figura 48 Presión de salida, Diseño #1, Caso 2	80
Figura 49 Velocidad de salida, Diseño #1, Caso 1	80
Figura 50 Velocidad de salida, Diseño # 1, Caso 2	81
Figura 51 Vectores de velocidad, Diseño #2, Caso 1	82
Figura 52 Vectores de velocidad, Diseño #2, Caso 2	82
Figura 53 Resultados de presión, Diseño 2, Caso 1	83
Figura 54 Resultados de presión, Diseño 2, Caso 2	83
Figura 55 Presiones de salida, Diseño #2, Caso 1	84
Figura 56 Presión de salida, Diseño #2, Caso 2	85
Figura 57 Velocidades de salida, Diseño #2, Caso 1	85
Figura 58 Velocidades de salida, Diseño #2, Caso 2	86
Figura 59 Presiones Máximas de Salida, Caso 1	87
Figura 60 Presiones Mínimas de Salida, Caso 1	87

Figura 61 Velocidades Máximas de Salida, Caso 1	88
Figura 62 Presiones Máximas de Salida, Caso 2	89
Figura 63 Presiones Mínimas de Salida, Caso 2	89
Figura 64 Velocidades Máximas de Salida, Caso 2	90

Índice de tablas

Tabla 1 Costos de manufactura del <i>Plenum</i> actual y costos estimados de manufactura por fundición.	28
Tabla 2 Entregables	54
Tabla 3 Parámetros iniciales	61
Tabla 4 Condiciones de frontera de aproximación	62
Tabla 5 Valores de salida	69
Tabla 6 Modelos 3D para CFD	72
Tabla 7 Presiones de Salida, Diseño #1	79
Tabla 8 Presiones de Salida, Diseño #2	84
Tabla 9 Análisis de valores encontrados	91
Tabla 10 Costos Actuales (2018)	92
Tabla 11 Porcentajes de inflación	93
Tabla 12 Costos cotizados	94
Tabla 13 Costos de producción	94
Tabla 14 Costos Estimados	95

Lista de abreviaturas

Abreviatura

MRTC

Mexicali Research and Technology Center

ISC

Integrated Supply Chain

CFD

Computational Fluid Dynamics

MN

Minnesota

ECS

Environmental Control System

ACM

Air Cycle Machine

APU

Auxiliary Power Unit

MS&C

Mechanical Systems and Components

PSE

Product Support Engineering

AME

Advanced Manufacturing Engineering

RPM

Revoluciones por minuto

MIG

Metal Inert Gas

TIG

Tungsten Inert Gas

3D

Tridimensional

Significado

Resumen

En este trabajo se presenta el proyecto realizado para obtener el grado de maestro en Ingeniería e Innovación con LGAC en Diseño y Sistemas de Manufactura y Área de énfasis en Diseño Aeroespacial, donde se logró el objetivo de Validar y evaluar mediante un análisis de fluidos que las geometrías de los diseños propuestos para el **Plenum** del Gulfstream V cumplan o superen los valores esperados en cuanto a presión, flujo másico y velocidad del fluido que a su vez permita reducir el costo de fabricación con respecto al actual, para lo cual se llevaron a cabo 6 Fases y un total de 17 actividades, de las cuales destaca la validación de los diseños propuestos mediante un análisis de CFD en el que se encontró que las propuestas de diseño cumplen y mejoran la función del **Plenum** con respecto al diseño actual y el cambio de diseño representa un ahorro estimado de \$2,122.77 dólares por pieza producida, lo cual representa el 39.68% del costo actual.

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*”).

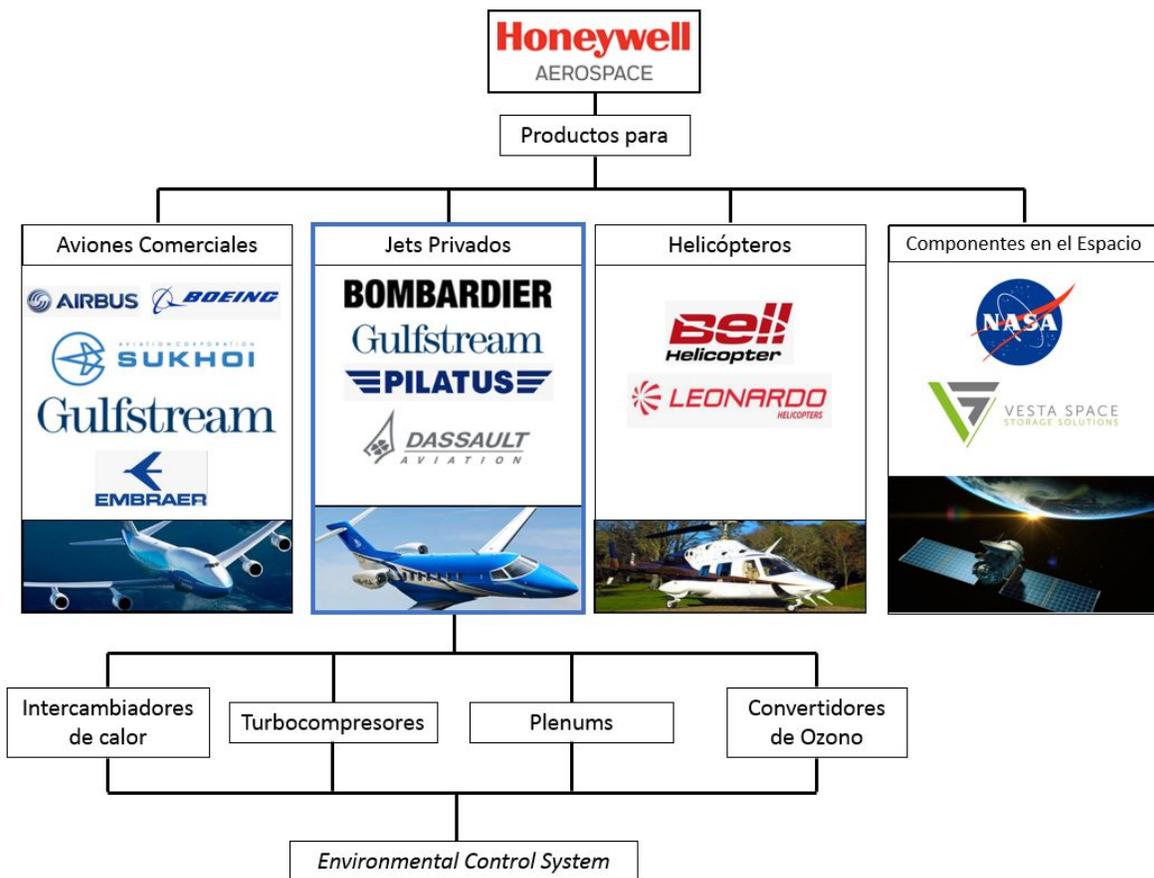
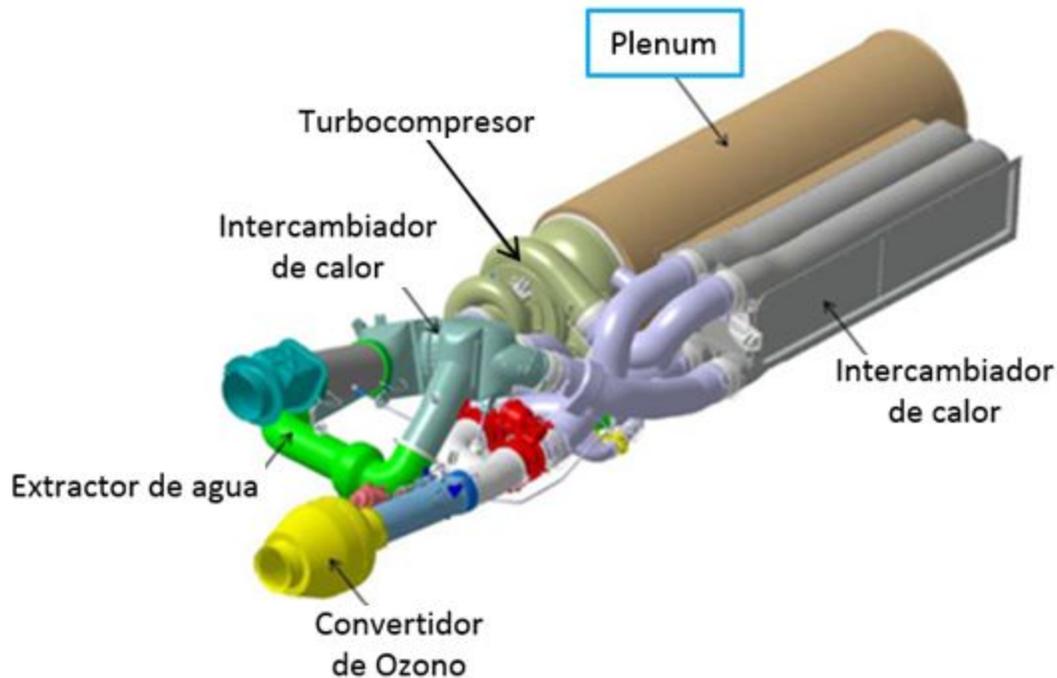


Figura 2 Diagrama de los diferentes rubros que abarca el Sector Aeroespacial en Honeywell.

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: Elaboración propia, basado en Honeywell (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.

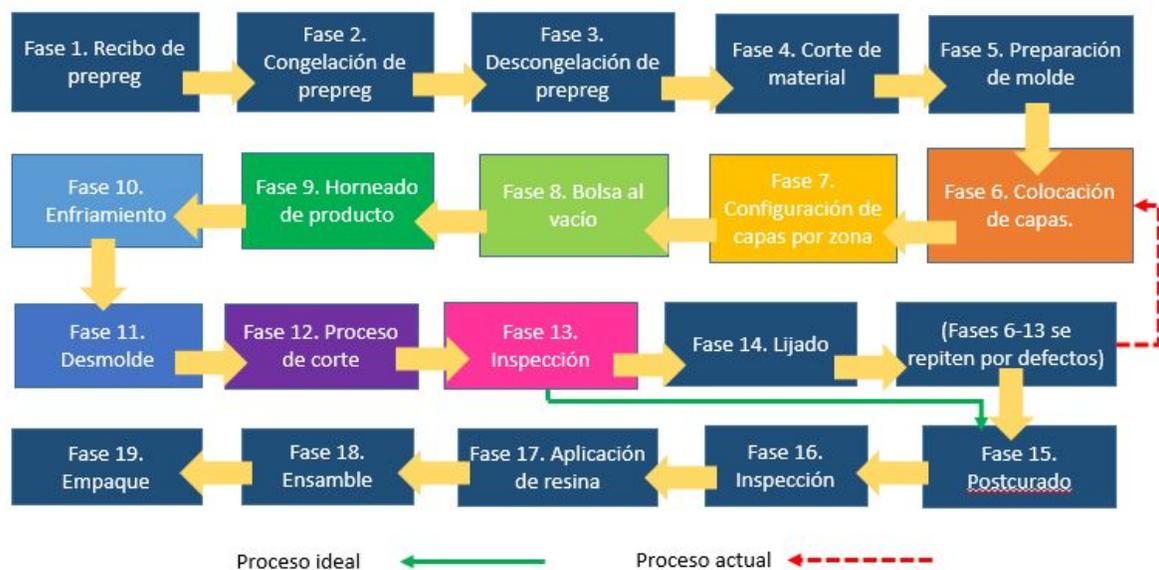
En la Figura 4, se muestra el diagrama del proceso de manufactura actual para el **Plenum**, el cual consta de 19 Fases que se explican a continuación.

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.

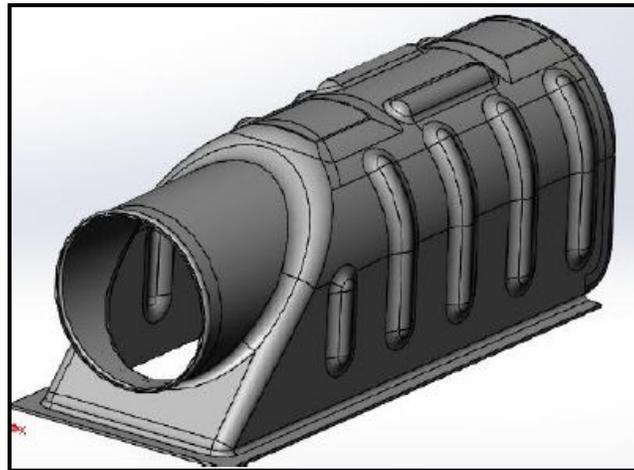
Fase 2: Congelación de *prepreg*. En esta fase se prepara el material *prepreg* para su almacenamiento temporal, introduciéndolo al congelador a una temperatura de -15°F .

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.



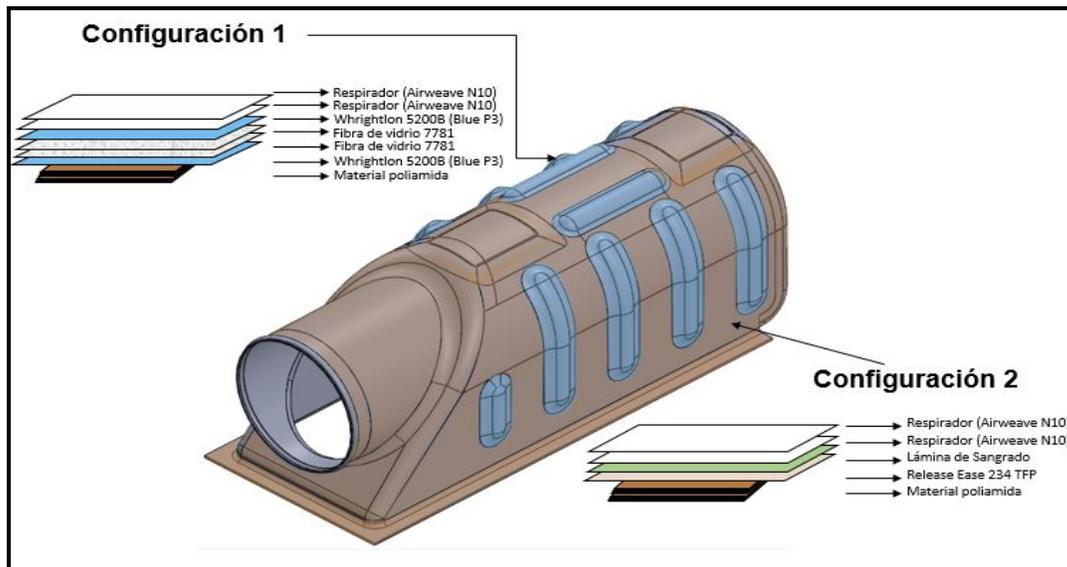
Fase 5: Preparación del molde. En esta fase acondiciona el molde a ser utilizado. Para ello se cuenta con dos tipos de molde de aluminio que tiene la forma del producto: uno hueco y otro sólido. Un ejemplo se muestra en la Figura 5. Para su preparación, el molde hueco se cubre con una cinta especial 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.



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 *Whrightlon 5200B*. Después dos capas de fibra de vidrio, otra capa más de *Release Film* perforado y finalmente dos capas de una tela blanca “respirador” o *Airwave N10*.
- En la zona de la superficie café en la imagen (Configuración 2), se coloca otra capa de *Release Ease 234 TFNP*, una capa de *Bleeder Lease* o “capa de sangrado” y finalmente dos capas de “respirador” o *Airwave N10*.



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.

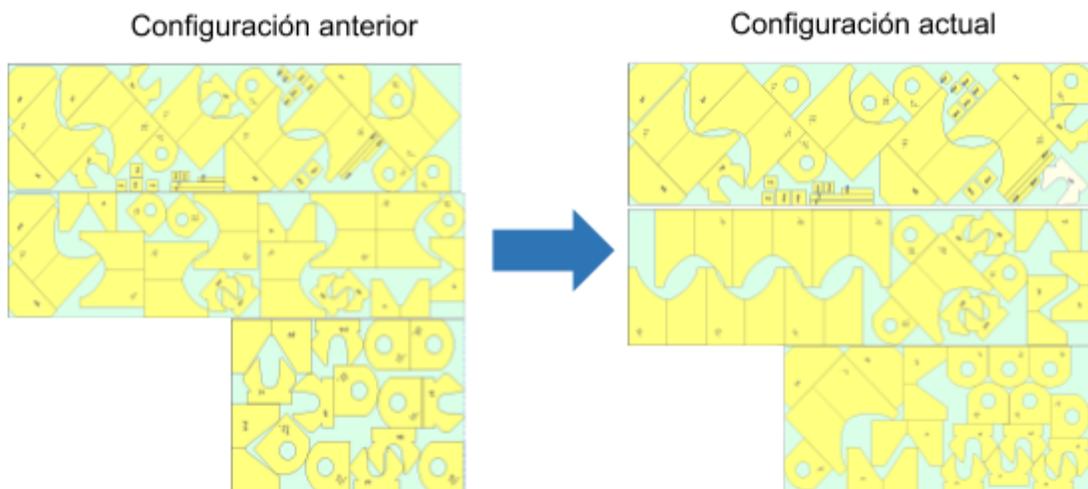
Fase 19: Empaque. El producto se empaqueta y se transporta a la planta de Torrance donde será ensamblado con otros componentes.

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.

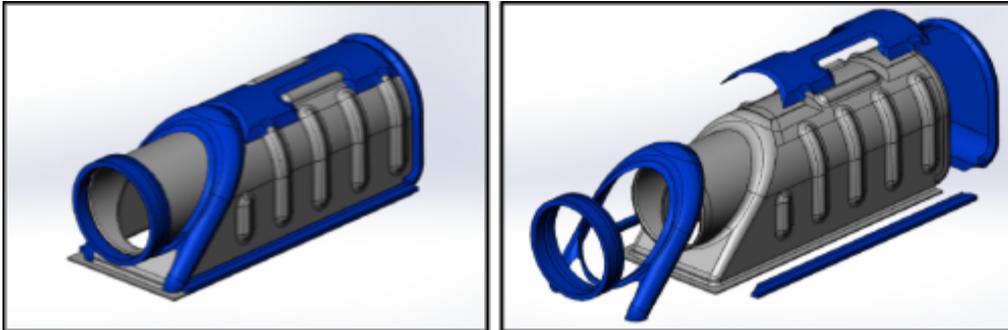
1.2 Antecedentes

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.



- 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.

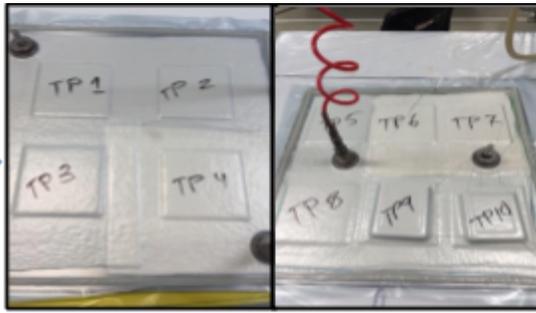


- Estudios de mejor distribución de capas: En total se realizaron 10 configuraciones de paneles de capas distintos (Figura 10), para conocer cuál arreglo evita la extracción de resina del *prepreg* y cómo mejorar la calidad de las

capas. Con este estudio se pudieron determinar las configuraciones necesarias para la zona del **Plenum**, como se indicó en la Figura 3.



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

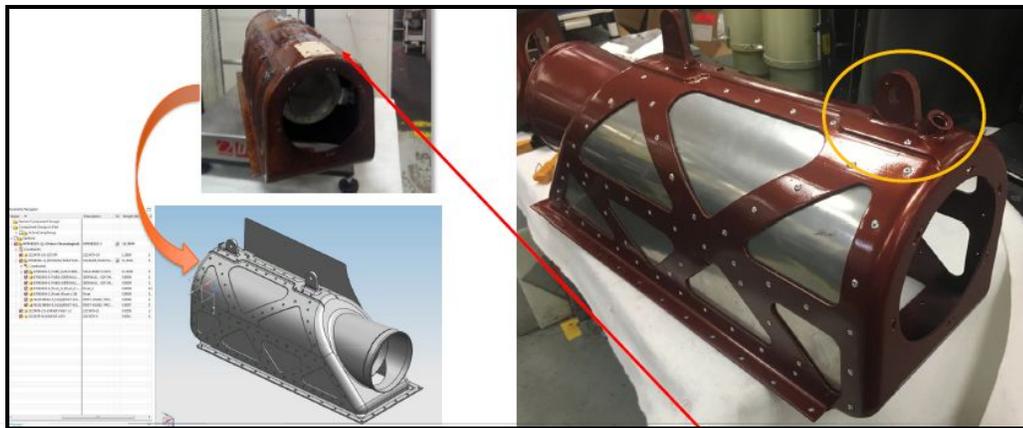


Paneles antes del Proceso de curado.



Paneles después del proceso de curado.

- 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.

Con base en 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 Global

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

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

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



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

Con los resultados obtenidos de este proyecto, la compañía pretende disminuir el número de reprocesos en el producto, así como el tiempo y los costos que éstos generan. Además, al cambiar el diseño, el material y el método de manufactura, se abre la posibilidad de explorar nuevos procesos para diferentes productos que presentan el mismo tipo de defectos.

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

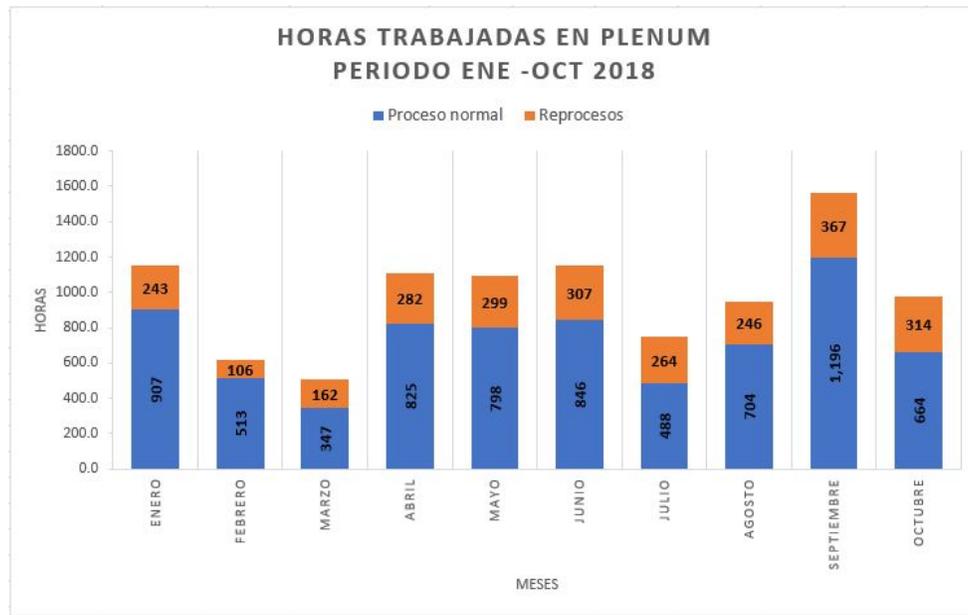
1.4 Planteamiento del Problema

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

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

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

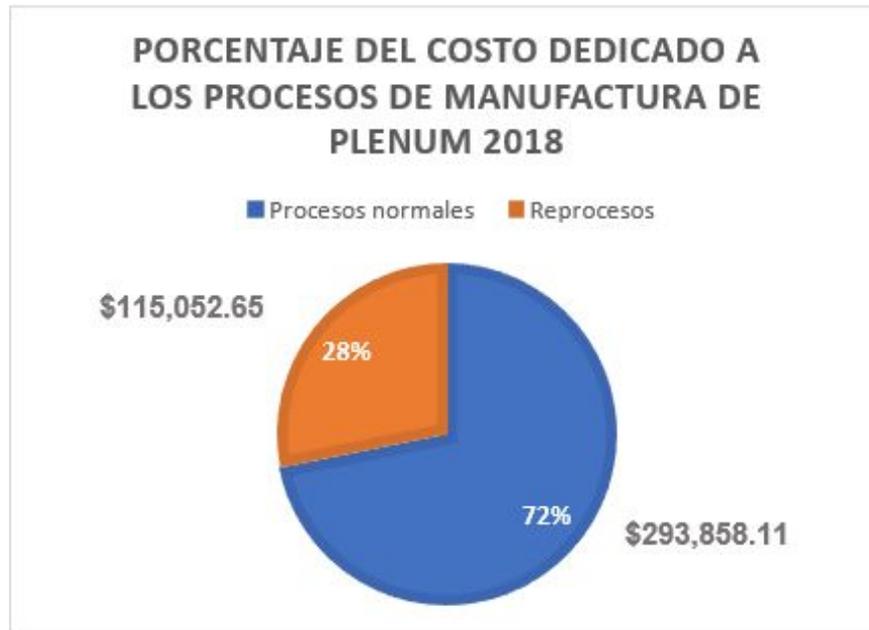
dedicadas a reprocesos al mes, las cuales representan el 26% de las horas totales de enero a octubre del total de **Plenum** fabricados.



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 Figura14.

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.



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.

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

Fuente: obtenido de documentación Honeywell.

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

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

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

1.5 Descripción del Proyecto Global

Pregunta Global de Investigación

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

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

Objetivo Global

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

El objetivo general del proyecto global es el siguiente:

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

Estrategia General de Solución

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

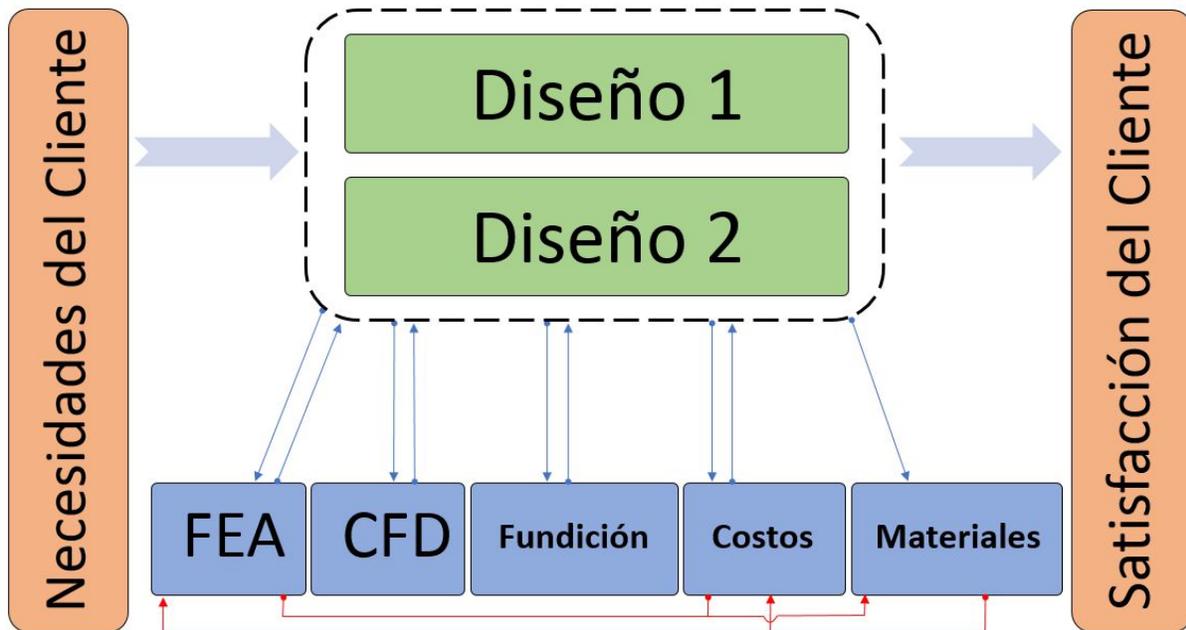


Figura 15 Diagrama para la metodología del Proyecto Global.
Fuente: Elaboración Propia

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 retro alimentaciones de los procesos de análisis de elemento finito, inspire cast, Análisis de materiales, Análisis CFD y costos tomando en cuenta el cumplimiento de los requerimientos de cada uno de estos procesos para obtener un modelo con una topología que reduzca peso, costo de fabricación y cumpla las especificaciones de desempeño requeridas por el sistema de control ambiental.

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

Análisis de Elemento Finito [FEA]: En esta parte del proceso, se realizan cálculos con las cargas que reaccionan en el *Plenum*. Posteriormente, se analizan las propuestas de diseño en 3D del Gulfstream V, mediante un software de análisis. En él, se introducen parámetros de presión y temperatura que experimenta el *Plenum* durante operación. Finalmente, con los resultados de los análisis, se brindan recomendaciones a los diseñadores para reforzar el *Plenum*, o bien, para disminuir su peso. Con los nuevos diseños, se realizan iteraciones de análisis hasta encontrar la propuesta que mantenga un balance entre peso y factor de seguridad.

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

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

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

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

1.6 Preguntas de Investigación

Pregunta Específica

De acuerdo con las actividades del proyecto desarrolladas y plasmadas en este trabajo, se plantea la siguiente pregunta específica de investigación:

- ¿Cómo asegurar que el diseño del **Plenum** del Gulfstream V cumpla o supere los valores esperados en cuanto a presión, flujo másico y velocidad del fluido que a su vez mejore el costo de fabricación con respecto al actual?

Problemática

- ¿Cuáles son los valores o los rangos que debe cumplir el diseño del **Plenum** del Gulfstream V en cuanto a presión, flujo másico y velocidad del fluido?
- ¿Cuáles son los valores de presión, flujo másico y velocidad del fluido en los nuevos diseños del **Plenum** del Gulfstream V?
- ¿Qué impacto tiene el rediseño del **Plenum** del Gulfstream V en los valores de salida de presión, flujo másico y velocidad del fluido con respecto a los valores actuales?
- ¿Cuál es el costo actual de producción del **Plenum** del Gulfstream V?
- ¿Cuáles son los proveedores en la región que tiene la capacidad de fabricar el nuevo diseño del **Plenum** del Gulfstream V que ofrecen un precio más competitivo?
- ¿Qué impacto económico tiene el cambio de proceso de fabricación del **Plenum** del Gulfstream V para *Honeywell*?

1.7 Justificación Específica

Las áreas de enfoque de este trabajo son el análisis de fluidos y evaluación de costos del proceso de fabricación.

El propósito de realizar un análisis de fluidos es el de evaluar y validar que el cambio de geometría y materiales en el diseño del **Plenum** del Gulfstream V, mantiene los valores de presión, temperatura y flujo másico dentro del rango esperado, debido a que este es un proyecto de mejora y rediseño de un producto actual de *Honeywell*, es esperado que el **Plenum** del Gulfstream V tenga como mínimo el mismo desempeño que el diseño actual y asegure una reducción de costos de producción anual a la

compañía, razón por la cual la evaluación de costos juega un papel muy importante en este proyecto.

Mediante la identificación de un nuevo material y la validación del nuevo diseño para el **Plenum** del Gulfstream V, se busca atacar una de las prioridades de *Honeywell* que es la reducción de defectos, pero el cambio de material también tiene un impacto ecológico y social, ya que el material compuesto utilizado actualmente no es reciclable, mientras que el nuevo modelo se espera sea de un material ecológico y reciclable, por lo cual este proyecto sería desarrollado con un sentido de responsabilidad civil y con conciencia ecológica para nuestra comunidad y el resto del mundo.

Cómo se mencionó anteriormente, el departamento beneficiado con este cambio de material y proceso de fabricación será el de compuestos, debido a la complejidad y defectos recurrentes, este componente conlleva mucho tiempo de producción que podría ser dedicado a otros números de parte que se fabrican en este mismo departamento.

El realizar un análisis de fluidos a los nuevos diseños como parte del proceso de validación, beneficia al proyecto ya que da completa certeza de que el nuevo componente diseñado cumple con los requerimientos y exigencias por parte del sistema durante el vuelo, tomando en cuenta las condiciones de presión y temperatura reales más críticas de vuelo.

Personalmente, cómo ingeniera de diseño para el departamento de pruebas representa para mí un reto y una gran oportunidad el estar involucrada en el rediseño de un producto ya que es algo completamente diferente a las actividades que realizo diariamente en mi puesto de trabajo. Cómo colaboradora de *Honeywell* es muy importante para mí tener una mayor exposición a los productos de la compañía, y estar trabajando directamente con el **Plenum** del Gulfstream V es una muy buena oportunidad para conocer no solo el **Plenum** y su funcionamiento, si no todo el sistema de control ambiental (ECS).

Académicamente, las áreas de diseño y Materiales son de gran interés para mí, y el poder realizar el análisis de fluidos para observar el comportamiento del fluido dentro

del **Plenum** después de los rediseños y evaluar las diferencias en el costo de material y del proceso de fabricación, da la apertura para en un futuro seguir mis estudios académicos en alguna de esas áreas.

1.8 Objetivo General de Investigación

Objetivo General

A partir de la pregunta específica de investigación, se plantea el siguiente objetivo:

- Validar y evaluar mediante un análisis de fluidos que las geometrías de los diseños propuestos para el **Plenum** del Gulfstream V cumplan o superen los valores esperados en cuanto a presión, flujo másico y velocidad del fluido que a su vez permita reducir el costo de fabricación con respecto al diseño actual.

Objetivos Específicos

- Calcular los rangos de valores que debe cumplir el diseño del **Plenum** con respecto al diseño actual del Gulfstream V en cuanto a presión, flujo másico y velocidad del fluido.
- Calcular los valores de presión, flujo másico y velocidad del fluido en los nuevos diseños del **Plenum** del Gulfstream V.
- Determinar el impacto del rediseño del **Plenum** del Gulfstream V en los valores de salida de presión, flujo másico y velocidad del fluido con respecto a los valores esperados.
- Investigar el costo actual de producción del **Plenum** del Gulfstream V
- Identificar a los proveedores en la región que tienen la capacidad de fabricar el diseño del **Plenum** del Gulfstream V con el precio más competitivo.
- Calcular el impacto económico que tiene para *Honeywell* el cambio de proceso de fabricación del **Plenum** del Gulfstream V.

1.9 Planteamiento de Hipótesis

Mediante un análisis de fluidos, se puede validar que el diseño del **Plenum** del Gulfstream V cumple los valores esperados de presión, flujo másico y velocidad del fluido.

Es posible encontrar un proceso de fabricación que mejore el precio actual del **Plenum** del Gulfstream V que cuente con proveedores locales.

Capítulo 2

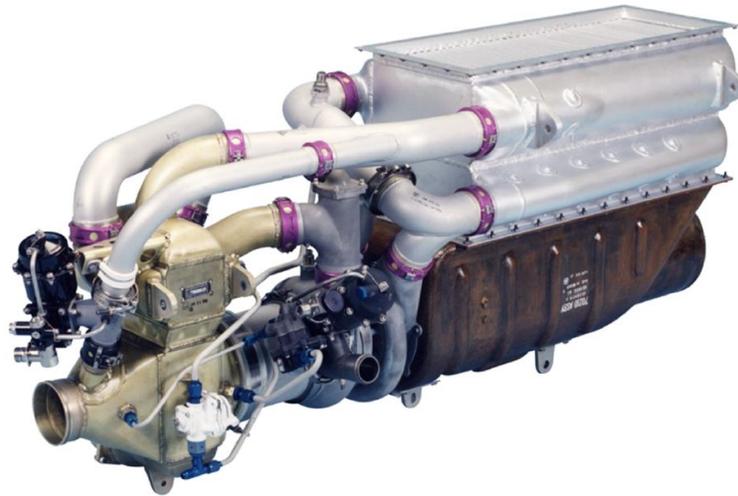
1.1 Marco Teórico

Este proyecto contempla contribuir con la validación de fluidos de los nuevos diseños del **Plenum** del Gulfstream V y la cotización de costos de producción de los nuevos diseños tomando en cuenta el proceso de fabricación seleccionado, para ello en esta sección de revisión de literatura, se presenta conceptos, teorías y casos de estudio.

El propósito de realizar un análisis de fluidos es el de evaluar y validar que el cambio de geometría y materiales en el diseño del **Plenum** del Gulfstream V, mantiene los valores de presión, temperatura y flujo másico dentro de un rango aceptable que no afecte su funcionalidad.

Para comprender en su totalidad el siguiente trabajo, es importante saber ¿qué es el Sistema de Control Ambiental (ECS)?, ¿dónde se encuentra ubicado el **Plenum** dentro de este sistema? y ¿cuál es su función?

El ECS del Gulfstream V, mostrado en la Figura 16, es el sistema encargado de monitorear y suministrar aire a una temperatura, presión y humedad adecuada a la cabina, áreas de carga y sistemas del avión, además de proveer protección anti Hielo en las superficies de control del avión. Este sistema debe ser capaz de proveer el control del aire bajo cualquier circunstancia de vuelo o condiciones climatológicas exteriores. El aire que utiliza este sistema viene de sistemas interiores como son los motores y exteriores como es el aire “Ram”, que se obtiene utilizando el movimiento del avión y la diferencia de presión.



*Figura 16 Gulfstream V ECS
Fuente: Honeywell Aerospace (2018)*

El ECS puede operar impulsado por dos sistemas, los motores del avión y el Auxiliary Power Unit "APU". El APU provee aire por medio de bombas neumáticas y electricidad al avión y el ECS puede operar con esta fuente de aire y energía hasta los 15,000 ft de altura. Esta unidad se encuentra ubicada en la parte trasera del avión, como se puede observar en la Figura 17 y opera por combustión interna, similarmente a un motor de propulsión, pero con la diferencia de que esta unidad no provee fuerza de impulso al avión, la energía que produce es transformada mediante el torque de una flecha conectada a un generador eléctrico y una serie de compresores que convierten la energía calorífica en energía neumática.

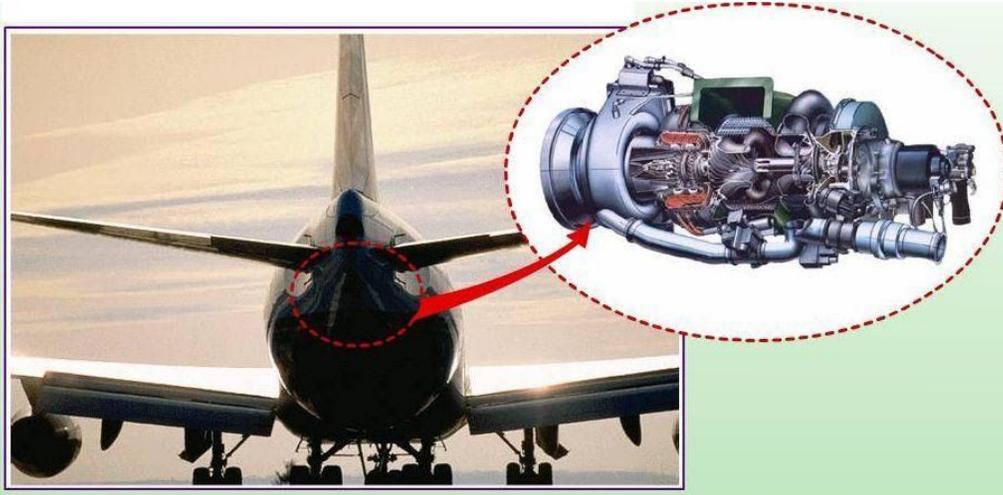


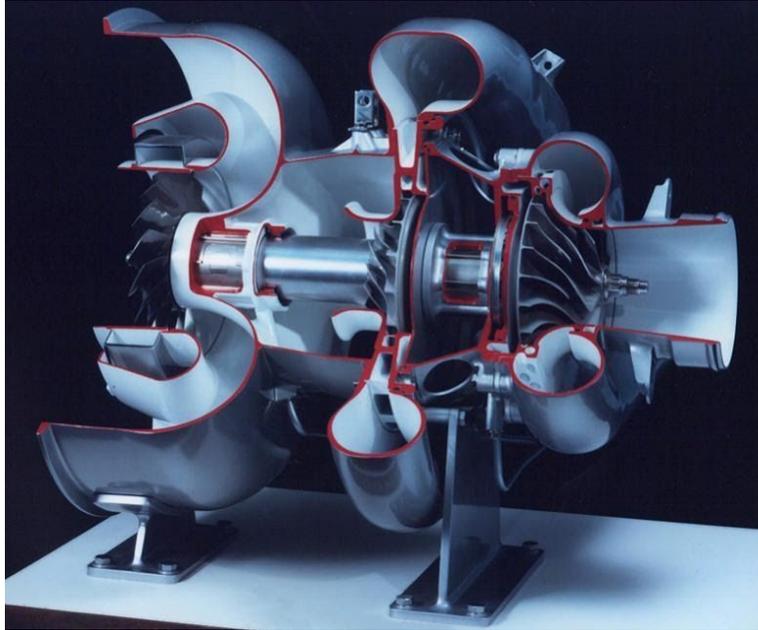
Figura 17 Ubicación del APU
Fuente: Honeywell Aerospace (2018)

El **Plenum**, consta de dos cavidades importantes, el housing y el difusor. La función del **Plenum**, es extraer el aire que no será recirculado en el sistema de control ambiental y liberarlo al ambiente, además de asegurar que cuando el avión está en tierra, el 100% del aire extraído sea succionado por el abanico del ACM y direccionado al difusor para reducir el ruido que produce el aire al pasar por la unidad con ayuda del silenciador del difusor.

El **Plenum** se encuentra conectado con los intercambiadores de calor primario y secundario y con el abanico del “Air Cycle machine”, como se puede observar en la Figura 18.

El Air Cycle Machine “ACM” es un sistema de alta rotación que tiene tres secciones conectadas por una flecha común, su propósito es suministrar aire enfriado al sistema de aire acondicionado del avión, por medio de expansión rápida.

En la Figura 18 podemos observar los componentes del Air Cycle Machine, que son de izquierda a derecha, el housing del abanico, el abanico, el housing y sección de compresión y después el housing y sección de turbina. También se observa en esta figura que, a pesar de ser un solo sistema, las cavidades del abanico, compresor y turbina funcionan de manera aislada.



*Figura 18 Air Cycle Machine
Fuente: Honeywell Aerospace (2018)*

El **Plenum** actual es fabricado con un material compuesto de matriz polimérica reforzado con fibras de vidrio, mostrado en la Figura 19, por lo cual es importante hablar de los materiales compuestos, ¿cómo son?, ¿cuáles son sus características?, ventajas y desventajas con respecto a los demás materiales.

Un material compuesto es una combinación de dos o más materiales diferentes unidos de manera heterogénea, es decir que es distinguible la presencia de más de un material y, por lo tanto, sus propiedades no son las mismas en todo su volumen. Estos materiales se pueden encontrar en la naturaleza como la madera o los huesos, pero la gran mayoría de los materiales compuestos utilizados actualmente son diseñados y fabricados por el hombre para cumplir con una tarea específica.

Algunas de las características que hacen estos materiales tan populares son su ligereza, rigidez, resistencia al impacto, a la corrosión y al desgaste.

Los materiales compuestos tienen dos componentes principales que son la matriz y el refuerzo.

La matriz tiene como función principal el transmitir las cargas aplicadas al refuerzo, depende de las características de la matriz la capacidad que posee el material compuesto para ser conformado con formas geométricas complejas, también en muchas ocasiones, la matriz determina la resistencia al impacto ya que detiene la propagación de las fisuras, así como las propiedades eléctricas, químicas y térmicas del compuesto.

El refuerzo, por otro lado, como su nombre lo dice, agrega a la matriz alguna propiedad que no posee, usualmente incrementa la resistencia y rigidez mecánica, pero en otras ocasiones puede mejorar las propiedades térmicas y abrasivas del material.



*Figura 19 Plenum fabricado de material compuesto
Fuente: Obtenido de documentación de Honeywell*

Una de las grandes desventajas de los materiales compuestos que se busca atacar con este proyecto es que, con el cambio de material a uno diferente de compuesto, viene el cambio de proceso de fabricación del **Plenum**, ya que la fabricación actual de los componentes de compuesto en *Honeywell* es totalmente manual, lo que da lugar a variaciones, errores y por tanto retrabajos debido al error humano y la imprecisión del proceso.

De acuerdo a lo planteado por Hernández, B., Lizárraga, H., Dávila, C. (2019), los procesos de manufactura identificados para la fabricación de las propuestas de Diseño #1 y #2, se definen a continuación:

1. Remachado: Es un método de unión no permanente, que se utiliza para unir materiales iguales o diferentes. Consiste en barrenar ambas partes del ensamble e insertar un “remache” por el orificio de ambas partes, posteriormente se deforma en frío el remache y la deformación provoca que las piezas permanezcan unidas hasta que el remache se removido.

2. Soldadura: Es el un proceso de unión permanente de metales iguales o diferentes, con ayuda de calor, presión, material de aporte, etc.

Existen distintos tipos de procesos de soldadura que se dividen en métodos que requieren de presión para realizar la unión y los que no requieren presión.

Dentro de los que requieren presión se encuentra la soldadura por fricción, por corriente eléctrica y reacción química. En los que no requieren presión, está la soldadura por gas y arco eléctrico. Dentro de la soldadura por gas, las más comunes son “Tungsten Insert Gas” también conocida como soldadura T.I.G y “Metal Insert Gas” conocida como M.I.G.

3. Maquinado: Es un proceso de remoción de material con el cual se busca dar una dimensión o acabado específico a una pieza. Existen distintos tipos de maquinados para lo cual se utilizan distintas máquinas y herramientas. Algunos de los más comunes son el barrenado, fresado y torneado. La mayor diferencia entre estos procesos, es que en el barrenado y fresado, la herramienta mantiene un movimiento rotatorio y perpendicular con respecto a la pieza, mientras que, en el torneado, la pieza mantiene un movimiento rotatorio y es la herramienta la que es movida axial y perpendicularmente con respecto a la pieza.

4. Corte: Proceso en el que se logra la separación de un material por medio de cuchilla, sierras o discos formados de partículas abrasivas.

En esta categoría también se incluyen cortes especiales como el láser, agua o plasma.

Es la operación mediante la cual una pieza que tiene su forma y dimensiones definidas, es separada del resto del material por medio de herramientas o maquinaria.

5. Doblado: Es un proceso de deformación utilizado principalmente en metales. Consiste en aplicar fuerza a un material de bajo espesor con el fin de que adquiera una forma ya sea angular, circular, etc.
6. Fundición y Moldeo: Es un proceso de fabricación que consiste en la fundición de un material, usualmente metales o plásticos, que posteriormente será inyectado o vertido en un molde con el fin de obtener una geometría final. Usualmente se utiliza en conjunto con maquinado debido a la poca precisión dimensional de este proceso.
7. Anodizado: Es un proceso de recubrimiento aplicado a ciertos metales con el fin de proporcionar protección contra la abrasión y corrosión. Consiste en una capa de óxido del metal al que se le aplica que varía su espesor dependiendo de la clase y tipo de anodizado utilizado.

Teorías

Cómo se ha mencionado anteriormente, parte del desarrollo de este trabajo se basa en un análisis de fluidos computacional “CFD”, este análisis se realizó con ayuda del software ANSYS y la herramienta CFX; esta herramienta ofrece análisis de fluidos computacional de alto desempeño y con soluciones confiables y precisas para un rango de aplicaciones de las cuales destaca la maquinaria rotativa.

Para el desarrollo de un análisis asistido por computadora, es importante recordar que el software resuelve el modelo ingresado de acuerdo con los parámetros y tipo de análisis definido por el usuario.

Para este análisis se utilizaron las siguientes ecuaciones y leyes fundamentales:

Ecuaciones de Navier-Stokes que se utilizan para calcular el campo de flujo y se muestran a continuación:

$$\nabla \cdot (\rho u) = 0$$

$$\nabla \cdot (\rho u u) = -\nabla p + \rho g + \nabla \cdot \mu \nabla u - \nabla \cdot (\overline{\rho u' u'})$$

Para la predicción del campo de temperatura, el módulo considera la ecuación de entalpia:

$$\nabla \cdot (\rho u h) = - \nabla \cdot \lambda \nabla T$$

El modelo utilizado para los análisis de fluidos que se presenta en este trabajo es conocido como $k - \varepsilon$, o modelo de turbulencia, este modelo se basa en la aproximación de Boussinesq que busca tratar las variaciones de densidad debido a las variaciones de temperatura en un fluido. En el modelo $k - \varepsilon$, el estrés de Reynolds que nos habla sobre el momentum de un fluido y sus fluctuaciones de turbulencia es aproximado con la siguiente ecuación:

$$\overline{\rho u' u'} = \mu_T \nabla u - \frac{2}{3} \rho k \delta$$

Donde, μ_T representa la viscosidad turbulenta o viscosidad de Eddie:

$$\mu_T = C_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Anderson (2001), define presión, densidad, temperatura, velocidad de flujo y flujo másico de la siguiente manera.

- Presión: Es la fuerza normal por unidad de área ejercida sobre una superficie debido al cambio de momento en las moléculas que impactan la superficie.

$$P = \frac{F}{A}$$

- Densidad: Masa por unidad de volumen.
- Temperatura: Nivel de energía térmica de un punto, es directamente proporcional a la energía cinética de las moléculas de un fluido.
- Velocidad de flujo: se define como la velocidad de un elemento infinitesimal de un fluido al pasar por un punto fijo.
- Flujo másico: Cantidad de masa por unidad de tiempo que pasa por un punto fijo. También se puede obtener de multiplicar la densidad por la Velocidad del fluido en un punto.

$$\dot{m} = \rho V$$

1.2 Marco Referencial

En esta sección, se presentan distintos casos de estudio realizados en los últimos años, en los cuales se ha perseguido un fin similar al perseguido por este trabajo de investigación y por lo tanto sirven como base para la definición y realización de este proyecto.

Xu P., Jiang H., Zhao X., (2016), realizaron una investigación en la que se analizó el ducto de salida de aire de un motor de gasolina, mostrado en la Figura 20, con el fin de conocer su comportamiento y asegurar que cumple con su función de extracción de aire. Para este análisis se utilizó SolidWorks Flow Simulation, software para análisis de fluidos basado al igual que el utilizado en este trabajo (ANSYS CFX) en las ecuaciones de Navier Stokes, Reynolds y el modelo de turbulencia $k - \epsilon$.

Los parámetros utilizados para este análisis fueron, velocidad de entrada del fluido, presión ambiente a la salida del ducto y temperatura fija de 293 K.



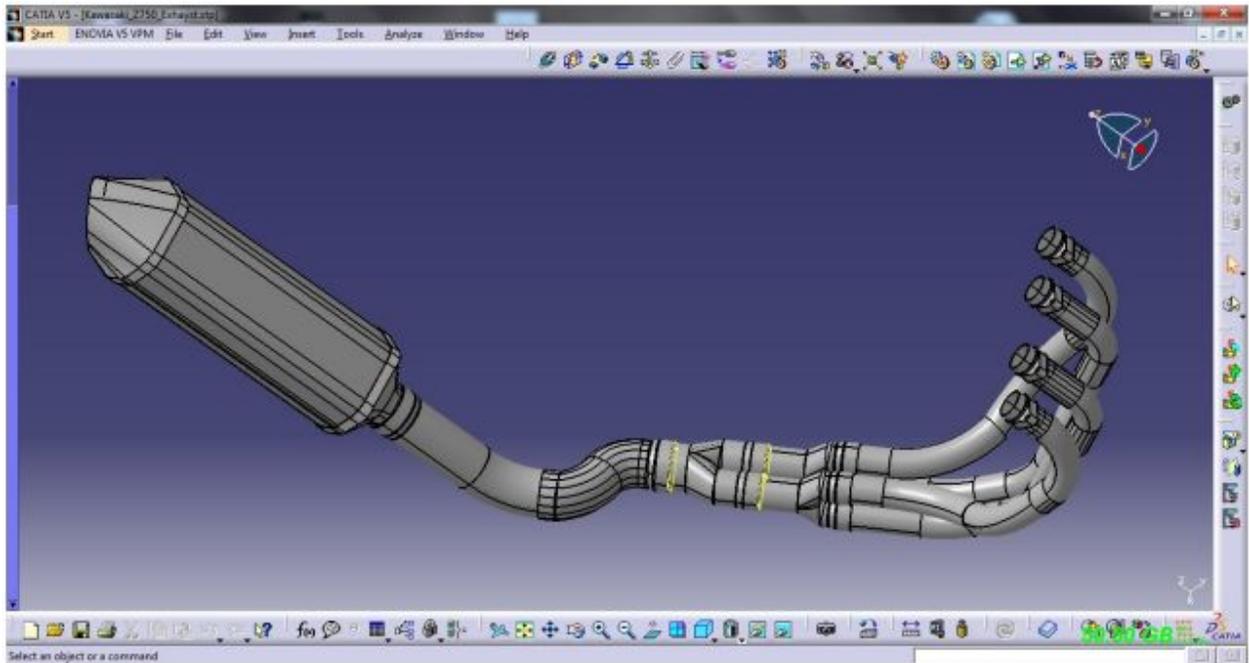
*Figura 20 Ducto de estudio
Fuente: Xu P., et al. (2016)*

Las zonas de interés de este estudio se encuentran a la entrada del catalizador y la posición del sensor de oxígeno, lo que se busca en estas zonas es evitar las turbulencias y así asegurar la correcta función de ambos componentes.

Xu P., et al. (2016), encontraron que, durante el trascurso del aire dentro del ducto de extracción, la velocidad del flujo aumenta, por tanto, la presión disminuye. El aumento en la velocidad mantiene un número de Reynolds menor a 2000, por lo que el fluido se considera laminar. También se encontró que la localización del sensor de oxígeno es la

adecuada ya que, de acuerdo con los requerimientos de diseño, debía estar en el área principal de flujo.

Similar a Xu P, et al. (2016), Teja M.A., Ayyappa K, Anusha P (2016), realizaron una investigación en la que se busca analizar los ductos de un colector de escape automotriz mostrados en la Figura 21.



*Figura 21 Ductos analizados
Fuente: Teja M.A, et al. (2016)*

Para el análisis realizado por Teja M.A, et al., se definieron parámetros de temperatura y presión a la entrada y salida del sistema de ductos, además de flujo másico también a la entrada. El fluido fue considerado como gas ideal y se utilizó el modelo de turbulencia $k - \epsilon$.

Con el uso de FLUENT, se analizaron varios casos que representaron diferentes velocidades del motor, traducidos como diferentes entradas de flujo másico al sistema. Se analizó a 1200, 1300, 1400 y 1500 rpm.

Con respecto a los cambios de velocidad y flujo másico, se obtuvieron y compararon los valores de presión, velocidad y turbulencia, con lo que se pudo concluir que el fluido

se frena en las áreas de cambio de dirección, que existen varias zonas con presiones diferentes a lo largo del ducto, lo que significa que el fluido no se está desarrollando como se espera y la geometría debe ser modificada.

En ambos de los casos mencionados anteriormente, se realizó únicamente validación de fluidos, pero similar a lo realizado en este proyecto global, Yen, Z., Zhien, L., Wang, X., Zheng, H., (2014) validaron un ducto colector de escape en el área de fluidos y en el área estructural, al validar el comportamiento del aire de escape y la resistencia a los esfuerzos tanto de la estructura del colector de escape como de las interfaces con el sistema.

Para el área de validación de fluidos, Yen, Z., et al. (2014), se enfocaron en la distribución de la temperatura del flujo dentro de componente mostrado en la Figura 22, ya que este componente es el responsable de transmitir la temperatura del aire de escape a los siguientes sistemas y debido a que el aumento en el rendimiento de un motor tiene como consecuencia el incremento de las temperaturas de escape, Yen, Z., et al. (2014), buscaron observar el comportamiento térmico del fluido para relacionarlo con el comportamiento estructural y optimizar el diseño. Para lo que aplicaron una malla hexaédrica como se muestra en la Figura 22, además se consideró un fluido compresible y el modelo de turbulencia $k-\varepsilon$ mencionado y utilizado en ambos casos anteriores.

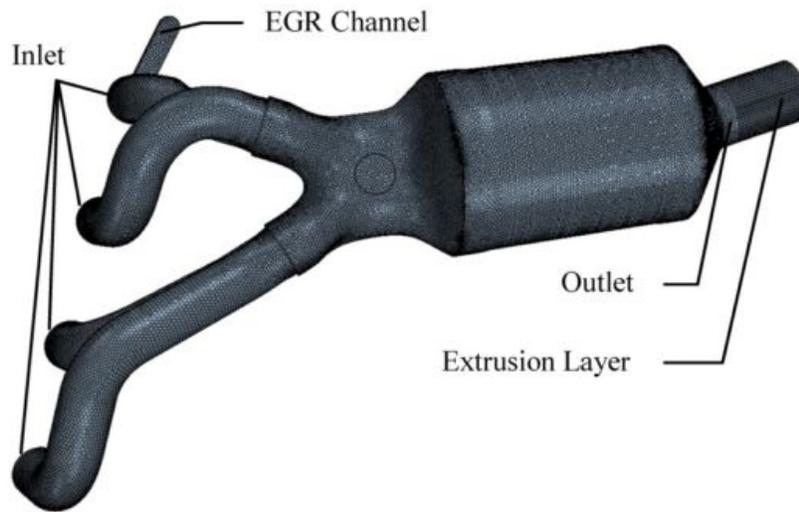


Figura 22 Modelo mallado para CFD
Fuente: Yen, Z., et al. (2014)

Como producto de este análisis, se obtuvieron los resultados de la Figura 23, donde se observa que el coeficiente de transferencia de calor alcanza un máximo de $420.17 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ y que la temperatura máxima alcanzada es de 1120 K.

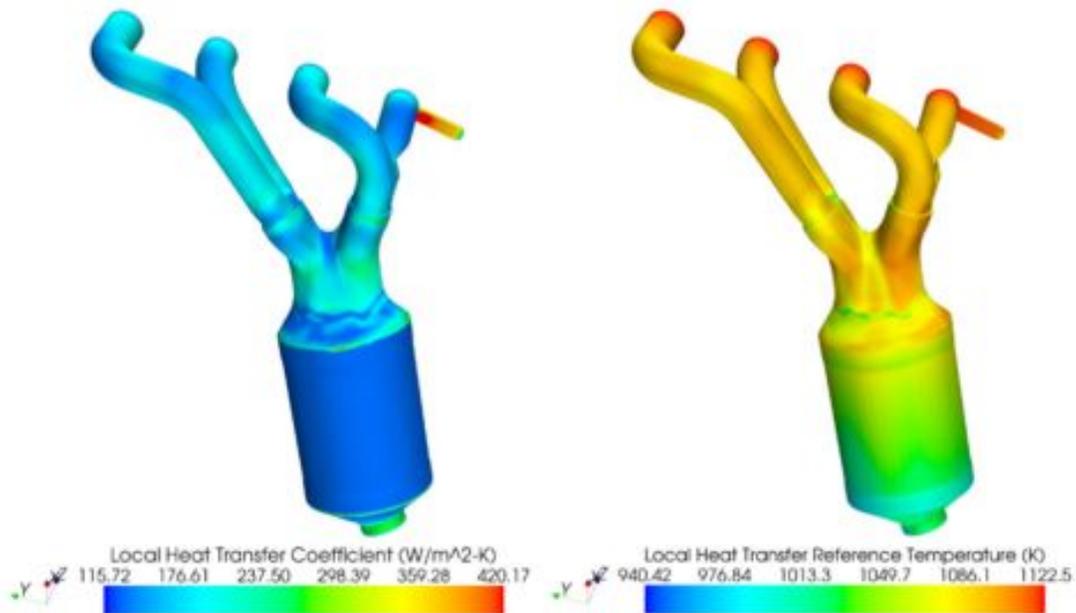
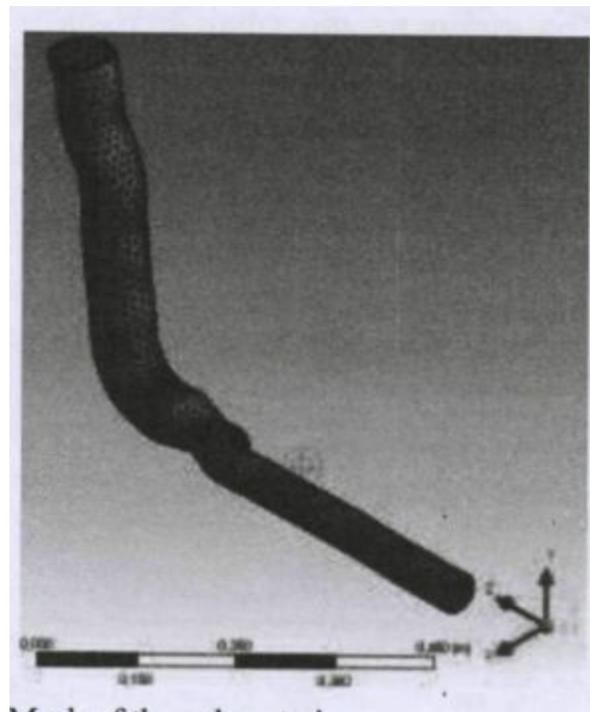


Figura 23 Resultados de CFD
Fuente: Yen, Z., et al. (2014)

En este caso de estudio, se concluyó que la deflexión del sistema provocada por las altas temperaturas provocaba una fractura en uno de los soportes, el cual fue sometido a un rediseño y validado con FEA.

Debido al funcionamiento de los softwares de análisis que consta de sistemas de ecuaciones que se resuelven a través de procesos iterativos, es importante dividir el dominio a analizar en un número finito de elementos y nodos, para esto se utiliza el mallado, muchos softwares de análisis como es el caso de ANSYS CFX, cuentan con su módulo de mallado que genera una malla automática, considerando la geometría y zonas de interés.

Mesut, D., Zekeriya, P., Murat, K., Adnan, P., (2013), realizaron un análisis de fluidos y un análisis experimental de rendimiento térmico al sistema de escape de un motor de chispa. Para el desarrollo del análisis de fluidos, se utilizó ANSYS CFX, al igual que para el mallado del sistema, el mallado consto de 103,48 Elementos y 42,578 Nodos, mostrados en la Figura 24.



*Figura 24 Mallado del sistema
Fuente: Mesut, D., et al. (2013)*

Las condiciones de frontera especificadas para el análisis consisten en una entrada, salida, paredes internas y paredes externas del sistema, y los parámetros definidos fueron, flujo másico y temperatura en la entrada y presión estática en la salida.

Para la definición de la temperatura a la entrada, se agregó una ecuación especificando que la temperatura a la entrada del sistema depende del tiempo mientras que a la salida se definió una condición “*Opening*” que permite el flujo del fluido en ambas direcciones.

El área de enfoque de este CFD fue la transferencia de calor, por lo que los datos recopilados de mayor impacto fueron temperaturas, mismas que se compararon con los resultados experimentales del sistema.

Los resultados comparativos se muestran en la Figura 25, donde podemos observar que el comportamiento del fluido en ambos casos es similar hasta los 40 segundos, de los 40 a los 120 segundos existe una desviación mayor entre ambos datos y de los 120 segundos en adelante, los datos experimentales muestran un comportamiento lineal, mientras que los datos obtenidos del análisis muestran un comportamiento exponencial. Otro factor importante para la realización del análisis de fluido en este caso es el decidir la posición óptima del catalizador, lo cual se definió con los perfiles de temperatura del ducto y se encontró que posicionando el catalizador 0.3 m más cerca del colector se puede lograr disminuir las emisiones de encendido, que suceden cuando las temperaturas del sistema son bajas.

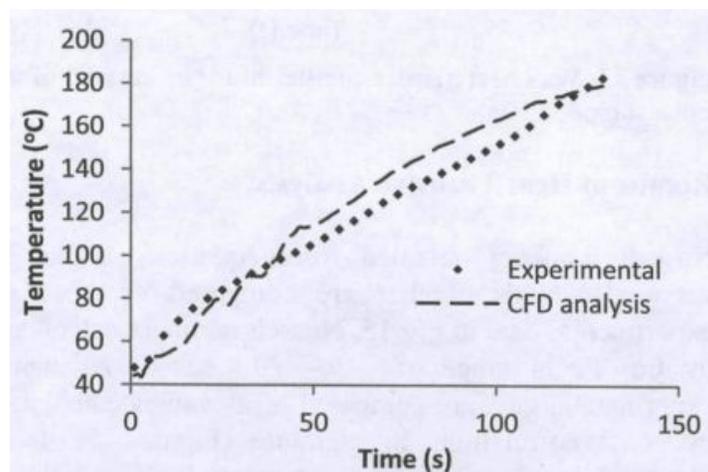


Figura 25 Resultados comparativos
Fuente: Mesut, D., et al. (2013)

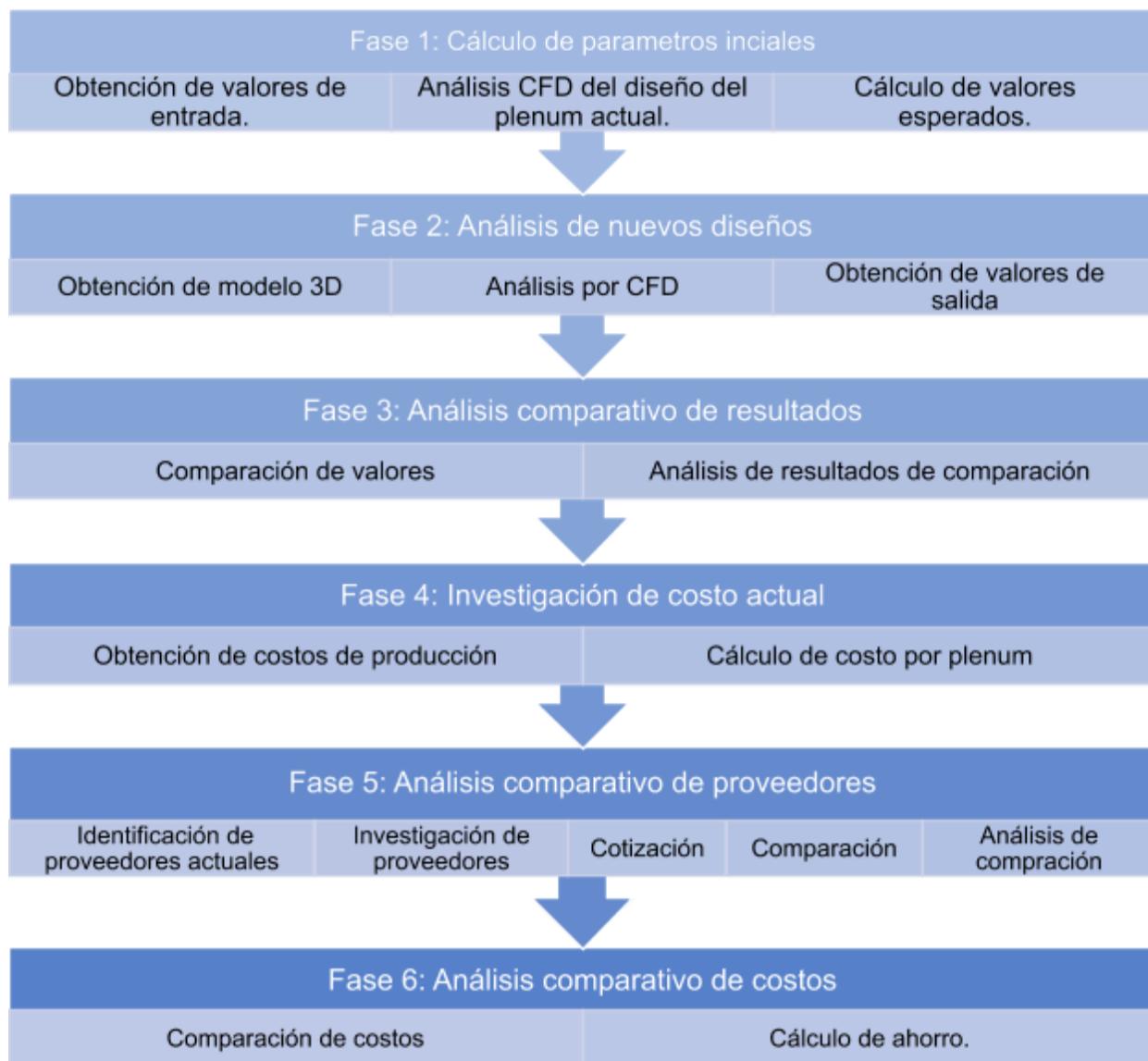
Capítulo 3

2.1 Metodología general

Esta sección presenta la metodología utilizada en la elaboración de este proyecto en el que se busca validar y evaluar mediante un análisis de fluidos que la geometría y materiales en el diseño del **Plenum** del Gulfstream V cumpla o supere los valores esperados en cuanto a presión, flujo másico y velocidad del fluido que a su vez permita reducir el costo de fabricación con respecto al actual, utilizando una metodología mixta de carácter descriptivo y cuantitativo.

2.2 Procedimiento

El procedimiento para esta investigación se divide en 6 fases principales. La Figura 26 muestra un esquema de estas fases con las actividades realizadas para cada fase.



*Figura 26 Procedimiento y fases del proyecto de aplicación
Fuente: Elaboración propia*

Fase 1: Cálculo de parámetros iniciales

Esta fase tiene como propósito conocer el comportamiento de la presión, flujo y velocidades del fluido en el diseño original del **Plenum** con el fin de definir valores esperados para los diseños propuestos, para lo cual se realizaron tres actividades principales:

- Obtención de valores de entrada: se requiere conocer los valores de entrada de presión, temperatura y flujo másico del **Plenum** con respecto al sistema para poder utilizar estos valores al realizar el análisis de fluidos.
- Análisis CFD del diseño del **Plenum** actual: Realizar un análisis de fluidos computacional al diseño actual del **Plenum** del Gulfstream V y observar el comportamiento de los valores de salida del fluido.
- Cálculo de valores esperados: De acuerdo con los valores obtenidos con el análisis anterior, evaluar y definir un rango en el que los valores pueden variar sin afectar el rendimiento del sistema en su totalidad.

Fase 2: Análisis de nuevos diseños

En esta fase se busca analizar los diseños propuestos utilizando los mismos parámetros iniciales utilizados en la Fase 1 para el análisis del modelo original y conocer el comportamiento de la presión, flujo y velocidades del fluido en los diseños propuestos, para lo cual se realizaron 3 actividades principales:

- Obtención de modelo 3D: Una vez los nuevos diseños sean validados estructuralmente, es necesario “limpiar el modelo” lo cual se refiere a eliminar geometrías no necesarias para el análisis de fluidos, posteriormente se crea un modelo de las cavidades interiores por donde fluye el aire, este modelo es el que será ingresado al software de análisis.
- Análisis por CFD: Se realiza el análisis con el modelo preparado anteriormente y los valores del fluido de entrada
- Obtención de valores de salida: Interpretar los resultados y obtener valores de salida de presión, flujo másico y velocidad del fluido para los nuevos diseños

Fase 3: Análisis comparativo de resultados

El propósito de esta fase es comparar los resultados obtenidos en las Fases 1 y 2 para asegurar que los nuevos diseños cumplen o mejoran el funcionamiento del **Plenum** del Gulfstream V, para lo cual se definieron dos actividades:

- Comparación de valores: Compara los valores obtenidos con los análisis de los nuevos diseños con los valores obtenidos del análisis del diseño actual.

- Análisis de resultados de comparación: Determinar si los nuevos diseños son aptos para cumplir con las demandas del sistema de acuerdo con los resultados comparativos.

Fase 4: Investigación de costo actual

En esta fase se busca tener un valor del costo actual de producción del **Plenum** del Gulfstream V, para lo cual se definieron dos actividades:

- Obtención de costos de producción: De acuerdo con los registros de producción, obtener la información de costo de producción del **Plenum** del Gulfstream V total de los años 2017 y 2018.
- Cálculo de costo por **Plenum**: Con los datos adquiridos, calcular el costo de producción actual por pieza.

Fase 5: Análisis comparativo de proveedores

El propósito de esta fase es mediante la realización de un análisis comparativo de proveedores y sus cotizaciones, definir los proveedores más competitivos, para lo cual se definieron cinco actividades:

- Identificación de proveedores actuales: Con ayuda del departamento de compras, identificar a los proveedores actuales de *Honeywell* que cuentan con las capacidades de fabricar los nuevos diseños del **Plenum** del Gulfstream V.
- Investigación de proveedores: Investigar sobre otros proveedores en la región que no sean proveedores actuales de *Honeywell* y que cuenten con las capacidades para fabricar los nuevos diseños del **Plenum** del Gulfstream V
- Cotización: Contactar a los proveedores con el fin de obtener cotizaciones del costo de producción por pieza y cualquier otro componente o herramienta necesaria para la producción de este.
- Comparación: Una vez recibidas las cotizaciones, es necesario comparar los precios ofrecidos.
- Análisis de comparación: Después de esta comparación es posible identificar a los proveedores con los precios más competitivos y que representan una mejor opción para la fabricación de este componente.

Fase 6: Análisis comparativo de costos

El propósito de esta fase es obtener un valor específico de ahorro comparando los costos de fabricación actual con los costos cotizados para la fabricación de los nuevos diseños, para lo cual se definieron dos actividades principales:

- Comparación de costos: Teniendo el costo actual de producción del **Plenum** del Gulfstream V y las nuevas cotizaciones, es posible comparar los precios.
- Cálculo de ahorro: Al comparar se puede definir si existe un ahorro de producción como consecuencia del rediseño y cambio de proceso de fabricación del **Plenum** del Gulfstream V y darle un valor específico a ese ahorro.

2.3 Planificación

La planeación para el desarrollo de esta investigación que se presenta en esta sección específica los entregables, la planeación de tiempo y recursos utilizados para la realización de este proyecto

2.3.1 Entregables

Aquí, se presenta la especificación de los entregables. Esto se presenta en la Tabla 2, donde se describe cada entregable y los tiempos estimados en horas para cada uno de los entregables.

Tabla 2 Entregables

Actividad	Entregable	Descripción	Tiempo de realización (semanas)
Fase 1: Cálculo de parámetros iniciales			
Obtención de valores de entrada	Tabla de valores	Tabla con los valores de presión, temperatura y flujo másico de entrada al Plenum del Gulfstream V.	2
Análisis CFD del diseño actual	Lista de parámetros y condiciones de frontera para el análisis.	Parámetros, condiciones de frontera y superficies de interés para el análisis.	2
Cálculo de valores esperados	Lista de rangos	Lista de los rangos de valores aceptables para presión, flujo másico y velocidad del fluido.	1
Fase 2: Análisis de nuevos diseños			
Obtención de modelo 3D	Modelos 3D opuestos	Modelos 3D opuestos de las propuestas de diseño del Plenum previamente validadas estructuralmente.	1
Análisis por CFD	Lista de parámetros y condiciones de frontera para el análisis	Parámetros, condiciones de frontera y superficies de interés para el análisis.	2
Obtención de valores de salida	Tabla de resultados	Tabla de resultados donde se reflejen los valores de salida de presión, flujo másico y velocidad del fluido de ambas propuestas de diseño y gráficos.	1
Fase 3: Análisis comparativo de resultados			
Comparación de valores	Tabla comparativa	Tabla comparativa de los valores esperados y los valores obtenidos.	1
Análisis de resultados de comparación	Aceptable o no aceptable	Establecer si los valores obtenidos son aceptables o no.	1
Fase 4: Investigación de costo actual			
Obtención de costos de producción	Tablas y gráficos	Tablas y gráficos con los costos de producción del Plenum del Gulfstream V de años anteriores, 2017/2018.	1

Cálculo de costo por <i>Plenum</i>	Valor	Valor de costo por unidad de producción actual del <i>Plenum</i> del Gulfstream V.	1
Fase 5: Análisis comparativo de proveedores			
Obtención de proveedores actuales	Lista de proveedores	Lista de nombre y contacto de las empresas que actualmente son proveedores de <i>Honeywell</i> y tienen las capacidades para fabricar los nuevos diseños para el <i>Plenum</i> del Gulfstream V.	2
Identificación de proveedores	Lista de proveedores	Lista de posibles proveedores sin relación actual con <i>Honeywell</i> que cuenten con las capacidades para fabricar los nuevos diseños para el <i>Plenum</i> del Gulfstream V.	2
Cotización	Tabla de precios	Tabla de precios de producción ofrecidos por los proveedores previamente mencionados.	5
Comparación	Tabla y gráficos comparativos	Análisis comparativo de los precios de producción mencionados	1
Análisis de comparación	Nombres de dos proveedores	Selección de los dos proveedores más competitivos de acuerdo con el precio de producción cotizado.	1
Fase 6: Análisis comparativo de costos			
Comparación de costos	Tabla y gráficos comparativos	Tabla y gráficos comparativos de los costos actuales de producción con respecto a los costos cotizados para los nuevos diseños.	1
Cálculo de ahorro	Valor	Cantidad de ahorro aproximada con respecto a la comparación anterior.	1

Fuente: Elaboración propia

2.3.2 Cronograma

En esta sección, se busca ilustrar de manera gráfica la secuencia y duración de las actividades antes descritas, mostrado en la Figura 27.

Gantt Proyecto

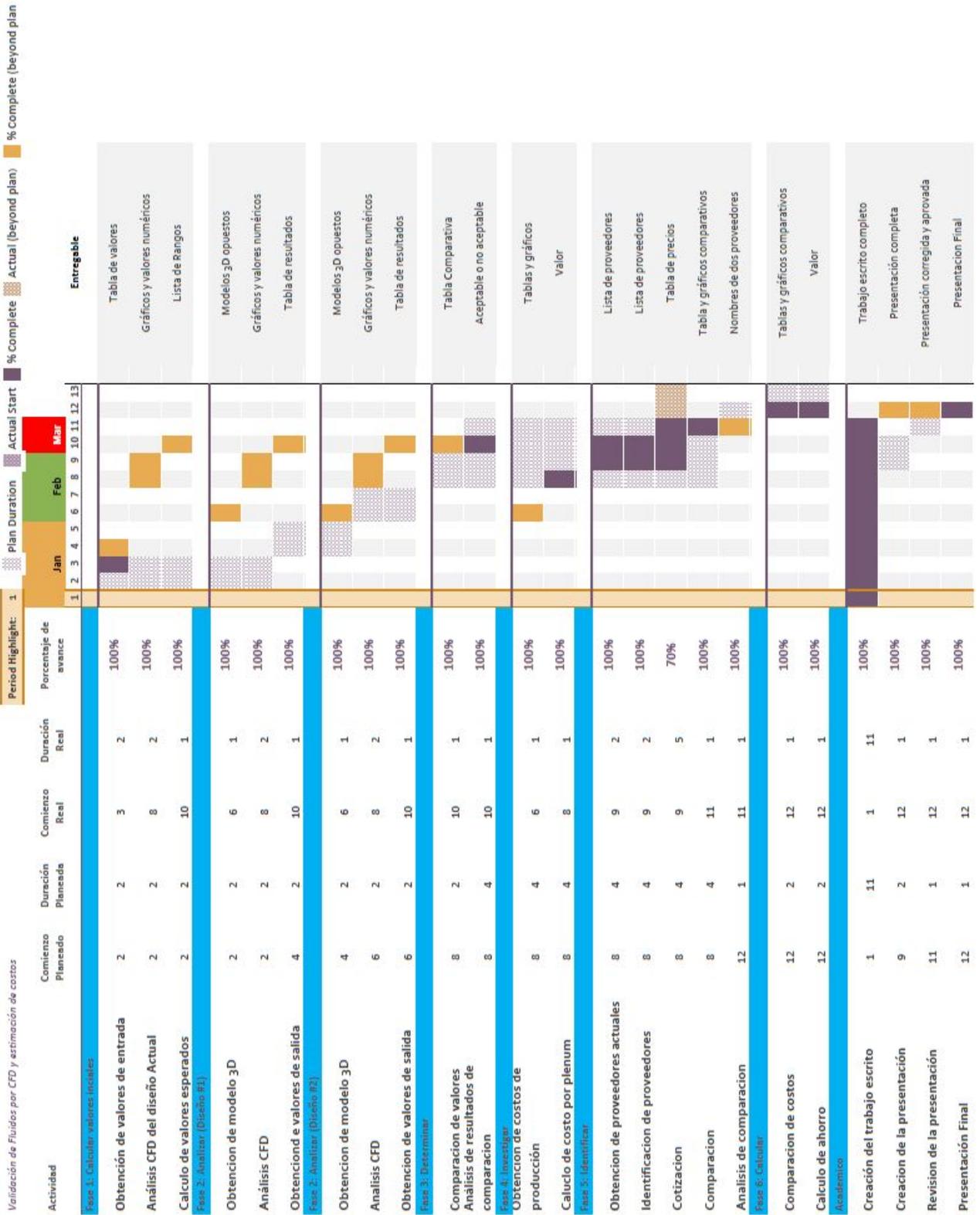


Figura 27 Cronograma
Fuente: Elaboración propia

2.3.3 Recursos

En el siguiente apartado se describen los recursos necesarios para el desarrollo de este proyecto, tanto materiales, humanos y de vinculación.

Materiales:

- Licencia para Ansys 17.0
- Licencia para NX 10
- Equipo de cómputo con la capacidad de operar NX 10 y Ansys 17.0

Humanos:

- Ingeniero de producto
- Ingeniero de diseño
- Ingeniero de manufactura
- Ingeniero con conocimientos de Análisis CFD
- Personal del departamento de compras

Vinculación:

- Carta de autorización de Proyecto
- Autorización del ingeniero de PSE para trabajar y compartir información del producto.

Capítulo 4

3.1 Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de esta investigación la cual busca como objetivo, validar y evaluar mediante un análisis de fluidos que las geometrías de los diseños propuestos para el **Plenum** del Gulfstream V cumplan o superen los valores esperados en cuanto a presión, flujo másico y velocidad del fluido que a su vez permita reducir el costo de fabricación con respecto al diseño actual. Estos resultados se verán presentados de acuerdo con la metodología definida en el Capítulo 3, la cual consta de 6 fases.

Fase 1: Cálculo de parámetros iniciales

En esta fase se buscó calcular los rangos de valores que debe cumplir el diseño del **Plenum** del Gulfstream V en cuanto a presión, flujo másico y velocidad del fluido, para ello se realizaron las 3 siguientes actividades.

Actividad 1: Obtención de valores de entrada

En esta actividad se buscó tener información real de las características del flujo que pasa por el diseño actual de **Plenum** del Gulfstream V, con el fin de posteriormente realizar un análisis de fluidos considerando estos valores de entrada.

Para la obtención de estos valores, se acudió a los asesores de este proyecto en *Honeywell*, quienes a su vez contactaron a Keith Smith; Keith labora en la planta de Torrance, Ca., y se desempeña como ingeniero principal de proyectos para la organización de “*Mechanical Systems and Components*” (MS&C). Keith está involucrado en el rediseño del **Plenum** del Gulfstream V ya que se desempeñó como ingeniero de proyectos durante la etapa de pruebas del diseño actual del **Plenum**.

Al contactar a Keith se obtuvo un documento con las temperaturas, presiones, flujos másicos, valores de humedad, etc., medidos durante el proceso de pruebas del **Plenum** actual.

Los datos obtenidos representan 37 casos de vuelo, de los cuales 18 casos representan el sistema ECS trabajando impulsado por el “*Auxiliary Power Unit (APU)*” y los 19 casos restantes representan al avión en vuelo, operando con los motores principales del avión.

Los primeros 18 casos se presentan en la Figura 28, estos casos consideran una velocidad del avión de cero y que la puerta del **Plenum** permanece cerrada, por lo que el flujo de aire por el **Plenum** se debe a la acción del abanico del “*Air Cycle Machine*”. Debido a que el ECS puede funcionar siendo impulsado por el APU hasta 15,000 pies de altura, en el eje vertical de esta Grafica se observan los casos de altura que van de -15,000 hasta 15,000 pies de altura, considerando diferentes condiciones ambientales de temperatura, mientras que en el eje horizontal se observan los flujos máscicos en lb/min.

Tomando en cuenta que, a mayor flujo máscico, más difícil de controlar es el comportamiento del fluido, se consideró este como factor de interés para elegir el caso a analizar. El mayor flujo máscico que se observa es de 92.7 lb/min, el cual sucede a -1500 pies de altura, caso elegido para análisis y marcado de color rojo en la Figura 28.

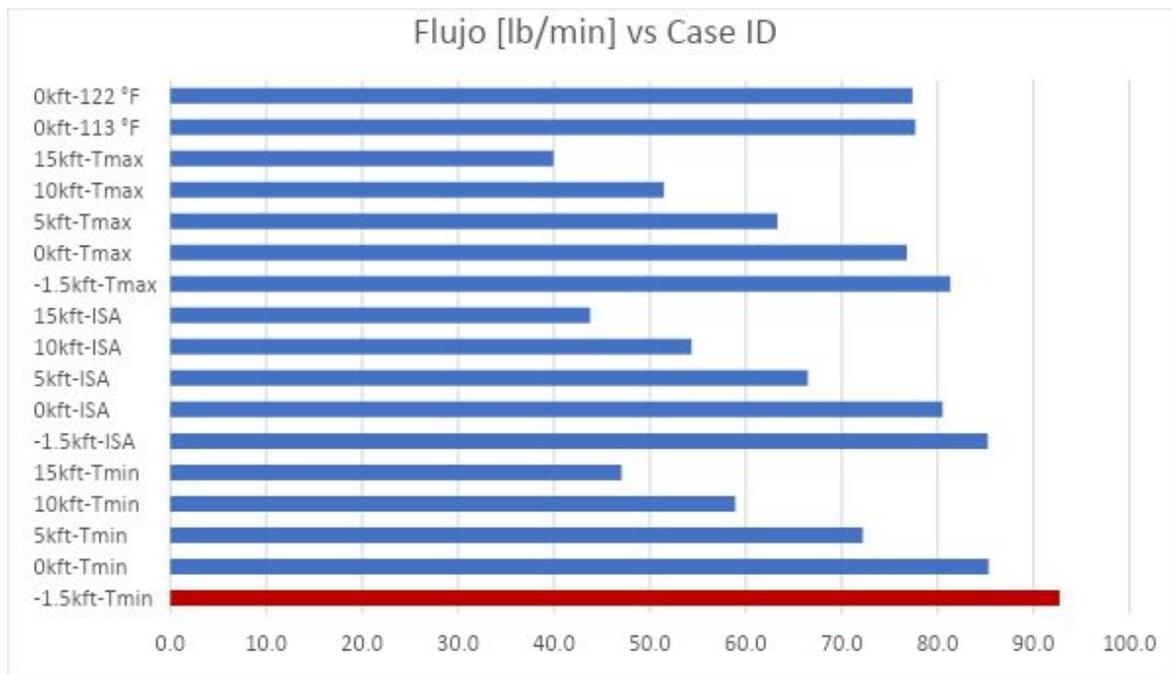


Figura 28 Casos considerando APU

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Smith, K., (2006)

Los otros 19 casos mostrados en la Figura 29 suponen una velocidad de aire diferente de cero, entrada de aire Ram y apertura en la puerta del **Plenum**, similar que lo descrito para la Figura 28, el eje vertical de la gráfica representa alturas de vuelo que van desde los 0 hasta los 51,000 pies de altura, siendo esta segunda, la altura máxima de vuelo del Gulfstream V. En el eje horizontal se observan los flujos máscicos de entrada al **Plenum** correspondientes a las alturas de vuelo.

Al igual que en los casos anteriores, el caso elegido de estas graficas es el de mayor flujo máscico, el cual sucede a los cero pies de altura y se encuentra marcado de color rojo en la Figura 29.

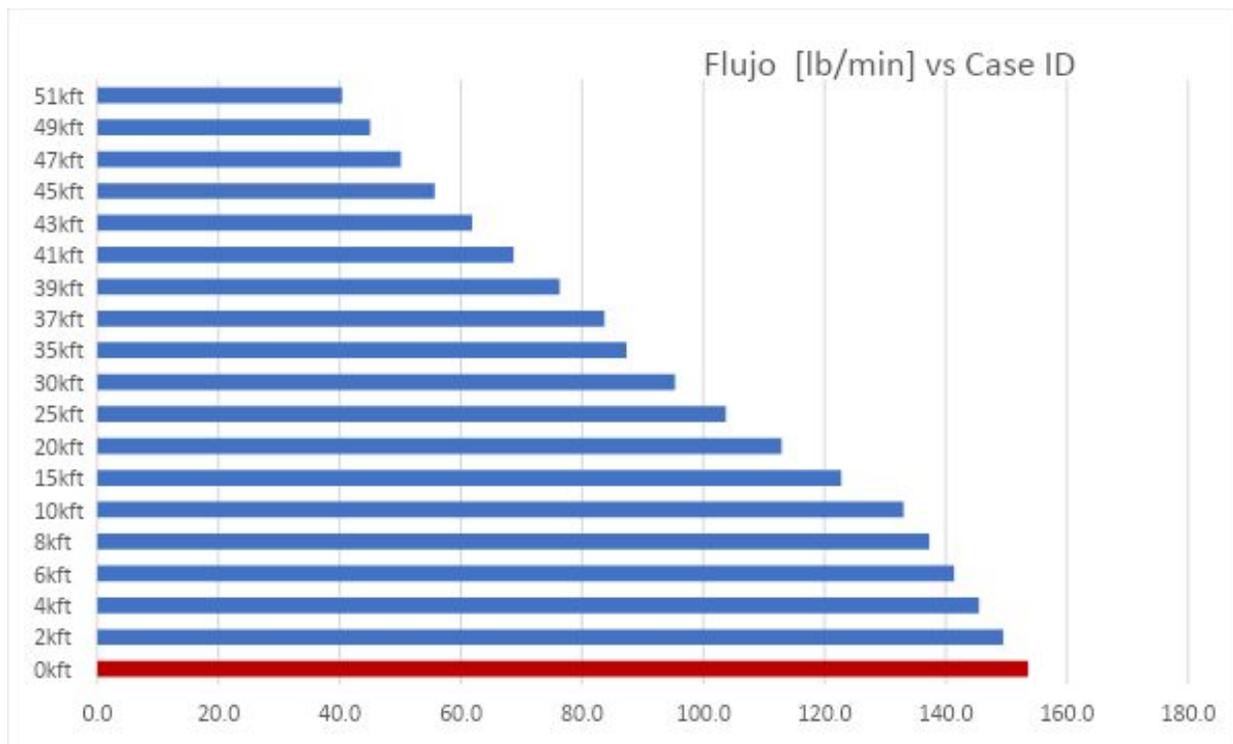


Figura 29 Casos con velocidad de aire diferente de cero

Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de Smith, K., (2006)

Como resultado de esta actividad, se presentan en forma de resumen, los casos y parámetros seleccionados en la Tabla 3.

Tabla 3 Parámetros iniciales

Caso	Flujo másico de entrada del Plenum (lb/s)	Flujo másico en el abanico (lb/s)	Presión de entrada (Psia)	Presión de salida (Psia)	Temperatura de entrada (F)	Cambio de presión en el abanico.
Caso 1: El sistema opera con el APU a -1.5 Kft pies de altura	1.54 (92.7 lb/min)	1.54	15.37	15.54	74.4	.20
Caso 2: El sistema opera con motores a 0 pies de altura.	2.56 (153.6 lb/min)	2.56	15.07	14.78	74.4	.20

Fuente: Elaboración propia

Actividad 2: Análisis CFD del diseño actual

Para la realización de esta actividad, se aplicaron los parámetros iniciales, obtenidos en la Actividad 1, mostrados en la Tabla 3, lo cual quiere decir que se realizaron dos casos de análisis para el modelo original, con el fin de poder observar el comportamiento del fluido y tener estas mediciones como marco de referencia para posteriormente compararlo con los diseños propuestos.

Para el análisis es necesario dividir el dominio a analizar en nodos y elementos, de manera que el ANSYS CFX sea capaz de resolver las ecuaciones para el análisis de fluidos mencionadas en el Capítulo 2. Para el análisis del modelo original, se definió la malla mostrada en la Figura 30 que consta de 1,151,968 Nodos y 6, 370,243 Elementos.



*Figura 30 Mallado de diseño original
Fuente: Elaboración propia*

De acuerdo con los parámetros iniciales, las condiciones de frontera para el análisis del Caso 1 fueron definidas de diferentes maneras con el fin de lograr una mejor aproximación del flujo de aire dentro del **Plenum**.

Las condiciones de frontera utilizadas para la primera iteración de aproximación se encuentran la Tabla 4, y los resultados y su interpretación se pueden observar en la Figura 31, cómo ejemplo de las incongruencias que puede presentar un análisis de CFD al no aplicar las condiciones que mejor representen el comportamiento del fluido.

Tabla 4 Condiciones de frontera de aproximación

Iteración	Entrada	Salida	Abanico	Consideraciones generales
1	Flujo másico definido como parámetro de entrada.	Presión de salida definida como presión ambiente.	Flujo másico definido como único parámetro del abanico.	Se consideró un análisis isotérmico, modelo de turbulencia $k-\epsilon$, el fluido considerado fue aire a 77 F.

Fuente: Elaboración propia

Durante las iteraciones realizadas, los parámetros y condiciones de frontera definidos para los análisis son los siguientes:

1. Entrada

- a. Flujo Másico: 1.54 lbs/s
- b. Temperatura de entrada: 74.4 F

2. Salida

- a. Se definió la superficie como “*Opening*” (Mesut, et al., 2013), lo cual para el análisis quiere decir que el fluido puede cruzar esta superficie de frontera en ambos sentidos, esta condición de frontera se utilizó para simular que el aire expulsado del **Plenum** va al ambiente y validar que la geometría del **Plenum** asegura la salida del aire.
- b. Presión Relativa: 0 psi
- c. Temperatura a la salida 82 F

3. Abanico

- a. Es necesario simular el flujo provocado por el abanico del ACM hacia el difusor, es por esto que para el análisis se consideró un cambio de presión de 0.20 psi, tomado de los datos obtenidos anteriormente, en una cara definida en el punto medio de los alabes del abanico, esta superficie se puede observar en verde en la Figura 31, al igual que las superficies definidas como entrada y salida.

4. Consideraciones generales

- a. Fluido considerado como gas ideal a 1 atm de presión.
- b. La transferencia de calor del análisis se consideró como “Energía Total”, lo cual significa que la resolución del análisis considera la entalpia y efectos de la energía cinética del fluido.
- c. Modelo de turbulencia $k - \epsilon$

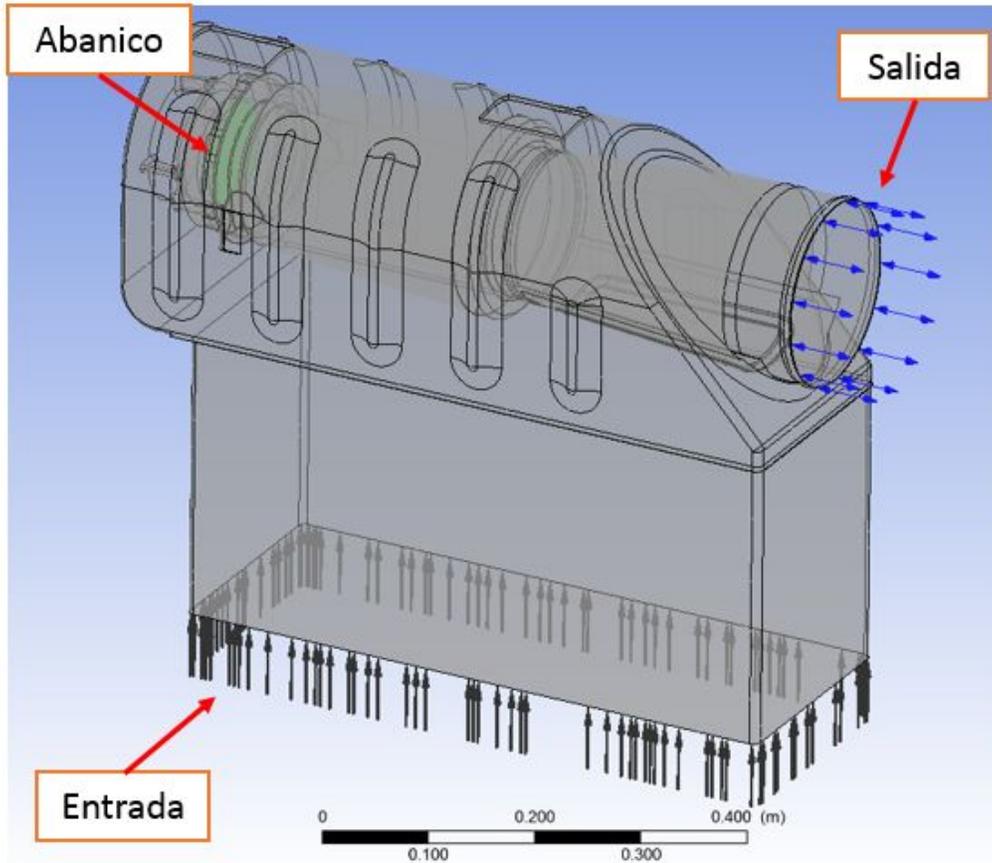


Figura 31 Superficies de interés
Fuente: Elaboración propia

Para el caso 2 los parámetros y condiciones de frontera definidos para el análisis fueron los siguientes:

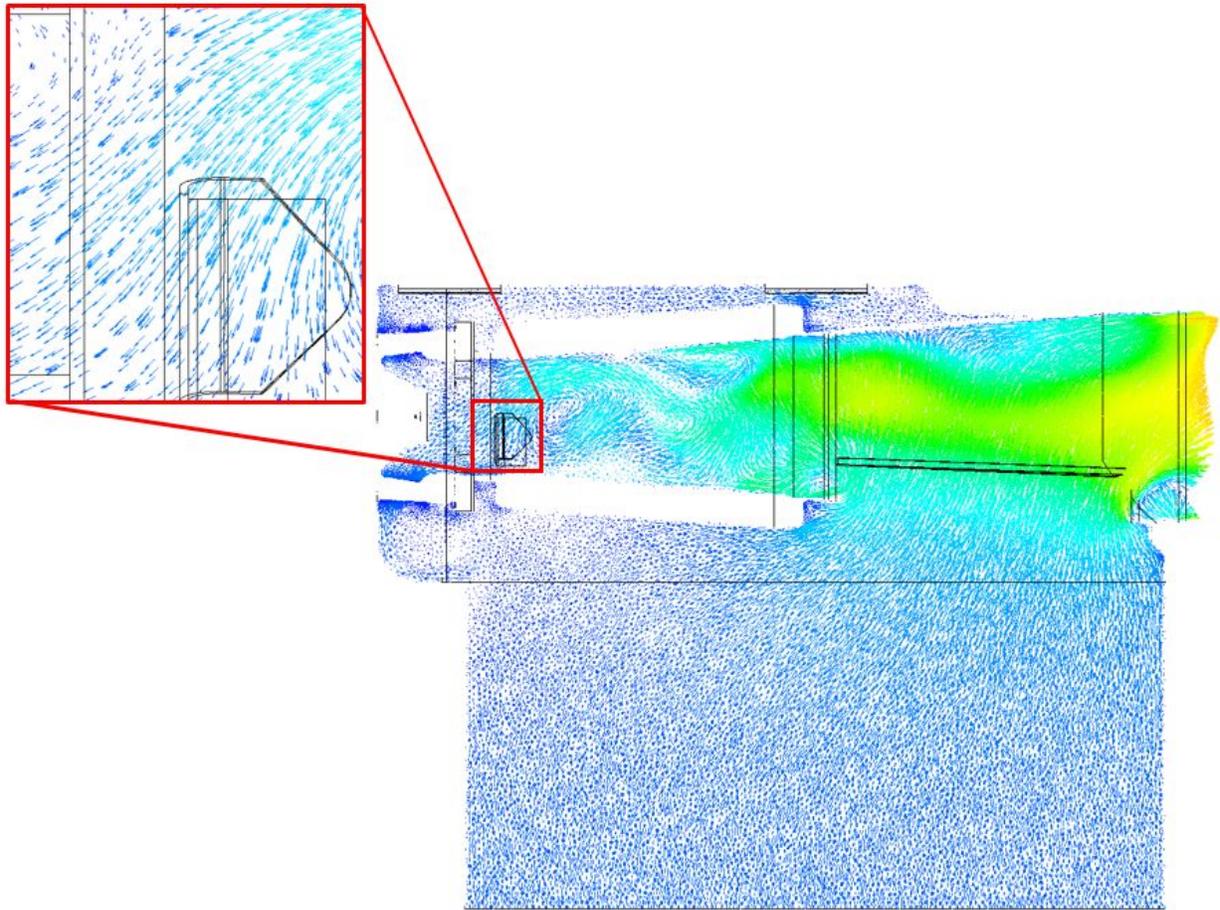
1. Entrada
 - a. Flujo Másico: 2.56 lb/s
 - b. Temperatura de entrada: 74.4 F
2. Salida
 - a. Se definió la superficie como “*Opening*” (Mesut, et al., 2013), lo cual significa que el flujo es liberado al ambiente después de salir del **Plenum**.
 - b. Presión Relativa: 0 psi
 - c. Temperatura a la salida 74.4 F
3. Abanico

- a. Es necesario simular el flujo provocado por el abanico del ACM hacia el difusor, es por esto que para el análisis se consideró un cambio de presión de 0.20 psi, tomado de los datos obtenidos anteriormente, en una cara definida en el punto medio de los alabes del abanico, esta cara se puede observar en verde en la Figura 31, al igual que las superficies definidas como entrada y salida
4. Consideraciones generales
 - a. Fluido considerado como gas ideal a 1 atm de presión.
 - b. La transferencia de calor del análisis se consideró como “Energía Total”, lo cual significa que la resolución del análisis considera la entalpía y efectos de la energía cinética del fluido.
 - c. Modelo de turbulencia $k - \varepsilon$

Actividad 3: Cálculo de valores esperados

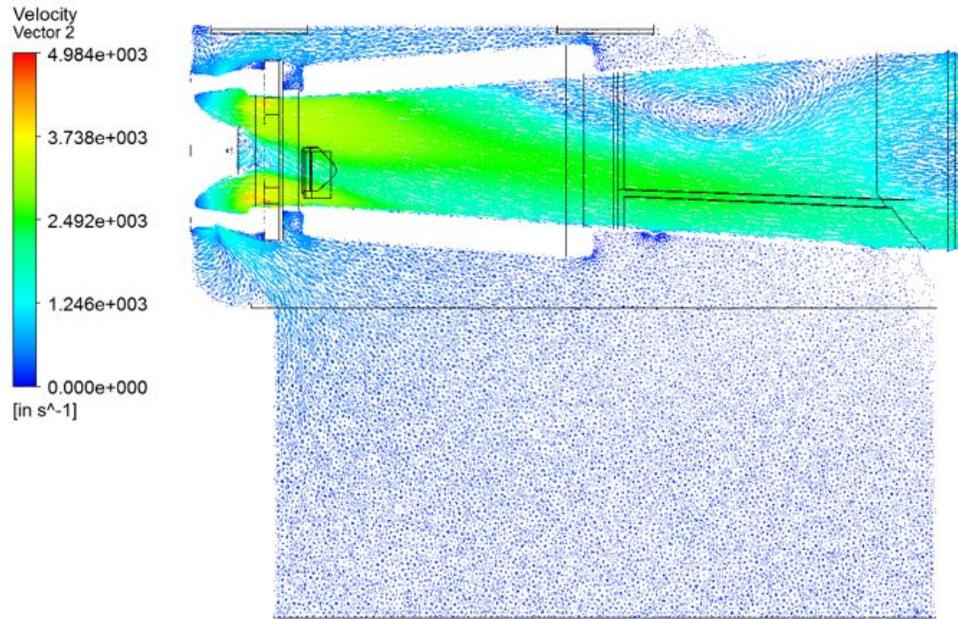
Todas las figuras de resultados de presión mostradas a partir de este punto tienen escala global para fines comparativos, la escala global se definió a partir de los valores máximo y mínimo encontrados en los análisis.

Los resultados obtenidos con la primera aproximación de condiciones de frontera se muestran en la Figura 32, donde se observa que, debido a la falta de condiciones de frontera en el abanico, el flujo del fluido va en el sentido opuesto al real del **Plenum** en uso, esto provoca que se creen áreas de turbulencia provocadas por el choque del fluido que fluye en ambos sentidos al interior de la pieza. Con estos resultados, se decidió ajustar las condiciones del análisis a lo mostrado en la actividad anterior, con lo que se obtuvieron los siguientes resultados.

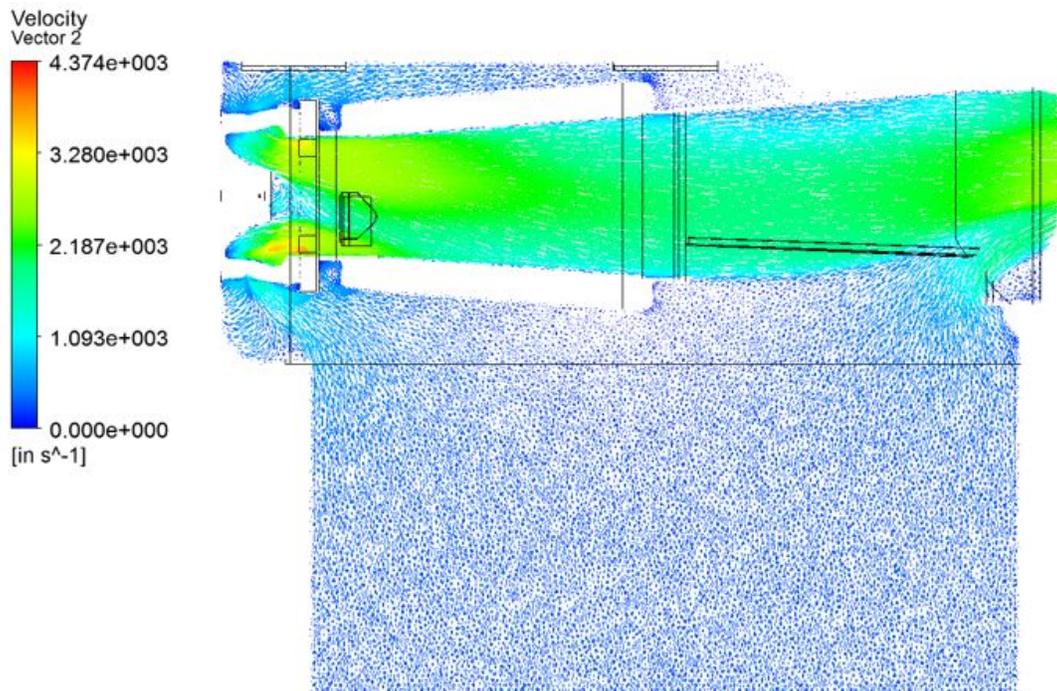


*Figura 32 Dirección de flujo contraria
Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 33 y 34 se observa el comportamiento general del fluido dentro del **Plenum**, en las Figuras 35 y 36 se observa que el fluido entra a una presión positiva y mantiene una presión con poca variación a excepción del área del abanico, donde la aceleración del flujo se puede observar como una caída de presión. En la Figura 35, que representa el análisis del caso del modelo original del **Plenum**, tenemos una presión Máxima de .0744 Psi y Mínima de -1.7727, mientras que para el Caso 2 observado en la Figura 36, tenemos presión Máxima de .2486 y Mínima de -1.1892.



*Figura 33 Vectores de velocidad, Caso 1
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 34 Vectores de velocidad, Caso 2
Fuente: Elaboración propia*

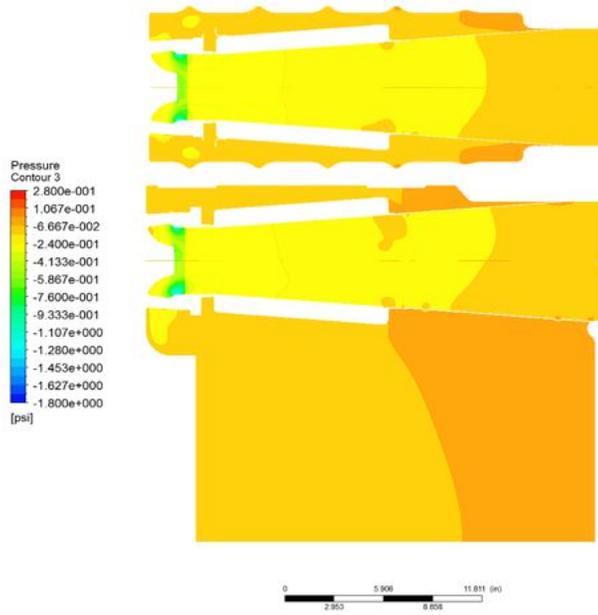


Figura 35 Resultados de presión, Caso 1
Fuente: Elaboración propia

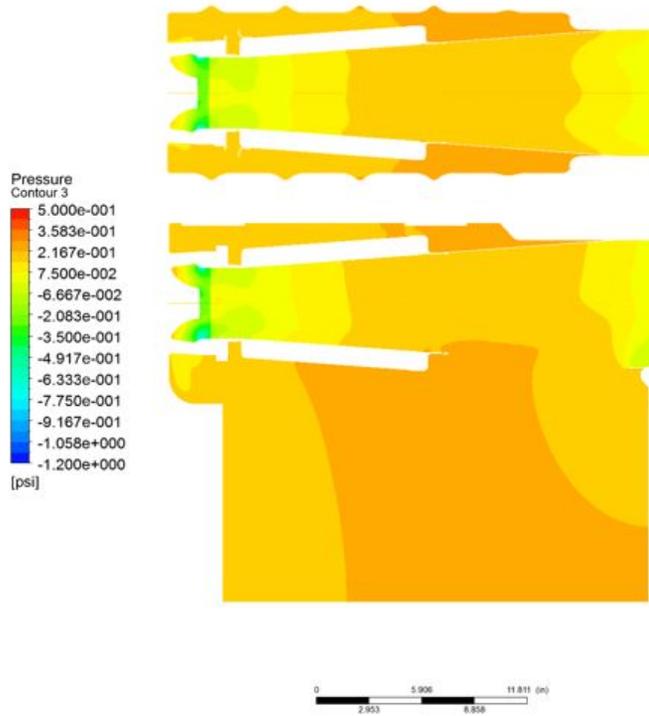


Figura 36 Resultados de presión, Caso 2
Fuente: Elaboración propia

Como entregable de esta actividad, en la Tabla 5, se muestran los resultados con los valores Máximos y Mínimos de presión y velocidad encontrados durante el análisis y representados gráficamente en las Figuras 37 a 40, datos que serán comparados con los resultados de los nuevos diseños en la Fase 3.

Tabla 5 Valores de salida

Caso	Presión Máxima de salida [Psi]	Presión Mínima de Salida [Psi]	Velocidad Máxima de salida [in/s]	Velocidad Mínima de salida [in/s]
1	.0017	-0.0134	2029.53	0
2	.0043	-0.0328	2676.99	0

Fuente: Elaboración Propia

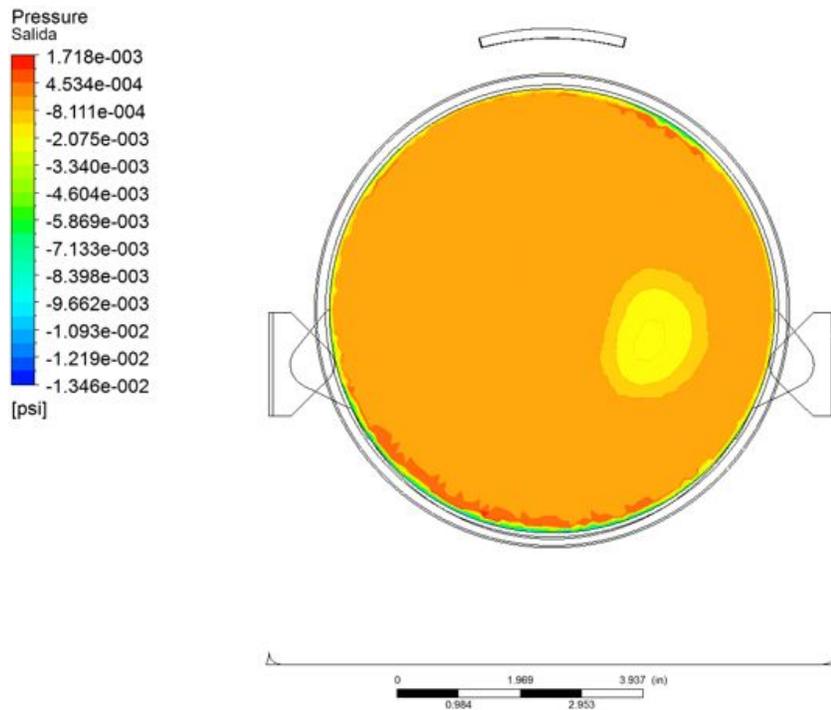


Figura 37 Presiones de Salida, Caso 1
Fuente: Elaboración propia

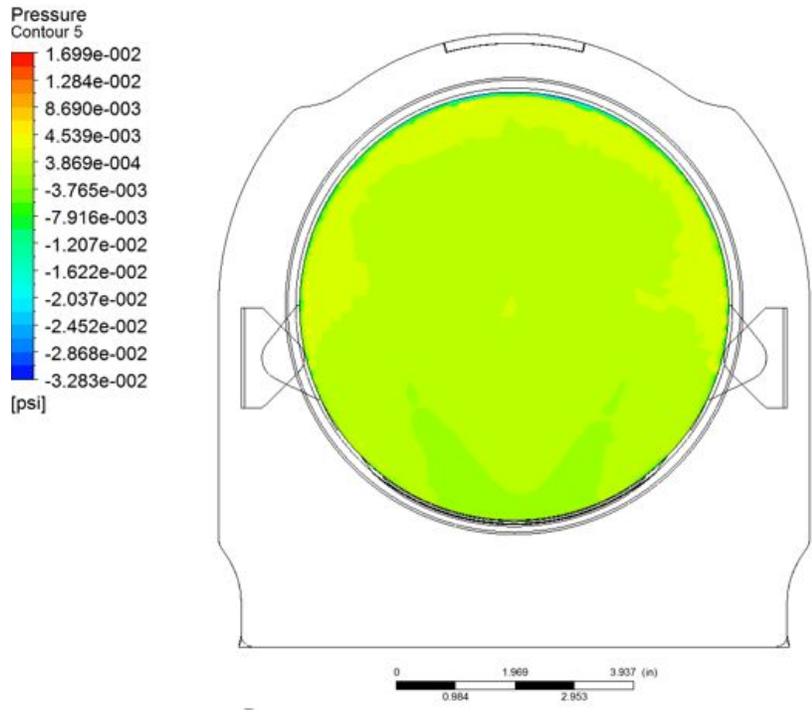


Figura 38 Presiones de Salida, Caso 2
Fuente: Elaboración propia

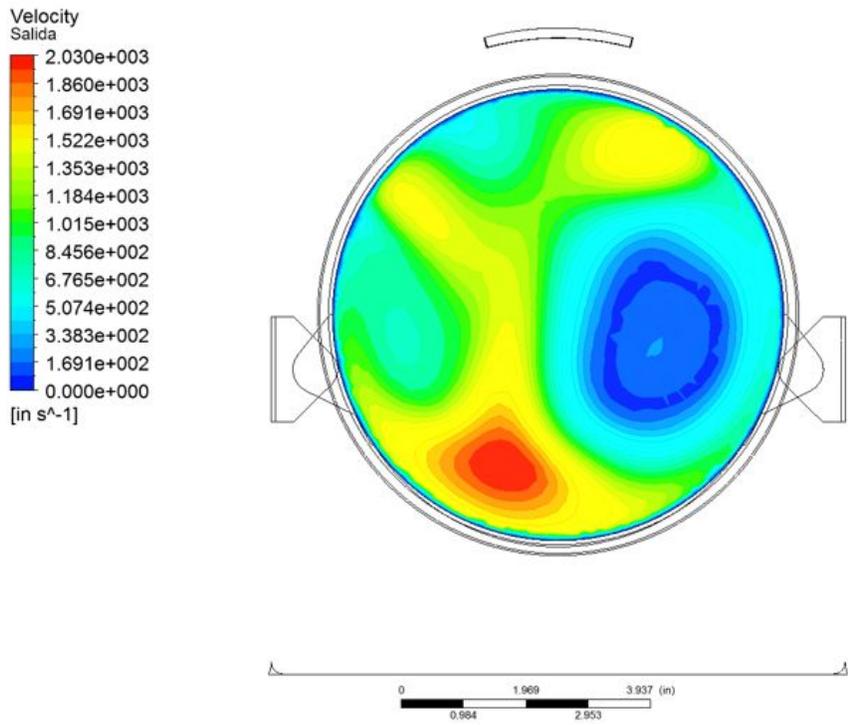


Figura 39 Velocidades de Salida, Caso 1

Fuente: Elaboración propia

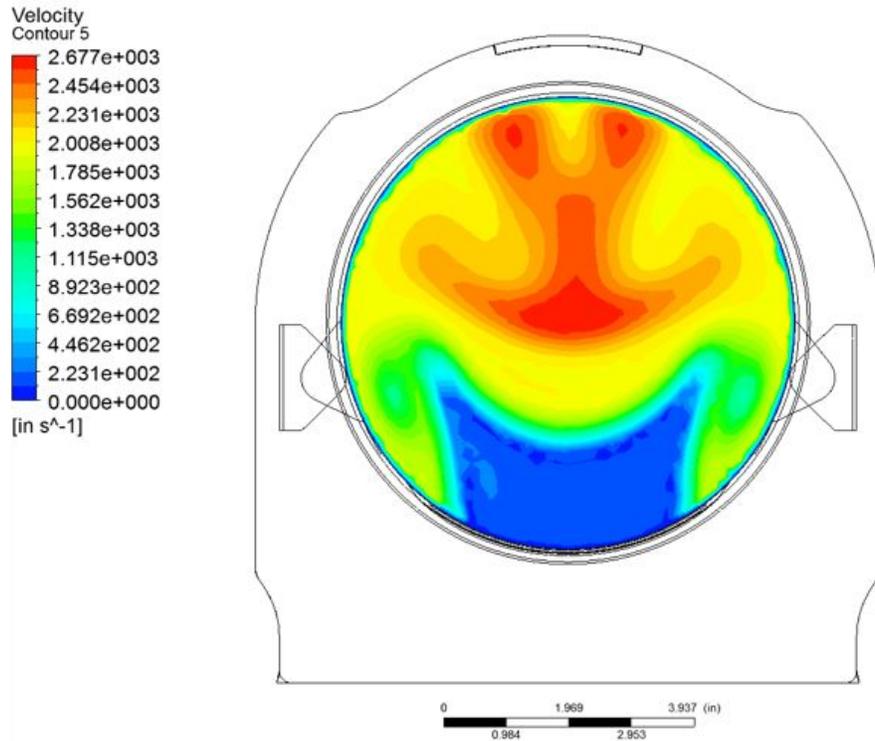


Figura 40 Velocidades de Salida, Caso 2
Fuente: Elaboración propia

Fase 2: Análisis de nuevos diseños

En esta fase se buscó calcular los valores de presión, temperatura y flujo másico en los nuevos diseños del **Plenum** del Gulfstream V, para esto se llevaron a cabo tres actividades.

Actividad 1: Obtención de modelos 3D

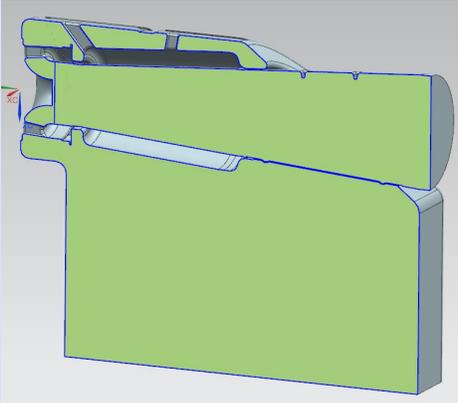
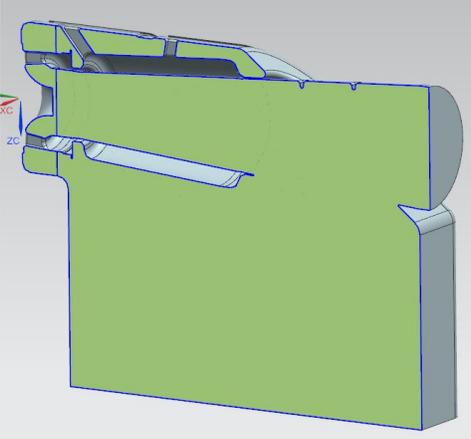
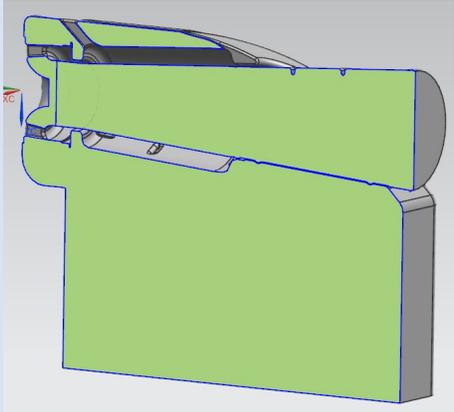
Una vez que los nuevos diseños fueron validados estructuralmente (Martínez, 2019), los modelos 3D de los diseños fueron recibidos y preparados para el análisis de CFD siguiendo los pasos previamente mencionados en la descripción de esta actividad.

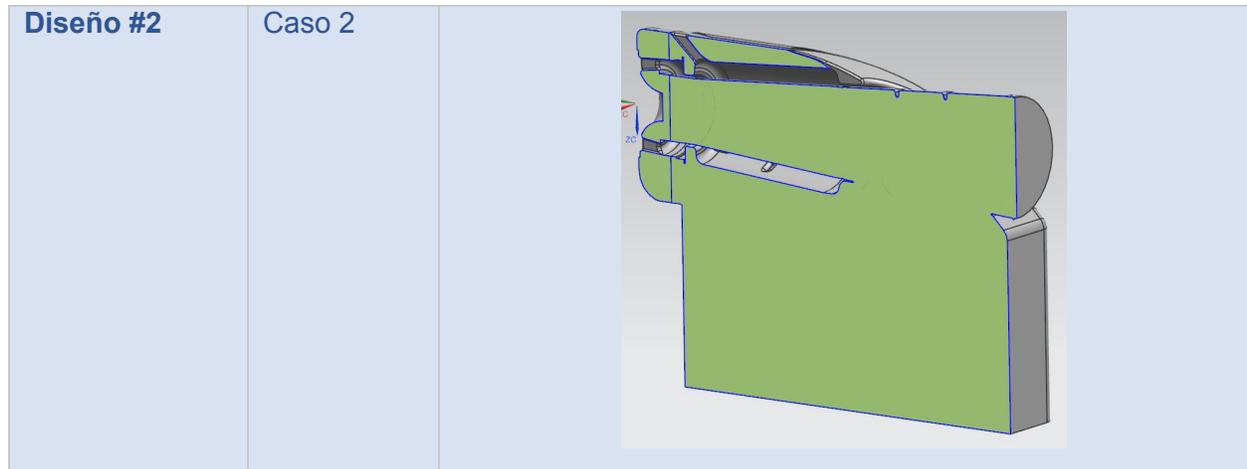
Como se observa en la Figura 31, como parte de la preparación de los modelos 3D para el análisis, se agregó un volumen representativo a la entrada del intercambiador con el fin de permitir el desarrollo del fluido y evitar inconsistencias en el análisis,

debido a que el propósito es comparativo, todos los modelos analizados consideran este mismo volumen agregado a la entrada del fluido.

Como entregable de esta actividad, en la Tabla 6 se muestran imágenes seccionadas de los modelos 3D de las propuestas de diseño ingresados a ANSYS CFX.

Tabla 6 Modelos 3D para CFD

Diseño	Caso	Modelo 3D
Diseño #1	Caso 1	
Diseño #1	Caso 2	
Diseño #2	Caso 1	



Fuente: Elaboración Propia

Actividad 2: Análisis por CFD

Para el análisis de los diseños presentados en la Tabla 6, se utilizaron los parámetros y condiciones de frontera aplicados al diseño original, a continuación, se mencionan los parámetros y condiciones. Las superficies de interés se pueden observar en la Figura 16.

Caso 1:

1. Entrada
 - a. Flujo Másico: 1.54 lbs/s
 - b. Temperatura de entrada: 74.4 F
2. Salida
 - a. Se definió la superficie como “*Opening*” (Mesut, et al., 2013), lo cual para el análisis quiere decir que el fluido puede cruzar esta superficie de frontera en ambos sentidos, esta condición de frontera se utilizó para simular que el aire expulsado del **Plenum** va a ambiente y validar que la geometría del **Plenum** asegura la salida del aire.
 - b. Presión Relativa: 0 psi
 - c. Temperatura a la salida 82 F

3. Abanico

- a. Es necesario simular el flujo provocado por el abanico del ACM hacia el difusor, es por esto que para el análisis se consideró un cambio de presión de 0.20 psi, tomado de los datos obtenidos anteriormente, en una cara definida en el punto medio de los alabes del abanico, esta superficie se puede observar en verde en la Figura 31, al igual que las superficies definidas como entrada y salida.

4. Consideraciones generales

- a. Fluido considerado como gas ideal a 1 atm de presión.
 - b. La transferencia de calor del análisis se consideró como “Energía Total”, lo cual significa que la resolución del análisis considera la entalpia y efectos de la energía cinética del fluido.
 - c. Modelo de turbulencia $k - \epsilon$
5. Mallado: Para el análisis del Diseño #1, se utilizó la malla mostrada en la Figura 41, que consta de 2,395,656 Nodos y 13,125,667 Elementos.

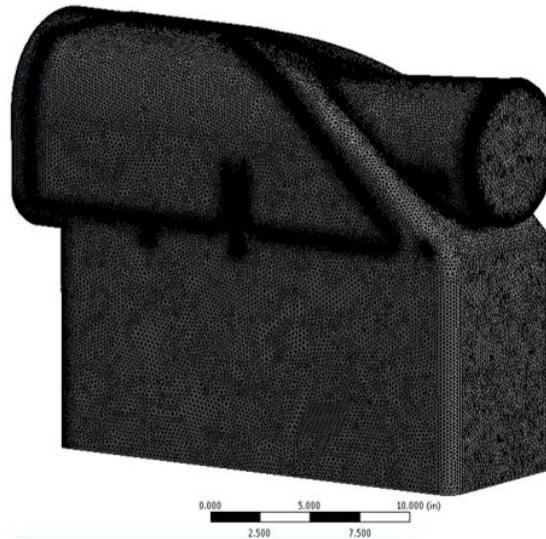


Figura 41 Mallado de Diseño #1
Fuente: Elaboración propia

Caso 2:

1. Entrada

- a. Flujo Másico: 2.56 lb/s
- b. Temperatura de entrada: 74.4 F

2. Salida

- a. Se definió la superficie como “*Opening*” (Mesut, et al., 2013), lo cual significa que el flujo es liberado al ambiente después de salir del **Plenum**.
- b. Presión Relativa: 0 psi
- c. Temperatura a la salida 74.4 F

3. Abanico

- a. Es necesario simular el flujo provocado por el abanico del ACM hacia el difusor, es por esto que para el análisis se consideró un cambio de presión de 0.20 psi, tomado de los datos obtenidos anteriormente, en una cara definida en el punto medio de los alabes del abanico, esta cara se puede observar en verde en la Figura 31, al igual que las superficies definidas como entrada y salida

4. Consideraciones generales

- a. Fluido considerado como gas ideal a 1 atm de presión.
- b. La transferencia de calor del análisis se consideró como “Energía Total”, lo cual significa que la resolución del análisis considera la entalpia y efectos de la energía cinética del fluido.
- c. Modelo de turbulencia $k - \epsilon$

5. Mallado: Para el análisis del Diseño #1, se utilizó la malla mostrada en la Figura 42, que consta de 2,589,345 Nodos y 13,997,310 Elementos.

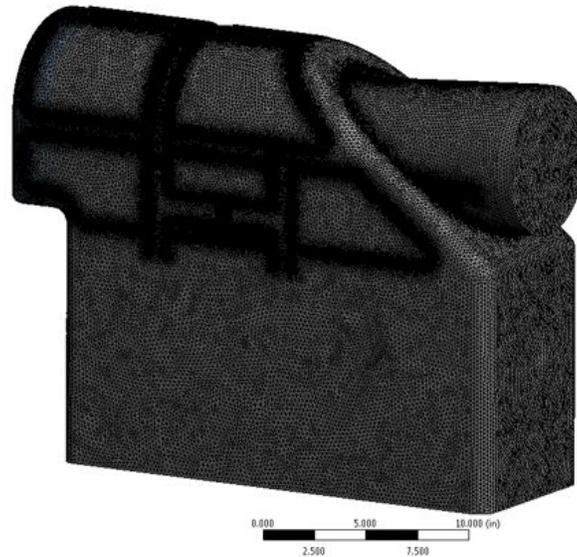
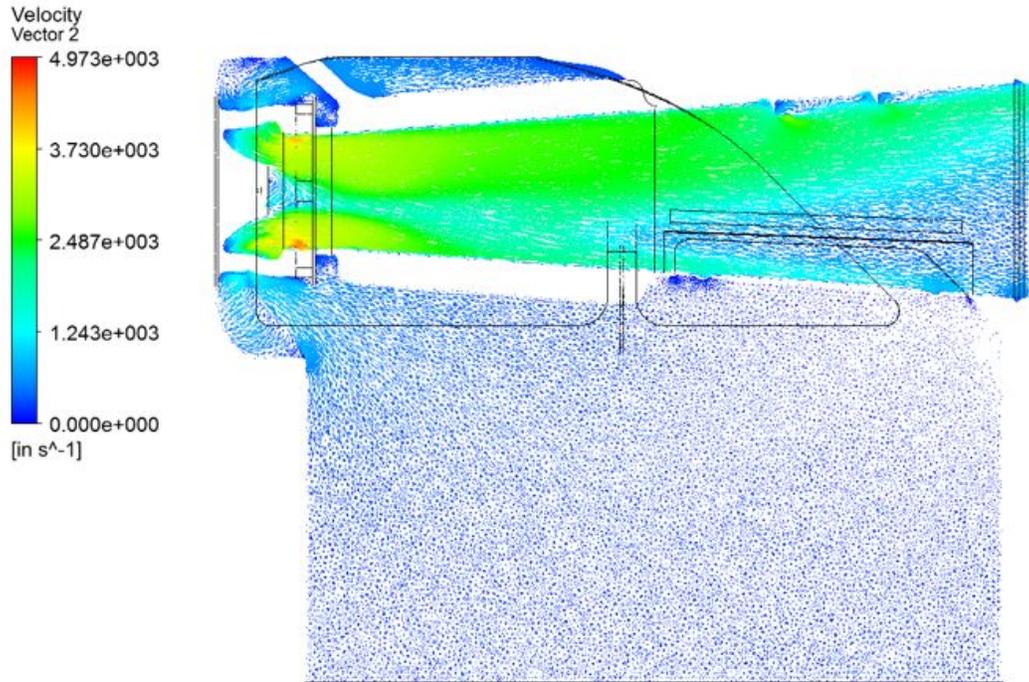


Figura 42 Mallado de Diseño #2
Fuente: Elaboración propia

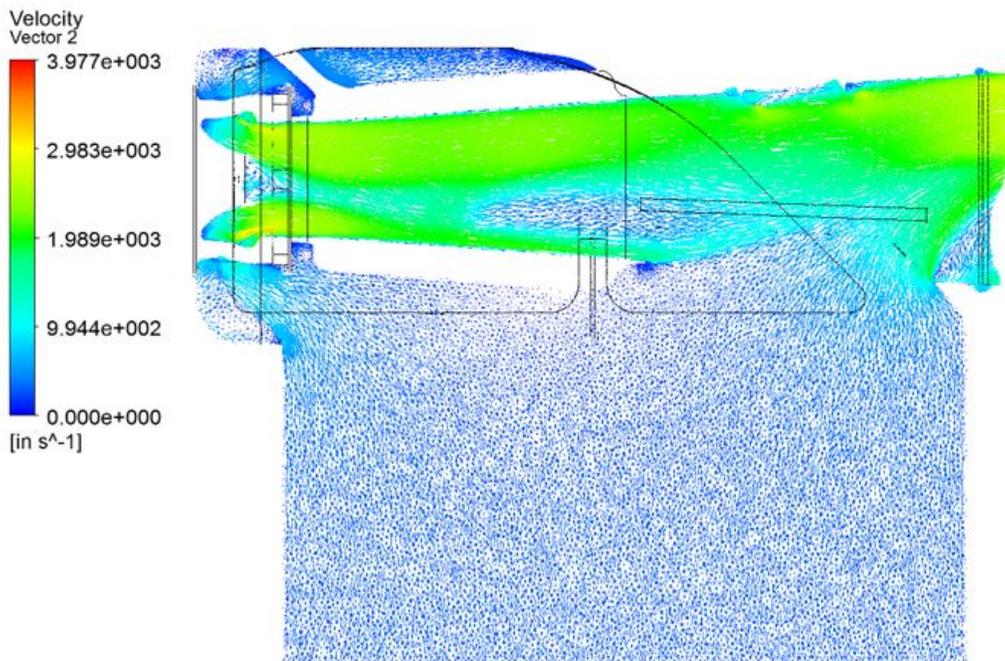
Actividad 3: Obtención de valores de salida

Los resultados del Diseño #1, se muestran en las Figuras 43 a 46. La presión máxima del fluido en el Caso 1 es de 0.2762 Psi y la mínima es de -1.7531, mientras que para el Caso 2, la presión máxima alcanza los 0.4699 Psi y la mínima los -0.9037 Psi.

El comportamiento del fluido en el Diseño #1 mantiene una presión con poca variación en gran parte de su volumen, siendo el cambio de presión más significativo el provocado por el aumento de velocidad en el área del abanico, lo cual se parecía las Figuras 45 y 46 de color verde y azul.



*Figura 43 Vectores de velocidad, Diseño #1, Caso 1
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 44 Vectores de velocidad, Diseño #1, Caso 2
Fuente: Elaboración propia*

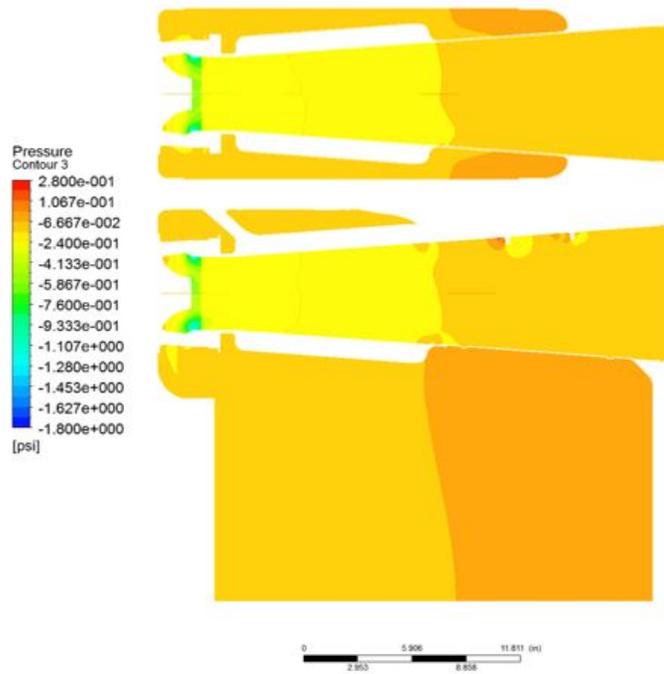


Figura 45 Resultados de presión, Diseño #1, Caso 1
Fuente: Elaboración propia

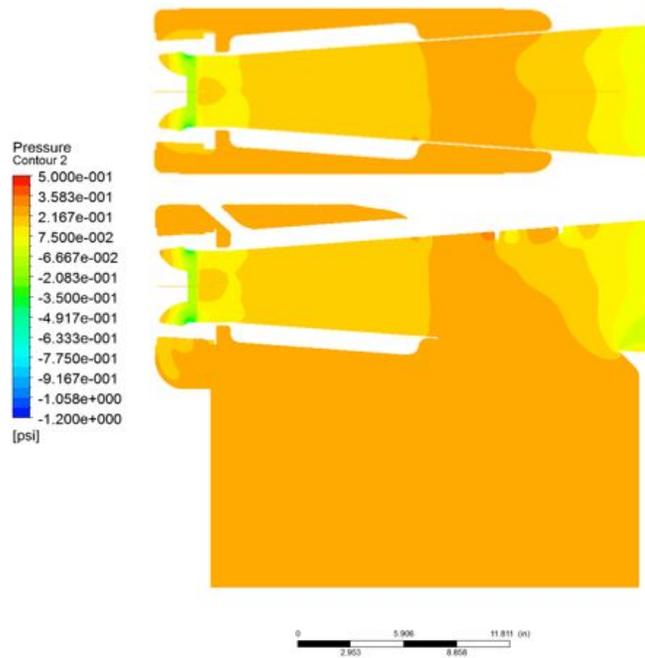


Figura 46 Resultados de presión, Diseño #1, Caso 2
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 7 se observan los valores de presión y velocidad Máxima y Mínima a la salida del **Plenum**. Valores representados de manera gráfica en las Figuras 47 a 50.

Tabla 7 Presiones de Salida, Diseño #1

Caso	Presión Máxima de salida [Psi]	Presión Mínima de Salida [Psi]	Velocidad Máxima de salida [in/s]	Velocidad Mínima de salida [in/s]
1	0.0017	-0.0012	2200.96	0
2	0.0063	-0.0054	2829.88	0

Fuente: Elaboración propia

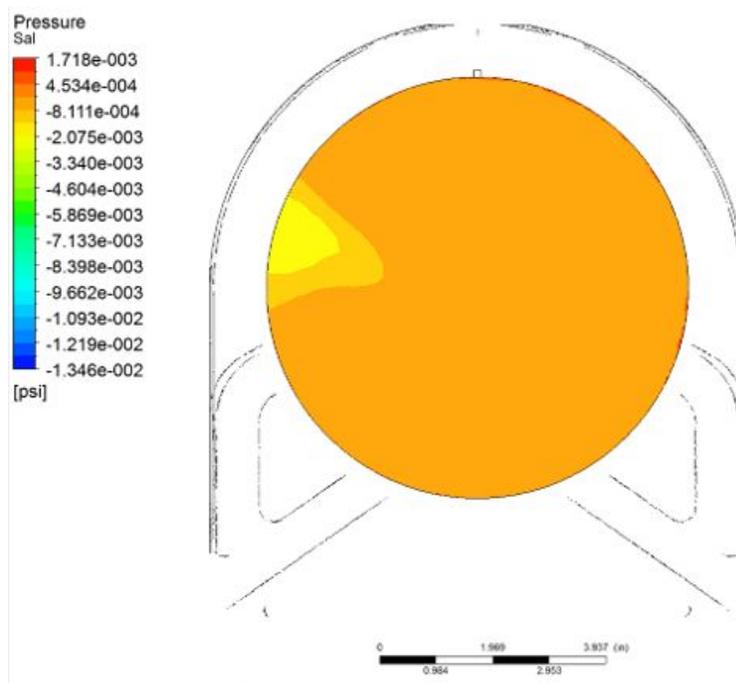


Figura 47 Presiones de salida, Diseño #1, Caso 1
Fuente: Elaboración propia

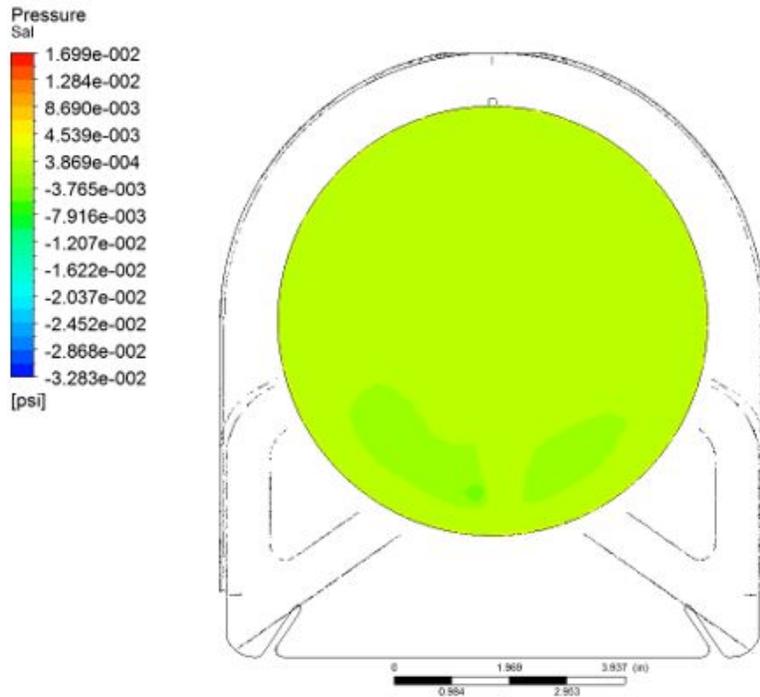


Figura 48 Presión de salida, Diseño #1, Caso 2
Fuente: Elaboración propia

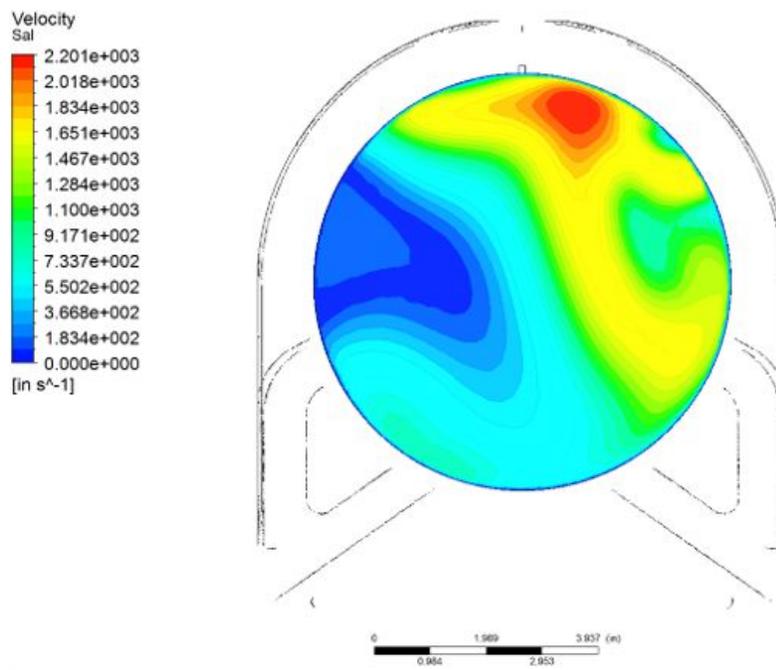


Figura 49 Velocidad de salida, Diseño #1, Caso 1

Fuente: Elaboración propia

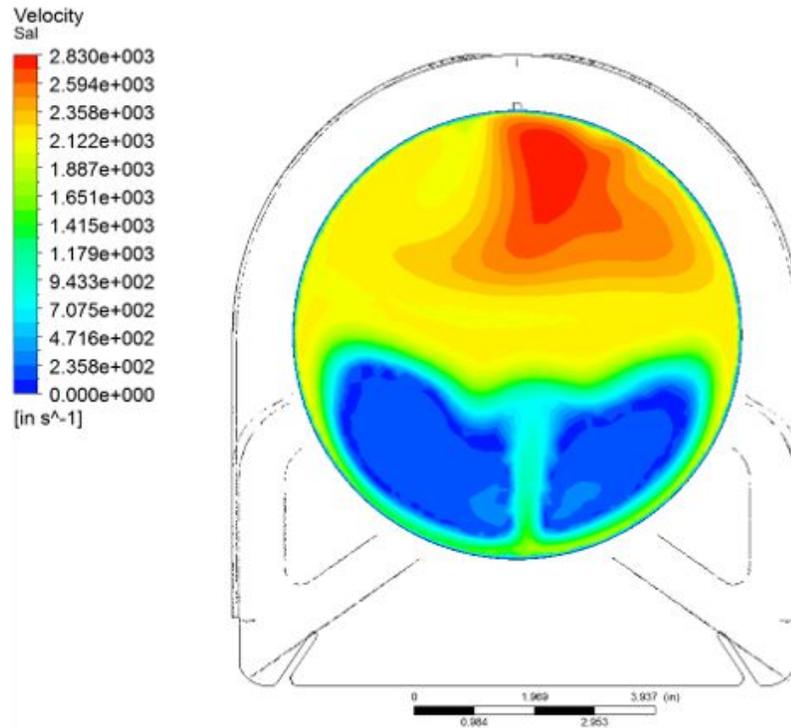


Figura 50 Velocidad de salida, Diseño # 1, Caso 2
Fuente: Elaboración propia

Los resultados del Diseño #2 se muestran en las Figuras 51 y 54. La presión máxima del fluido en el caso #1 es de 0.1842 Psi y la mínima es de -1.7645, mientras que para el caso #2, la presión máxima alcanza los 0.4476 Psi y la mínima los -1.0074 Psi.

Al igual que en el Diseño #1, el comportamiento del fluido mantiene una presión con poca variación en gran parte de su volumen, siendo el cambio de presión más significativo el provocado por el aumento de velocidad en el área del abanico, lo cual se aprecia en las Figuras 53 y 54 de color verde y azul.

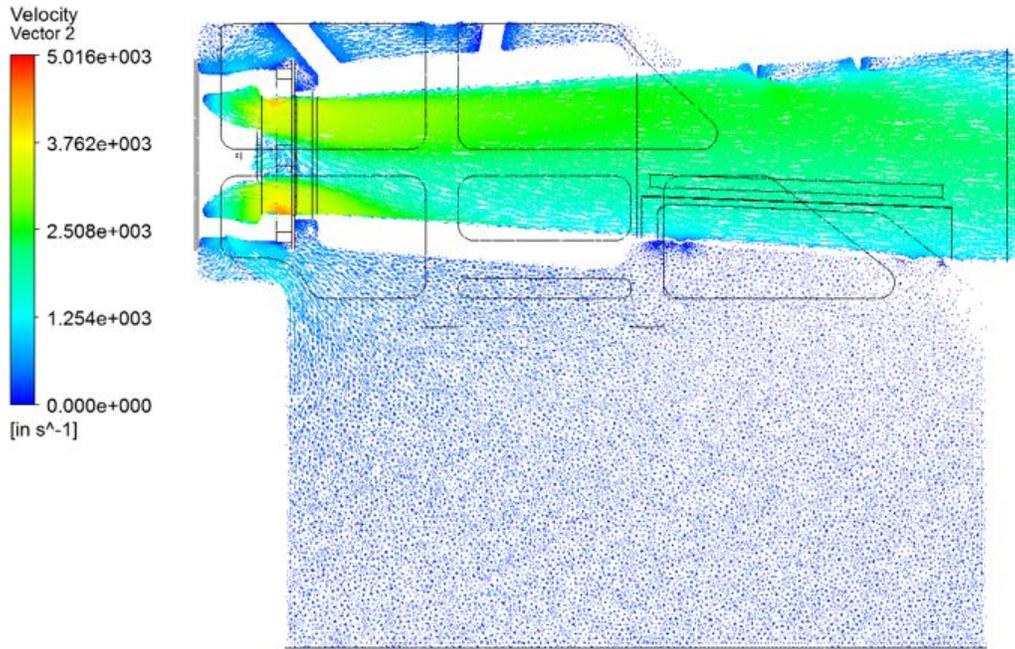


Figura 51 Vectores de velocidad, Diseño #2, Caso 1
Fuente: Elaboración propia

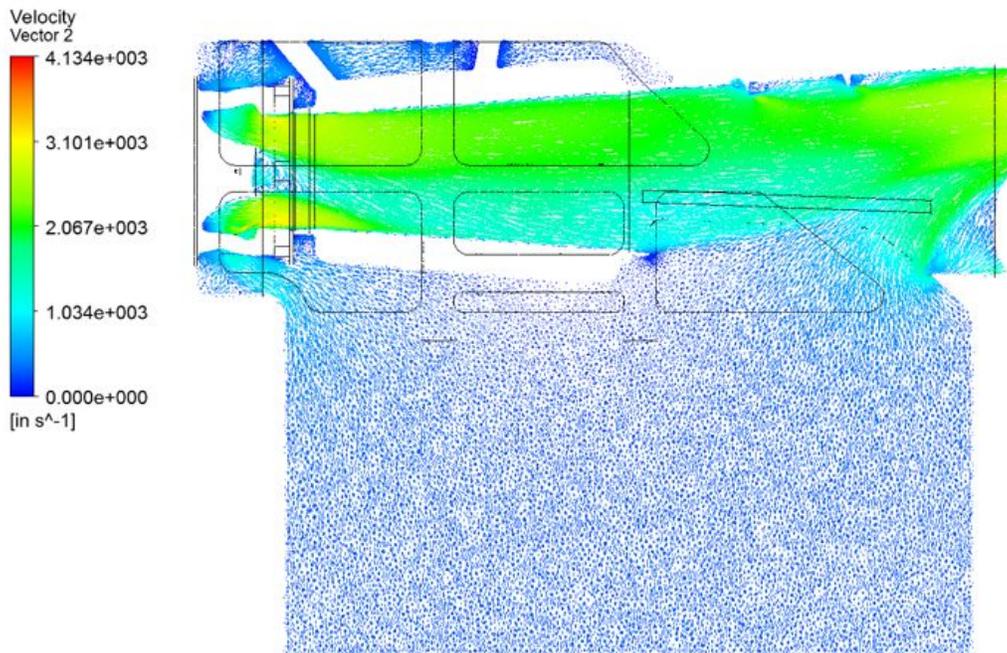


Figura 52 Vectores de velocidad, Diseño #2, Caso 2
Fuente: Elaboración propia

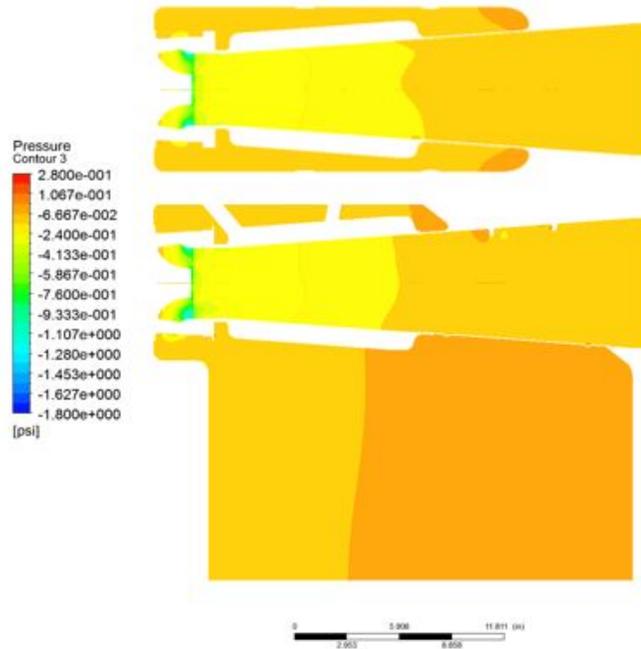


Figura 53 Resultados de presión, Diseño 2, Caso 1
Fuente: Elaboración propia

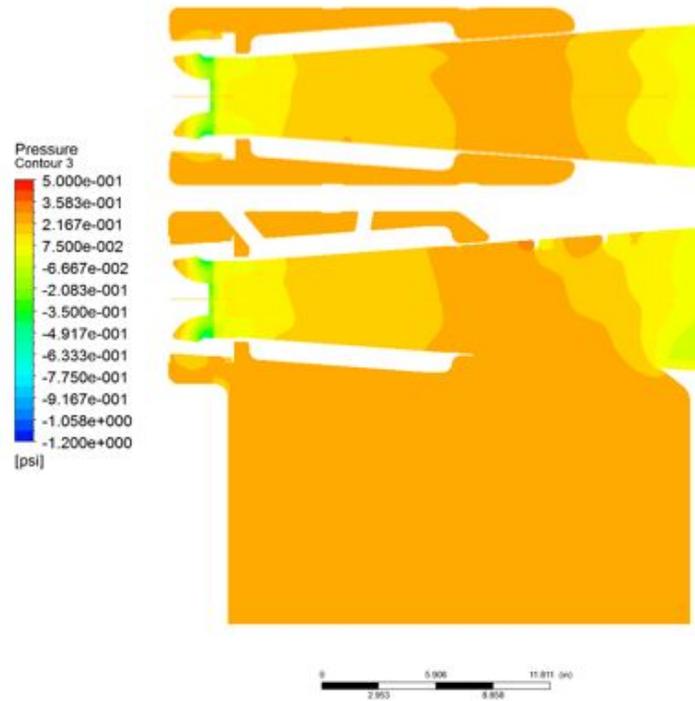


Figura 54 Resultados de presión, Diseño 2, Caso 2
Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 8 se observan los valores de presión y velocidad Máxima y Mínima a la salida del **Plenum**. Valores representados de manera gráfica en las Figuras 55 a 58.

Tabla 8 Presiones de Salida, Diseño #2

Caso	Presión Máxima de salida [Psi]	Presión Mínima de Salida [Psi]	Velocidad Máxima de salida [in/s]	Velocidad Mínima de salida [in/s]
1	0.0011	-0.0014	2261.16	0
2	0.0169	-0.0054	2963.98	0

Fuente: Elaboración propia

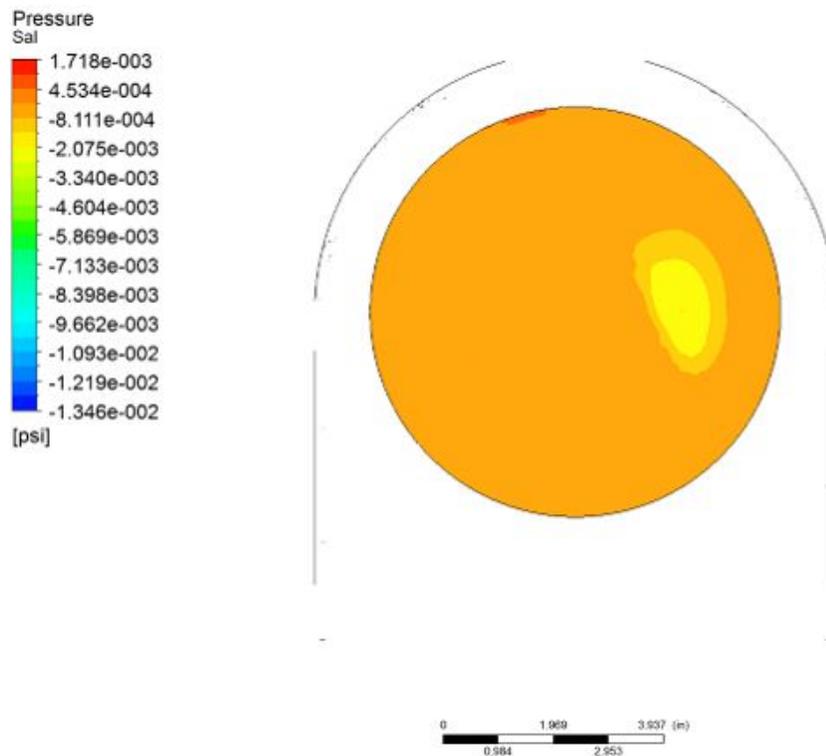


Figura 55 Presiones de salida, Diseño #2, Caso 1
Fuente: Elaboración propia

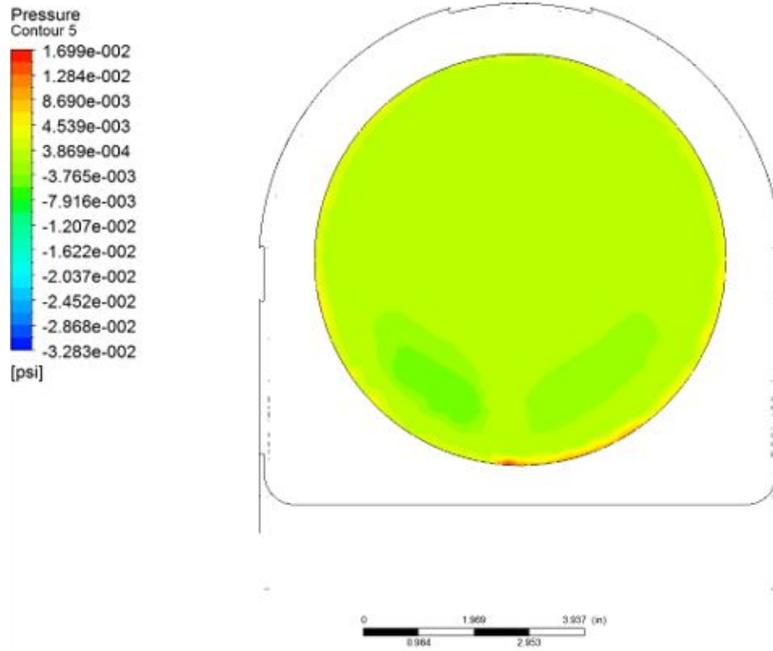


Figura 56 Presión de salida, Diseño #2, Caso 2
Fuente: Elaboración propia

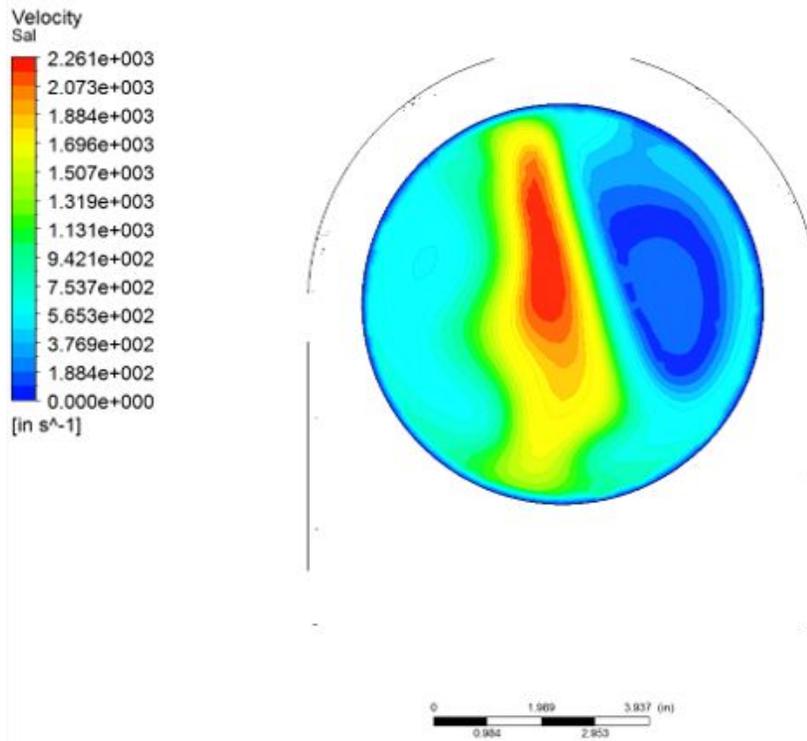


Figura 57 Velocidades de salida, Diseño #2, Caso 1

Fuente: Elaboración propia

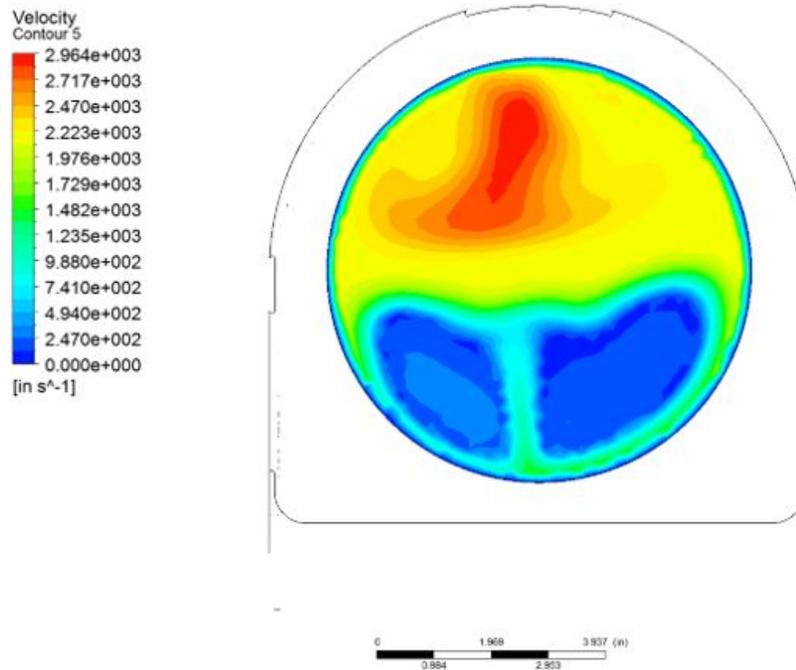


Figura 58 Velocidades de salida, Diseño #2, Caso 2
Fuente: Elaboración propia

Fase 3: Análisis comparativo de resultados

El objetivo de esta fase es el de determinar el impacto del rediseño del **Plenum** del Gulfstream V en los valores de salida de presión, flujo másico y velocidad del fluido con respecto a los valores esperados, para lo cual se realizaron dos actividades.

Actividad 1: Comparación de valores

En las Figuras 59, 60 y 61 se muestran de manera gráfica los valores Máximos y Mínimos de presión y velocidad encontrados como resultado de análisis del Caso 1 para cada uno de los diseños analizados en la Fase 1 y 2. No se muestra grafica comparativa de velocidad mínima, ya que, en todos los diseños, la velocidad mínima es de $0 \frac{in}{s}$.

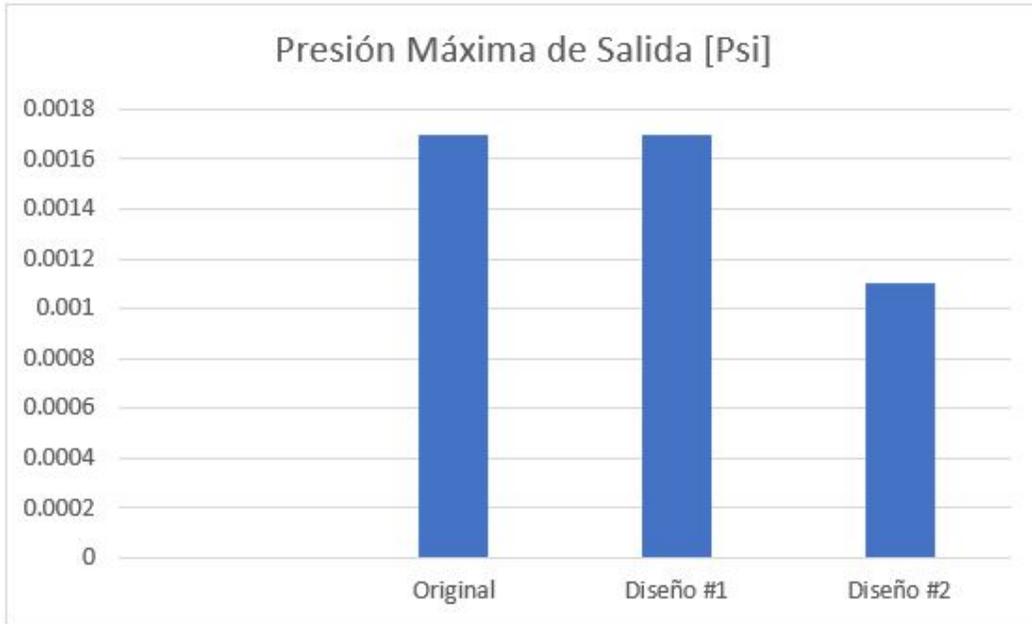


Figura 59 Presiones Máximas de Salida, Caso 1
Fuente: Elaboración propia

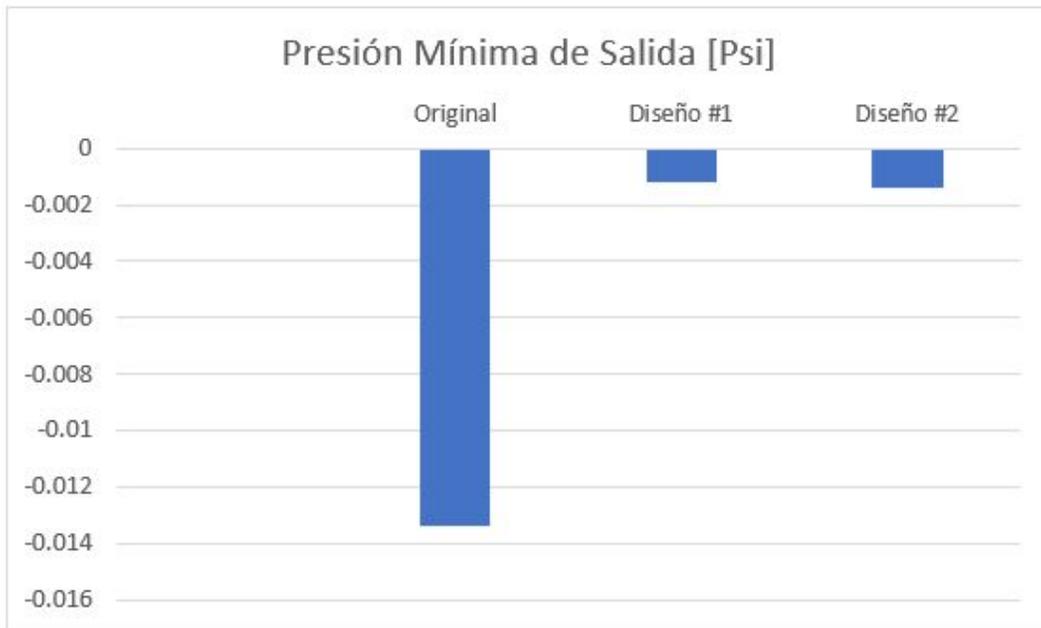
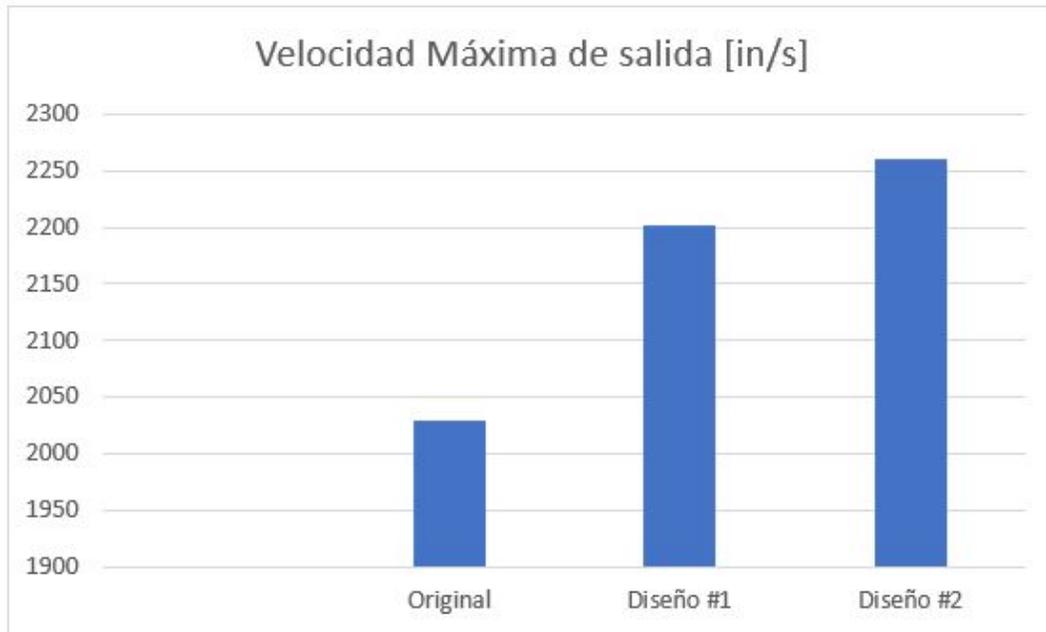


Figura 60 Presiones Mínimas de Salida, Caso 1
Fuente: Elaboración propia



*Figura 61 Velocidades Máximas de Salida, Caso 1
Fuente: Elaboración propia*

Para el Caso 1, en la presión máxima, el diseño original y el Diseño #1 comparten el mismo valor, mientras que el Diseño # 2, varía un 64.7% con respecto al valor original, esto se puede apreciar en la Figura 59.

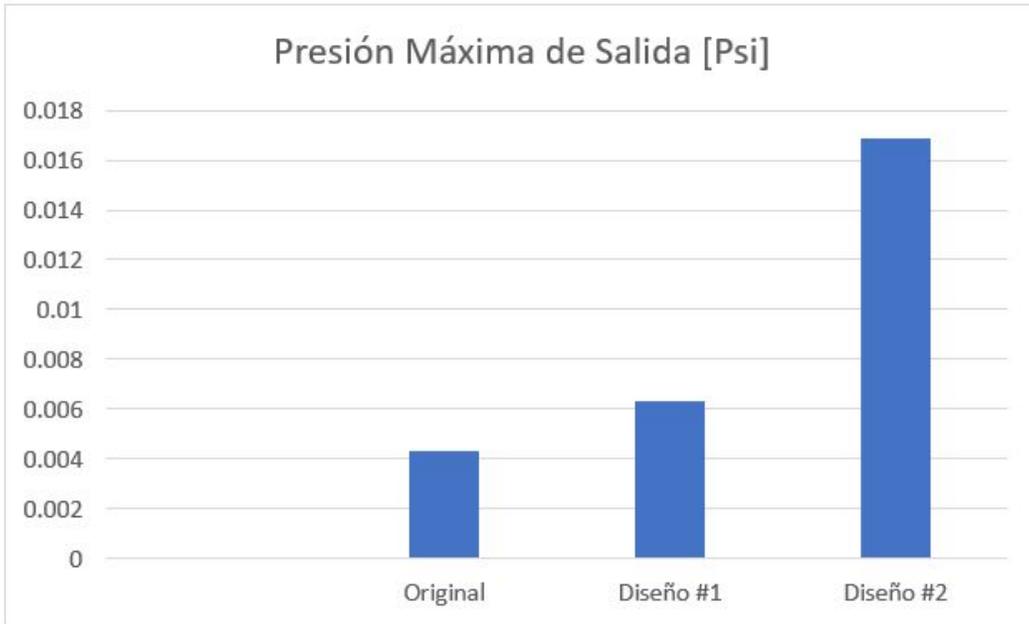
En la Figura 60 que representa las presiones mínimas, se aprecia una mayor diferencia entre los valores. Comparando el valor obtenido del diseño original con el Diseño #1, tenemos una variación del 91%, y para el Diseño #2 la variación es del 89.5%.

En cuanto a las velocidades máximas del Caso 1, el Diseño #1 tiene una variación del 8% y el Diseño #2, de 11.5% con respecto al original, mostrado en la Figura 61.

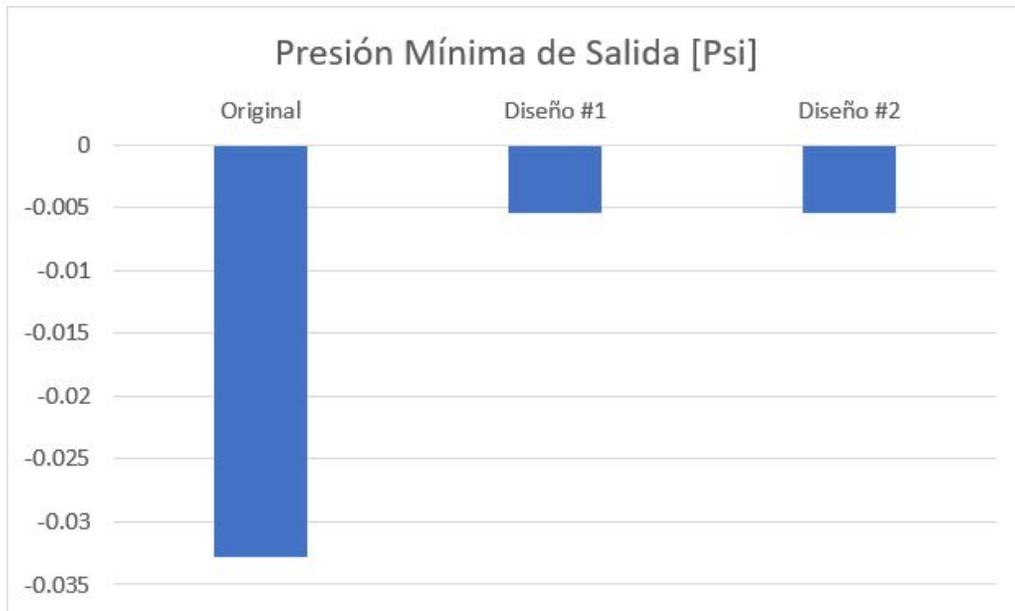
Para el Caso 2, el Diseño #1 varía en un 46.5 % en presión máxima mientras que el Diseño # 2, varía un 293% con respecto al valor original, esto se puede apreciar en la Figura 62.

En la Figura 63 que representa las presiones mínimas, tenemos una variación del 83.5% para ambos diseños.

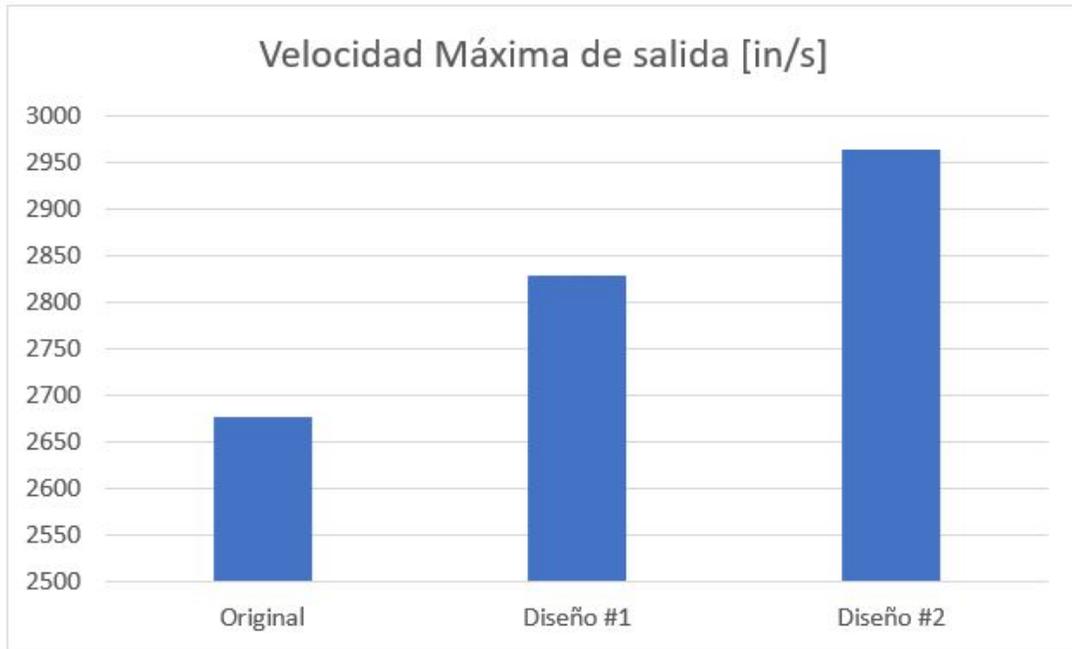
En cuanto a las velocidades máximas del Caso 1, el diseño #1 tiene una variación del 5% y el Diseño #2, de 10% con respecto al original, mostrado en la Figura 64.



*Figura 62 Presiones Máximas de Salida, Caso 2
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 63 Presiones Mínimas de Salida, Caso 2
Fuente: Elaboración propia*



*Figura 64 Velocidades Máximas de Salida, Caso 2
Fuente: Elaboración propia*

Actividad 2: Análisis de resultados de comparación

Es necesario establecer un criterio del significado de los valores encontrados para poder identificar mejoras en el desempeño del **Plenum** en los nuevos diseños a validar.

Debido a la función de este componente, se busca que tenga una presión mayor a la salida, ya que una presión negativa con respecto a la absoluta nos indica succión y la función del **Plenum** es expulsar el aire del ECS que no será recirculado. Por otro lado, una velocidad alta a la salida del **Plenum** nos indica que existe una menor oposición por parte del **Plenum** a la expulsión del aire y por tanto el componente es más eficiente.

En la Tabla 9 se muestran los valores encontrados como resultado de fases pasadas. Los valores dentro del recuadro azul representan el comportamiento del **Plenum** actual, mientras que los valores marcados de color verde superan o igualan al diseño y los valores de color rojo muestran deficiencia del diseño actual con respecto al criterio antes definido.

Tabla 9 Análisis de valores encontrados

Caso	Diseño	Presión Máxima de salida [Psi]	Presión Mínima de Salida [Psi]	Velocidad Máxima de salida [in/s]	Velocidad Mínima de salida [in/s]
1	Original	.0017	-0.0134	2029.53	0
2	Original	.0043	-0.0328	2676.99	0
1	Diseño #1	0.0017	-0.0012	2200.96	0
2	Diseño #1	0.0063	-0.0054	2829.88	0
1	Diseño #2	0.0011	-0.0014	2261.16	0
2	Diseño #2	0.0169	-0.0054	2963.98	0

Fuente: Elaboración propia

Fase 4: Investigación de costo actual

En esta fase se buscó investigar el costo actual de producción del **Plenum** del Gulfstream V para utilizar en comparaciones posteriores. Para cumplir con este objetivo se realizaron dos actividades.

Actividad 1: Obtención de costos de producción

Con la ayuda del ingeniero de soporte de producción, se consiguió información de producción del **Plenum** del Gulfstream V.

La información de producción encontrada en el sistema se reduce a noviembre y diciembre de 2017 y enero a noviembre de 2018.

En la Tabla 10 se muestran los datos encontrados considerando los costos de material y producción del año 2018 y la demanda de este mismo año que fue de 212 **Plenums**.

El costo del número de parte 2215478-1 representa el costo de producción de la pieza actual de compuesto, incluyendo labor y materiales y el costo del número de parte 2215609-1 representa los costos del labor y material de los demás componentes necesarios para completar el ensamble del **Plenum**.

Tabla 10 Costos Actuales (2018)

Descripción	Numero de parte	Costo Unitario
Plenum de compuesto	2215478-1	\$3,331.94
Ensamble	2215609-1	\$1,744.97

Fuente: Elaboración propia

Actividad 2: Cálculo de costo por **Plenum**

Como se muestra en la Tabla 10, al sumar el precio de producción de la pieza de compuesto, la producción y ensamble de todos los componentes del **Plenum** y los materiales utilizados, obtenemos un costo total por **Plenum** de \$5,076.91.

Fase 5: Análisis comparativo de proveedores

En esta fase, por medio de cinco actividades, se buscó identificar a los proveedores en la región que tienen las capacidades para fabricar el diseño del **Plenum** del Gulfstream V con el precio más competitivo.

Actividad 1: Identificación de proveedores actuales

Durante esta actividad, se investigó sobre los proveedores actuales de *Honeywell* que tienen la capacidad de fabricar un “*casting*” de aluminio y que proveen actualmente algún producto similar a la compañía. Los proveedores encontrados fueron:

- *Carley Foundry, Inc.*
- *Aviocast*

Ambas empresas se encuentran fuera de México, la primera ubicada en Blaine, MN y la segunda en Taichung City, Taiwán.

Actividad 2: Investigación de proveedores

Para esta actividad se buscaron proveedores locales que contaran con la capacidad de elaborar un molde de fundición de aluminio y la capacidad de realizar las piezas de

fundición, esto se llevó a cabo con ayuda del departamento de compras de *Honeywell* MRTC.

Los proveedores con los que se logró contacto en la región son:

- UPM *Casting*
- SIGMA

Actividad 3: Cotización

Debido a las políticas de *Honeywell*, no fue posible compartir información de los diseños propuestos con los proveedores con los que aún no se tiene relación comercial. Es por esto que UPM *Casting* y SIGMA, fueron descartadas para una cotización en este punto del proyecto.

Respecto a los proveedores con los que ya se tiene una relación comercial, no fue posible recibir una cotización actualizada a tiempo, es por esto que, para fines comparativos de costos, se utilizaron cotizaciones obtenidas durante el 2016 de estos proveedores, considerando un ajuste a los precios cotizados debido a la inflación.

El cambio de costos debido a la inflación, se calculó considerando los porcentajes de inflación registrados durante los años 2016, 2017 y 2018, mostrados en la Tabla 11, lo cual fue calculado en base a la siguiente fórmula:

$$P_n = \sum(P (1 + i))$$

Donde,

P_n = Costo total con inflación

P = Costo base

i = Valor de inflación

Tabla 11 Porcentajes de inflación

Año	% de inflación registrado
2016	2.1
2017	2.1
2018	1.9

Fuente: Elaboración propia

Como resultado de los ajustes a las cotizaciones, en la Tabla 12 se muestran los costos de fabricación del molde y piezas de fundición, correspondientes a los dos proveedores mencionados en esta misma Tabla.

Tabla 12 Costos cotizados

Proveedor	Costo de molde (Dólares)	Costo por pieza (Dólares)	
		Cantidad	Precio Unitario
Carley Foundry, Inc.	\$114,443.9	50	\$1,924.7
		100	\$1,768.7
		200	\$1,716.6
		NA	\$2,080.8
Aviicast	\$139,413.5	NA	\$2,080.8

Fuente: Elaboración propia

Para obtener el ensamble completo del **Plenum** con los nuevos diseños, se consideraron todos los procesos de manufactura involucrados, como es la soldadura en caso del Diseño #2 (Lizárraga, 2019), el remachado para el Diseño #1 (Dávila, 2019), entre otros. Para lo cual, con ayuda de los ingenieros de manufactura de las respectivas áreas de ISC, se consiguió un estimado de horas de labor requeridas para llevar a cabo los procesos necesarios.

En la Tabla 13 se presentan las operaciones de manufactura requeridas para cada uno de los diseños y su costo, incluyendo costos de material. Los procesos fueron cotizados en horas por parte de ISC y para obtener un monto monetario, se

multiplicaron estas horas de labor por el costo de producción actual que es de \$31.40 dólares/hora.

Tabla 13 Costos de producción

Diseño	Remachado (horas)	Soldadura (horas)	Corte, Doblado y Maquinado (horas)	Total (horas)	Materiales	Anodizado	Total
#1	7.3	0	27	25.35	\$72.49	\$300	\$1,168.48
#2	3.5	3	27	24.5	\$67.94	\$300	\$1,137.24

Fuente: Elaboración propia

Honeywell no cuenta con las capacidades para realizar el proceso de Anodizado mencionado en la Tabla 13, el costo de \$300 dólares es el precio del proveedor actual de *Honeywell* por lote, el cual depende del tamaño de la pieza, es por esto que para la cotización se consideró este precio como el de cada pieza, considerando así el caso de costo máximo de las piezas.

Actividad 4: Comparación

De acuerdo a lo establecido en la Actividad anterior, los costos de producción de los nuevos diseños se diferencian principalmente por el proceso de unión, que para el Diseño #1 es el remachado y para el #2 soldadura, como se observa en la Tabla 13.

El costo total de producción del Diseño #1, donde se considera el componente moldeado por fundición, materiales y procesos es de \$3,093.18 por pieza, mientras que para el Diseño #2, el costo es de \$3,061.94.

Actividad 5: Análisis de comparación

Debido a los costos encontrados, mostrados en la Tabla 14, se observa que el costo del Diseño #2 es menor por \$31.24 dólares con respecto al Diseño # 1, por lo cual el Diseño #2 representa una mejor opción para ahorro de costos.

Tabla 14 Costos Estimados

Diseño	Costo total de producción estimado
--------	------------------------------------

1	\$3,093.18
2	\$3,061.94

Fuente: Elaboración propia

Fase 6: Análisis comparativo de costos

En esta última fase, se realizaron dos actividades con el fin de calcular el impacto económico que tiene para *Honeywell* el cambio de proceso de fabricación del **Plenum** del Gulfstream V.

Actividad 1: Comparación de costos

De acuerdo a lo establecido en la fase 4, el costo actual de fabricación del **Plenum** del Gulfstream V es de \$5,076.91, mientras que el menor costo encontrado con los nuevos diseños es el correspondiente al Diseño #2 y es de \$3,061.94 dólares por pieza.

Actividad 2: Cálculo de ahorro

Comparando los costos mencionados en la actividad anterior, se obtiene un ahorro por **Plenum** de \$2,014.97 dólares, lo cual representa un 39.68% de ahorro y considerando la demanda de 322 **Plenums** proyectada para 2019, se estima un ahorro anual de \$648,820.34 dólares. Esto sin considerar el costo del molde, que al restarlo resulta en un ahorro total estimado de \$534,376.44 dólares proyectados a la producción de 2019.

Capítulo 5

4.1 Conclusiones

4.1.1 Conclusiones Generales del proyecto

Con la realización de este proyecto, el cual tiene como objetivo general validar y evaluar mediante un análisis de fluidos que las geometrías de los diseños propuestos para el **Plenum** del Gulfstream V cumplan o superen los valores esperados en cuanto a presión, flujo másico y velocidad del fluido que a su vez permita reducir el costo de fabricación con respecto al diseño actual, se logró calcular los rangos de valores mínimos a cumplir en cuanto a presión y velocidad de salida del fluido por medio de un análisis de fluidos del diseño del **Plenum** actual, además de definir un criterio de la funcionalidad del componente con respecto a estos valores para identificar mejoras en el desempeño del **Plenum** como producto de los cambios de diseño propuestos,

Al igual que para el diseño actual, por medio un análisis de fluidos se encontraron los valores de salida de presión y velocidad del flujo para los nuevos diseños propuestos, y utilizando el criterio de funcionalidad antes mencionado, se encontró que, en ambas propuestas de diseño, el fluido muestra una menor oposición a ser expulsado del **Plenum**, lo que se traduce en una mejor funcionalidad del componente.

Por parte de costos, se calculó una aproximación de los costos de producción de los nuevos diseños, considerando los cambios de procesos de manufactura propuestos, materiales y horas de labor que estos nuevos procesos requerirían por parte de ISC con el fin de obtener un monto de ahorro total. Para los costos de producción de la pieza de fundición y moldeo, se utilizaron cotizaciones obtenidas durante el 2016 para un diseño muy similar y de mayor volumen (Hernández, 2019) ya que no fue posible por cuestión de tiempo obtener cotizaciones nuevas, dichas cotizaciones fueron ajustadas de acuerdo a la inflación para una mejor aproximación del costo de las estructuras.

Con todo esto se estimó un ahorro de producción de \$2,014.97 por **Plenum**, lo cual debido a la demanda proyectada de 2019 de 322 **Plenum**, se traduce en un ahorro anual de \$534,376.44.

De acuerdo a estos resultados, se comprobó la Hipótesis #1 que establece que mediante un análisis de fluidos se puede validar que las propuestas de diseño del **Plenum** del Gulfstream V cumplen con los valores esperados de presión, flujo másico y velocidades del fluido.

Por otro lado, la Hipótesis #2 fue parcialmente comprobada ya que se encontró que la selección de procesos de manufactura mejora el costo de producción del **Plenum**, sin embargo, no fue posible validar esto con un proveedor local.

4.1.2 Aportaciones

Las aportaciones de estas áreas de investigación al proyecto fueron las siguientes:

- Por medio de análisis de fluidos, se definió el comportamiento del fluido dentro del diseño del **Plenum** actual.
- Por medio de análisis de fluidos, se definió el comportamiento del fluido dentro de las dos propuestas de diseño.
- Se definió un criterio de mejora del desempeño del componente en base a los resultados de los análisis de fluidos.
- Se obtuvieron cotizaciones por parte del departamento de Manufactura Avanzada de ISC para la realización de los procesos de corte, maquinado, remachado y soldadura.
- Se calculó una estimación de costos y ahorro que la implementación de estos diseños representaría para la compañía.

4.1.3 Limitaciones

Se identificaron limitaciones para la obtención de cotizaciones por parte de proveedores que no cuentan con una relación comercial con *Honeywell* debido a las políticas del manejo de información que maneja la compañía y también se encontró como limitación, el tiempo de respuesta de los proveedores actuales de *Honeywell*.

4.1.4 Recomendaciones

Con el propósito de lograr una mejor estimación de costos, se recomienda someter ambas propuestas de diseño al proceso de “subasta” de *Honeywell*, donde se evalúa de manera exhaustiva que proveedores a nivel global son los que ofrecen los mejores

costos y en base a eso decidir qué proveedor es el indicado para manufacturar los componentes.

El diseño actual del Plenum del Gulfstream V no fue validado por análisis de fluidos ya que no existe un requerimiento específico al respecto por parte del cliente final, sin embargo debido a los hallazgos de este proyecto se identificó el comportamiento de los fluidos dentro del Plenum del Gulfstream V como un área de oportunidad ya que como se puede observar en los resultados aquí presentados, ambas propuestas de diseño superaron el desempeño del diseño actual, razón por la cual se recomienda implementar la validación de todas las áreas con el fin de optimizar los diseños, exista o no un requerimiento por parte del cliente final.

4.1.5 Líneas de investigación futuras

Con el fin de buscar optimizar los resultados del proyecto se propone a futuro atacar las siguientes líneas de investigación:

- Evaluar los diseños actuales de distintos **plenums** y analizarlos con el fin de optimizar su funcionalidad, reducir peso y costo. Es decir, replicar el proceso de rediseño mostrado en este proyecto global.
- Durante el proceso de selección de materiales, se encontró el Magnesio como una opción para reducción aun mayor de peso. El material fue descartado debido a la complejidad y los riesgos que implica su maquinado ya que es un material de fácil ignición. Por lo cual se considera importante realizar una investigación acerca de las opciones más seguras que se tienen para el mecanizado y manejo de este material.
- El análisis de fluidos no es parte de la validación de componentes como los plenums, y debido a las deficiencias del diseño actual encontradas mediante este proceso de análisis, se considera un área de oportunidad el validar por fluidos estos componentes con el fin de optimizar el diseño durante etapas tempranas de su desarrollo.

4.2 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 última (Martínez, 2019), el peso total de Diseño 1 (Dávila, 2019) y Diseño 2 (Lizárraga, 2019), el Costo de cada diseño de acuerdo a los procesos de manufactura con base en esta investigación y la funcionalidad del Análisis Computacional de Fluidos con base en esta investigación. Se le asignó una ponderación en porcentaje de acuerdo a las prioridades establecidas durante la junta con los clientes.

Tabla SEQ Tabla * ARABIC 15. 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	\$2,980.29	Excede 4 de 4 parámetros
Diseño 2	3.05	11.08	\$2,954.14	Excede 3 de 4 parámetros

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 SEQ Tabla * ARABIC 16. 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%

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 SEQ Tabla * ARABIC 17. 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 (Martínez, 2019)

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

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

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

Tabla SEQ Tabla * ARABIC 18. 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	2,954.14	Excede 3 de 4 parámetros

Fuente: Elaboración propia

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

Referencias

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.

Kadambi, V. y Prasad, M. (2015). Turbomaquinaria. Estados Unidos: New Academic Science. Recuperado de:

<https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt011NQLD4/turbomachinery-3rd-edition/aerodynamic-thermal-design>

Hassan, M., Othman, A. y Kamaruddin, S. (2017). A review on the manufacturing defects of complex-shaped laminate in aircraft composite structures. Reino Unido: International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 91(9–12), 4081–4094. Recuperado de: <http://doi.org/10.1007/s00170-017-0096-5>

Baran, I., Cinar, K., Ersoy, N., Akkerman, R., y Hattel, J. (2017). A Review on the Mechanical Modeling of Composite Manufacturing Processes. Archives of Computational Methods in Engineering, 24(2), 365–395.

<http://doi.org/10.1007/s11831-016-9167-2>

Honeywell Aerospace (1996). DETAIL SYSTEM SPECIFICATION FOR GULFSTREAM V ENVIRONMENTAL CONTROL SYSTEM. [Especificación de sistema]. Copia en posesión del autor de este trabajo.

Gundlach, J. (2012). Designing Unmanned Aircraft Systems - A Comprehensive Approach. Estados Unidos: American Institute of Aeronautics and Astronautics. Recuperado de:

<https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpDUASACA1/designing-unmanned-aircraft/designing-unmanned-aircraft>

Nebraska Workforce Department (2019). Calculating Inflation Factors for Cost Estimates. Estados Unidos: City of Lincoln. Recuperado de:

<https://lincoln.ne.gov/city/ltu/engine/dconst/gpp/.../inflation.pdf>

- Amadeo, K. (2019). US inflation Rate by Year from 1929 to 2020 Recuperado de:
<https://www.thebalance.com/u-s-inflation-rate-history-by-year-and-forecast-3306093>
- American Meteorological Society (2012). Glossary of meteorology: Eddy viscosity
Recuperado de: http://glossary.ametsoc.org/wiki/Eddy_viscosity
- Anderson, J. (2001). Fundamentals of Aerodynamics (3era ed.). Nueva York:
McGraw-Hill.
- Singh, U., Dwivedi, M. (2009). Manufacturing Processes (2nda ed.). New Delhi: New
Age International Publishers.
- Xu P., Jiang H., Zhao X. (2016). CFD Analysis of a Gasoline Engine Exhaust Pipe.
Recuperado de:
<https://www.omicsonline.org/open-access/cfd-analysis-of-a-gasoline-engine-exhaust-pipe-2168-9873-1000198.pdf>
- Teja, M. A., Ayyappa, K., Katam, S., & Anusha, P. (2016). Analysis of Exhaust Manifold
using Computational Fluid Dynamics, 3(1), 1–16.
- Yan, Z., Zhien, L., Wang, X., Zheng, H., & Xu, Y. (2014). Cracking Failure Analysis and
Optimization on Exhaust Manifold of Engine with CFD-FEA Coupling.
Recuperado de: <https://doi.org/10.4271/2014-01-1710>
- Durat, M., Parlak, Z., Kapsiz, M., & Parlak, A. (2013). CFD and experimental analysis
on thermal performance of exhaust system of a spark ignition engine, 89–99.
- ANSYS, CFX-Solver Theory Guide. (2009). Recuperado de:
https://www.researchgate.net/profile/Ghassan_Smaisim/post/How_to_solve_below_integral_numerically/attachment/59d6555f79197b80779ac936/AS%3A525446028115968%401502287503696/download/113+Ansys+CFX+Solver+Theory+Guide.pdf

- Dávila, C. (2019). Rediseño para el Plenum del Gulfstream V. Propuesta de diseño 1 para Gulfstream V. Tesis de Maestría. Centro de Enseñanza Técnica y Superior. Mexicali, México.
- Hernández, 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. Tesis de Maestría. Centro de Enseñanza Técnica y Superior. Mexicali, México.
- Lizárraga, H. (2019). Rediseño para el Plenum del Gulfstream V. Propuesta de diseño conceptual 2 del Plenum del Gulfstream V orientada al DFMA y reducción de peso. Tesis de Maestría. Centro de Enseñanza Técnica y Superior. Mexicali, México.
- Martínez, C. (2019). Rediseño para el Plenum del Gulfstream V. Análisis de Elemento Finito para Plenum de Gulfstream V. Tesis de Maestría. Centro de Enseñanza Técnica y Superior. Mexicali, México.