

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Tesis/Proyecto de Ingeniería e Innovación

**Reducción de peso en el motor TPE331-10 mediante la utilización del
Diseño para Manufactura Aditiva**

para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería e Innovación

Presenta

Mariana Cabrera Figueroa

Director de proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

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

Asesor Industria: Oscar Álvarez Armenta

Mexicali, Baja California. Marzo de 2019

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Tesis/Proyecto de Ingeniería e Innovación

**Reducción de peso en el motor TPE331-10 mediante la utilización del
Diseño para Manufactura Aditiva**

para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería e Innovación

Presenta

Mariana Cabrera Figueroa

Director de proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

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

Asesor Industria: Oscar Álvarez Armenta

Mexicali, Baja California. Marzo de 2019

CENTRO DE ENSEÑANZA TÉCNICA Y SUPERIOR



Colegio de Ingeniería
Dirección de Posgrado
Campus Mexicali

Tesis/Proyecto de Ingeniería e Innovación

**Reducción de peso en el motor TPE331-10 mediante la utilización del Diseño para
Manufactura Aditiva**

para obtener el grado de

Maestro en Ingeniería e Innovación

Presenta

Mariana Cabrera Figueroa

Director de proyecto: Dra. Dania Licea Verduzco

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

Asesor Industria: Oscar Álvarez Armenta

Comité evaluador:

—
Dr. Alan Humberto
Escamilla Rodríguez

—
Dr. Juan Ignacio
Rodríguez del Prado

—
Dr. Miguel A. Ponce
Camacho

Mexicali, Baja California. Marzo de 2019

Agradecimientos

Quiero agradecer a Honeywell, por otorgarme la oportunidad de estudiar un posgrado en una modalidad que me permitió llevar mi trabajo y mi vida académica de la mano. Agradezco todo el apoyo y trabajo de la Coordinadora de Entrenamientos Esthibaly Salazar, para lograr que este programa fuera un éxito en nuestra empresa. Ha sido una oportunidad increíble.

Quiero agradecer también al equipo del TPE331 por brindarme su apoyo, su tiempo y sus conocimientos para la realización de este proyecto. A Jose Luis Cañez, *Design Lead* del TPE331, quien fue clave para poder recibir respuesta de nuestras contrapartes en Phoenix cuando se necesitaban datos o fotografías que no estaban a nuestro alcance aquí en Mexicali.

En especial, a mi compañera y amiga Perla Perez, quien compartió su *expertise* y conocimientos de las piezas trabajadas en este proyecto y que no solo me brindó apoyo profesional, sino también sus consejos y paciencia durante las largas horas de trabajo para lograr que este trabajo se realizara exitosamente.

A Rocío Chávez, por ser paciente conmigo y por siempre darme su apoyo como mentora y amiga. A Ricardo Gonzalez, por auxiliarme con conocimientos de Manufactura Aditiva y siempre tener tiempo para brindarme su ayuda y su amistad.

A mi mamá, por siempre mandarme buenas vibras, hacerme sentir mejor y visitarme de muy lejos para verme hacer tarea o avanzar en mi proyecto.

Finalmente, a la Dra. Dania Licea, por todo su apoyo, comprensión y motivación durante la documentación del proyecto.

Carta Institucional



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

Mexicali, 8 de marzo de 2019

Dirección de Posgrado

Campus Mexicali

A QUIEN CORRESPONDA:

Por medio del presente, hago constar que el proyecto:


“Reducción de peso en el motor TPE331-10/12 mediante la utilización del Diseño para Manufactura Aditiva”

Es aceptado y se considera relevante para la empresa, aportando valor al desarrollo técnico y construyendo conocimiento para la compañía.

Dicha investigación será desarrollada por la colaboradora **Mariana Cabrera Figueroa**, estudiante de **Maestría en Ingeniería e Innovación**.

ATENTAMENTE


Estibaly C. Salazar González
Coordinadora de Posgrado


HONEYWELL INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA
S. DE R.L. DE C.V.
Calzada del Oro #1755, Paredón 1.2
Colonia Dos División 2, Mexicali, BC
C.P. 21399
México

Índice

Agradecimientos	i
Carta Institucional.....	ii
Índice.....	iii
Índice de Figuras.....	v
Acrónimos	vii
Resumen.....	viii
I. Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	13
1.2. Justificación.	19
1.3. Planteamiento del problema.	21
1.4. Preguntas de investigación.....	23
1.5. Problemática.....	24
1.6. Objetivo general.....	25
1.7. Objetivos específicos.	25
1.8. Hipótesis.	26
II. Capítulo 2: Marco teórico y referencial.....	27
2.1. Marco teórico.....	27
2.2. Marco Referencial.....	41
III. Capítulo 3: Metodología	44
3.1. Procedimiento.....	44
3.2. Planeación.....	48
3.3. Cronograma.....	50
3.4. Recursos.....	53
IV. Capítulo 4: Resultados.....	56
4.1. Fase 1: “Identificación y análisis de restricciones de operación, diseño y manufactura”.....	56
4.2. Fase 2: “Diseño de geometría”	62
4.3. Fase 3: “Reducción de peso”	66
4.4. Fase 4: “Iteraciones”	68
4.5. Fase 5: “Impresión de geometría propuesta”	73

V. Capítulo 5: Conclusiones, Discusión y Recomendaciones	80
5.1 Conclusiones	80
5.2 Discusión	86
5.3 Recomendaciones	88
Referencias	89
Anexo I	93
Anexo II	94
Anexo III	95

Índice de Figuras

Figura 1. Unidades de Negocio de Honeywell.	1
Figura 2. Distintos modelos de motores Honeywell.	3
Figura 3. TPE331.	4
Figura 4. Turbine Bearing Support (A) y Exhaust Nozzle (B).	4
Figura 5. Esquema de interacción entre Diseño, Proyectos e ISC. Fuente: Elaboración propia	6
Figura 6. Pesos de los TPE331-10YGD producidos en 2018.	9
Figura 7. Porcentaje de conformidades, inconformidades y riesgos de inconformidad en los pesos de la producción del TPE331-10YGD de 2018.	10
Figura 8. Esquema de la creación de un nuevo diseño para Manufactura Aditiva.	11
9. STELIA Aerospace.	14
Figura 10. Ejemplo de cortes realizados para reducción de peso.	16
Figura 11. Cordón de soldadura que causa falla en flujo.	18
Figura 12. Impresión simultánea de 12 tubos de una sola pieza.	18
Figura 13. Costo en USD del re-trabajo de motores TPE331 en 2018.	20
Figura 14. Turbine bearing support.	22
Figura 15. Exhaust Nozzle.	23
Figura 16. Esquema básico de un motor Turbohélice.	28
Figura 17. Construcción "Capa por Capa" de un modelo 3D mediante AM.	31
Figura 18. Proceso de impresión.	32
Figura 19. Parte funcional optimizada que no ha sido diseñada para AM requiere de mucho material de soporte.	34
Figura 20. La fusión de polvo encima de metal sólido permite el rápido enfriamiento. En regiones excedentes, sobre polvo sin derretir, el enfriamiento es más lento.	35
Figura 21. Diferentes orientaciones para un diseño.	36
Figura 22. Ejemplos de local mínima.	37
Figura 23. Local mínima en agujeros laterales y diagonales.	37
Figura 24. Interacción entre la escobilla de la impresora y el eje inclinado de un componente.	38
Figura 25. Alternativas de chamfer para sustituir excedentes horizontales.	39
Figura 26. Alternativas para eliminar material de soporte.	40
Figura 27. Optimización topológica.	40
Figura 28. Comparación de componente fabricado por fundición vs componente fabricado con AM.	43
Figura 29. Fases del proceso a seguir durante el proyecto. Fuente: Elaboración propia.	45
Figura 30. Cronograma. Fuente: Elaboración propia	50
Figura 31. Checklist para dar inicio a la tarea.	57
Figura 32. Zonas críticas del Exhaust Nozzle.	59
Figura 33. Vista de sección transversal del Exhaust Nozzle que muestra el "anulus" (circulado en rojo). Fuente: Elaboración propia.	60
Figura 34. Zonas críticas del Bearing Support.	61
Figura 35. Zonas problemáticas para impresión del Bearing Support.	61
Figura 36. Zonas problemáticas para impresión del Exhaust Nozzle.	62

Figura 37. Unión para visualización del Turbine Bearing Support y el Exhaust Nozzle.	63
Figura 38. Vista de sección transversal de la unión preliminar del Turbine Bearing Support y el Exhaust Nozzle. A) Arreglo para el sensor de presión P5 y B) Claro entre ambos componentes	63
Figura 39. Izquierda: Arreglo para conexión de sensor de presión original. Derecha: Arreglo para conexión del sensor de presión propuesto con DfAM.....	64
Figura 40. Primera propuesta de geometría. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 41. Resultados de fase 3.....	66
Figura 42. Zonas donde se añadió stock.....	70
Figura 43. Modelo resultante de etapa 4.....	70
Figura 44. Sección transversal de modelo resultante de etapa 4.....	71
Figura 45. Modelo resultante de etapa 3 (izquierda) VS Modelo resultante de etapa 4 (derecha). Fuente: Elaboración propia.....	71
Figura 46. Modelo 3D después del post procesamiento.....	72
Figura 47. Modelo 3D después del post procesamiento.....	72
Figura 48. Modelo 3D después del post procesamiento.....	73
Figura 49. WRS generado para impresión de las piezas.....	74
Figura 50. Turbine Bearing Support and Exhaust previo al post procesamiento.....	75
Figura 51. Turbine Bearing Support and Exhaust Additive previo al post procesamiento.	76
Figura 52. Turbine Bearing Support and Exhaust Additive después del post procesamiento.	77
Figura 53. Vista superior e inferior del Turbine Bearing Support and Exhaust Additive después del maquinado.....	77
Figura 54. Vistas laterales del Turbine Bearing Support and Exhaust Additive después del maquinado.....	78
Figura 55. Nuevo componente después del post procesamiento.....	78
Figura 56. Comparación entre Exhaust Nozzle original (Izquierda) y el nuevo componente (derecha).....	79
Figura 57. Comparación entre Exhaust Nozzle original (Izquierda) y el nuevo componente (derecha) con conexiones instaladas. Fuente: Elaboración propia.....	79
Figura 58. Cambios en número de piezas entre ensamble original y el nuevo componente.	85

Índice de Tablas

Tabla 1. Planeación.....	48
Tabla 2. Recursos	53
Tabla 3. Recursos	55
Tabla 4. Características principales del Turbine Bearing Support y Exhaust Nozzle	58

Acrónimos

SBU- *Strategic Business Unit* (Unidad Estratégica de Negocios).

APU- *Auxiliary Power Unit* (Unidad de Potencia Auxiliar).

AM- *Additive Manufacturing* (Manufactura Aditiva).

TPE- *Turboprop Engine* (Motor turbohélice).

ISC- *Integrated Supply Chain* (Cadena Integrada de Suministro).

Aero- Se refiere al departamento de Dinámica de Fluidos (aerodinámica) de Honeywell Aerospace.

M&PE- *Materials & Process Engineering* (Ingeniería de Materiales y Procesos).

DfAM- *Design for Additive Manufacturing* (Diseño para Manufactura Aditiva).

USD- *United States Dollars* (Dólares Estadounidenses).

CAD- *Computer Aided Design* (Diseño Asistido por Computadora).

AM Lab- *Additive Manufacturing Laboratory* (Laboratorio de Manufactura Aditiva).

Resumen

Al permitir optimizar geometrías y reducir peso en maneras inalcanzables por métodos de manufactura convencionales, la manufactura aditiva toma un papel cada vez más importante en la industria aeroespacial, pues la disminución de peso y por ende disminución de consumo de combustible, son críticas en aeronaves.

El presente proyecto describe la metodología para el desarrollo de un componente nuevo a partir de la fusión del Turbine Bearing Support y el Exhaust Nozzle del motor turbohélice TPE331-10 de Honeywell Aerospace, componentes que en su configuración original, se conforman de varias piezas soldadas entre sí. Esto se realiza como parte de los esfuerzos realizados por la compañía para eliminar sobrepeso observado en los motores producidos en los últimos años. El objetivo de este esfuerzo en específico, es eliminar por lo menos 1.5 libras del peso del ensamble mediante la utilización del Diseño para Manufactura Aditiva para realizar la fusión de los componentes mencionados.

El proceso para lograr el objetivo se dividió en 5 fases 1) Identificación y análisis de restricciones de operación, diseño y manufactura, 2) Diseño de geometría, 3) Reducción de peso, 4) Iteraciones y 5) Impresión de geometría propuesta.

Los resultados del proyecto mostraron un nuevo componente que gracias a la impresión 3D y al Diseño para Manufactura Aditiva, fusionó satisfactoriamente dos componentes (*Turbine Bearing Support* y el *Exhaust Nozzle*) y logró la reducción del 22.29% del peso total del ensamble de los dos componentes originales.

I. Capítulo 1: Introducción

Honeywell International Inc. es un conglomerado multinacional estadounidense que se dedica a proveer diferentes productos de consumo, servicios de ingeniería y sistemas aeroespaciales a clientes que van desde compradores particulares hasta grandes corporaciones y gobiernos de distintos países.

La compañía se divide en cuatro unidades de negocio, conocidas como Unidades Estratégicas de Negocios (*SBU*, por sus siglas en inglés *Strategic Business Units*), que pueden observarse en la Figura 1.

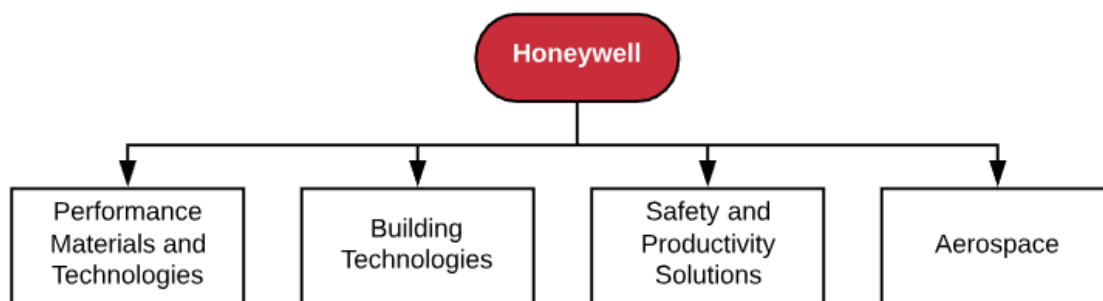


Figura 1. Unidades de Negocio de Honeywell.
Fuente: Elaboración propia.

1- *Performance Materials and Technologies*, cuyos productos incluyen tecnologías para el procesamiento de aceites y gas, combustibles, aditivos, químicos especiales, materiales electrónicos, entre otros; así como consultoría para la industria petroquímica y refinerías.

2- *Building Technologies*, que se encarga de crear productos y servicios que proveen eficiencia energética y seguridad en edificios y comunidades, como lo son sistemas para casas inteligentes, termostatos, sistemas de calidad de aire y tratamiento de agua.

3- *Safety and Productivity Solutions*, cuyos productos incluyen soluciones de escaneo y movilidad como escáneres de códigos de barras, sensores y productos que sirven al “internet de las cosas” y finalmente soluciones de seguridad industrial como equipo de protección de manos, cabeza, ojos, pies y oídos; kits de primeros auxilios y ropa protectora para primeros respondedores.

4- *Aerospace*, produce sistemas de aviónica, sistemas de control ambiental, sistemas de comunicación y de entretenimiento en cabina, entre otros, para aeronaves y sistemas para comunicación y operaciones espaciales como lo son el comando y control de satélites. Además de esto, *Honeywell Aerospace* diseña y produce sistemas de propulsión (motores) y de potencia (Unidades de Potencia Auxiliares, *APU* por sus siglas en inglés) aeronáuticos. Es en esta *SBU* en la que se desarrolla el presente proyecto.

Los sistemas de propulsión que se fabrican (Figura 2) son ampliamente utilizados tanto en la aviación comercial como en la militar. Estos sistemas comprenden diferentes tipos que pueden clasificarse en tres grupos: los motores turbofan HTF7000 y F124, los motores turboeje, como el T55 y AGT1500 y finalmente los motores turbohélice TPE331. Siendo estos últimos el objeto de estudio del presente trabajo.



Figura 2. Distintos modelos de motores Honeywell.
Fuente: Honeywell Aerospace (2015)

El TPE331 es un motor que se diseñó en 1959. Existen 18 modelos, 106 configuraciones diferentes y más de 13,000 unidades entregadas a clientes (*Honeywell Aerospace*, 2018).

Independientemente del modelo o configuración, el motor cuenta con dos secciones principales mostradas en la Figura 3: la caja de engranajes, marcada como “A” y la turbomaquinaria, marcada como “B”. En esta última sección, que es donde ocurre el ciclo termodinámico que permite que el motor funcione y, específicamente en el subensamble de la turbina del motor, se ubican los componentes que se ven afectados por este proyecto de aplicación. Estos componentes son el *Turbine Bearing Support* y el *Exhaust Nozzle*, los cuales se ubican en la parte posterior del motor y son indicados en la Figura 4.

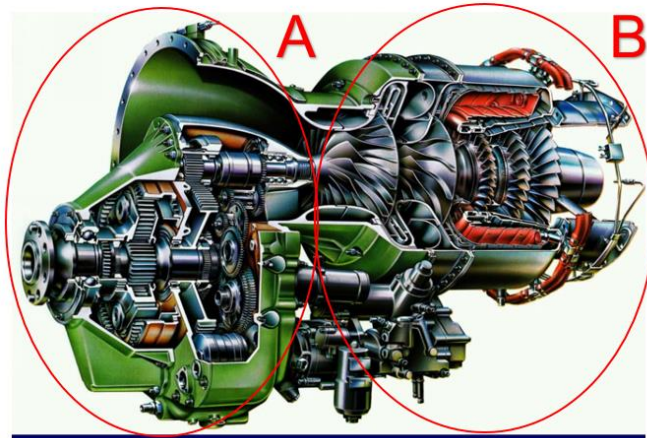


Figura 3. TPE331.
Fuente: Honeywell Aerospace (2016)

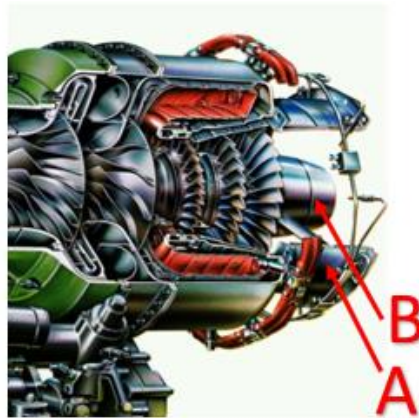


Figura 4. Turbine Bearing Support (A) y Exhaust Nozzle (B).
Fuente: Honeywell Aerospace (2016)

El TPE331 se puede clasificar en dos grandes tipos: de uso comercial y de uso militar. En su modo comercial es utilizado con el modelo 10GP para aeronaves como el *Aero Commander 500*. En su modo militar es utilizado con el modelo 10YGD en el *Predator B*. Sus componentes son fabricados por *Honeywell Aerospace* o proveedores externos ubicados en Estados Unidos y México mediante métodos convencionales como lo son el forjado, el maquinado, la soldadura de hoja de metal y la fundición.

Todas las acciones de rediseño, ya sea para fines de resolución de problemas, optimización o iniciativas para reducción de peso y costo de las piezas que componen este motor, son realizadas en los centros de diseño ubicados en Phoenix, AZ, Mexicali, BC., y Chihuahua, Chihuahua.

Honeywell Aerospace cuenta con productos que se clasifican según su mercado como a) Aviación Comercial, b) Aviación General y de Negocios y c) Defensa y Espacio. Para todos los tipos de mercado, la compañía utiliza un esquema de trabajo en el que se pueden identificar 3 entidades principales:

Diseño, Proyectos y la Cadena Integrada de Suministro (*ISC*, por sus siglas en inglés *Integrated Supply Chain*).

Los ingenieros de proyectos son los encargados de seguir los programas de cada motor desde su concepto hasta su posventa y son los que administran las acciones correctivas y esfuerzos necesarios para resolver un problema existente o potencial o simplemente atender nuevos requerimientos de los clientes.

Los ingenieros de Diseño se encargan de generar los conceptos de los diseños y *ISC* se encarga de producirlos.

Para fines del presente proyecto de aplicación, en el que se modifican dos diseños ya existentes, la Figura 5 muestra un diagrama simplificado del esquema de trabajo y de interacción entre las 3 entidades de *Aerospace*.

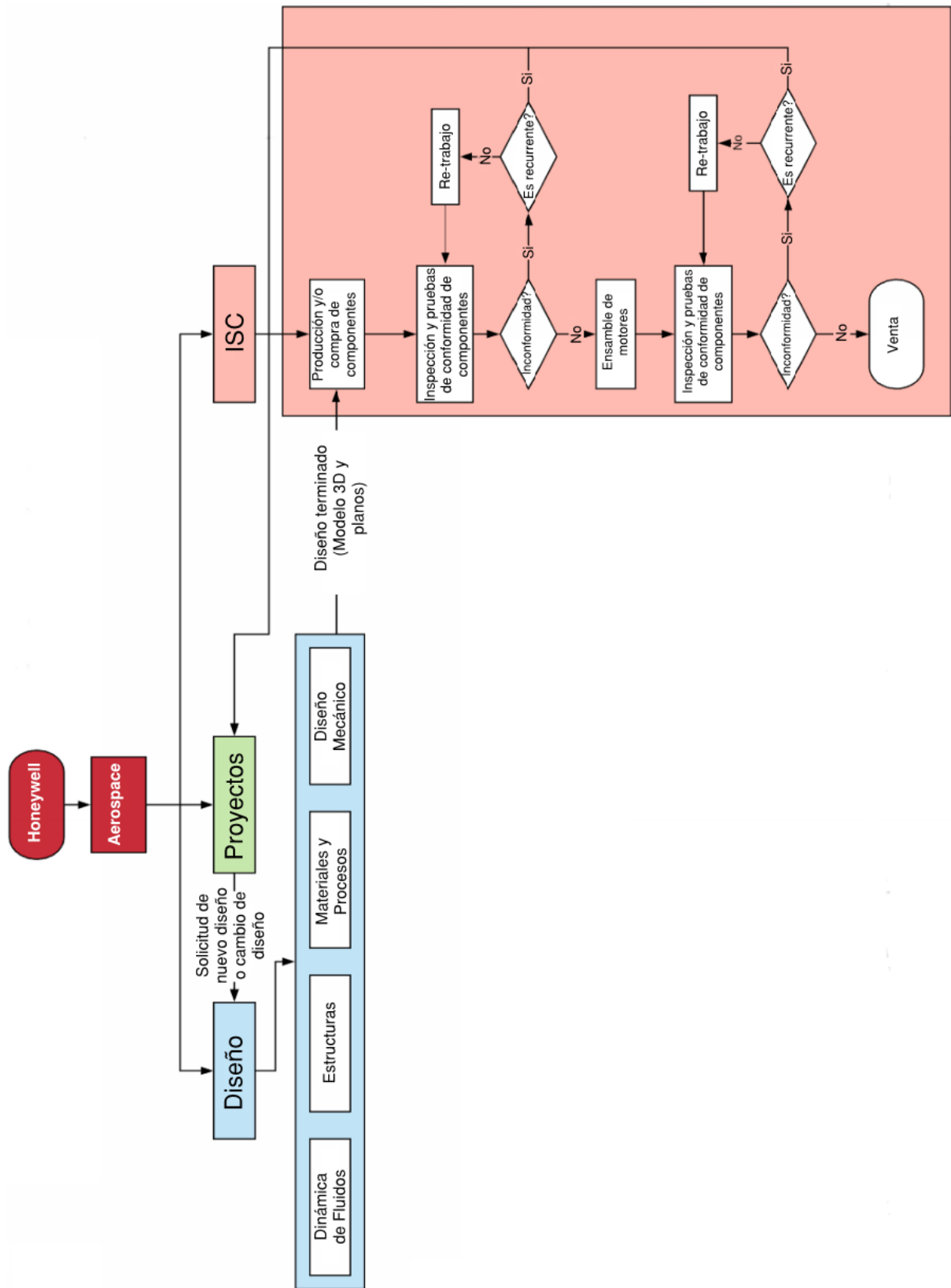


Figura 5. Esquema de interacción entre Diseño, Proyectos e ISC. Fuente: Elaboración propia

En las distintas plantas de *ISC de Honeywell* en México y en Estados Unidos, se fabrican o compran los componentes necesarios para poder construir un diseño creado por el departamento de Diseño. Tras comprobar que las piezas individuales cumplen satisfactoriamente con pruebas de conformidad, éstas son reunidas en Phoenix, Arizona; donde se realiza el ensamble del motor.

Antes de enviar cada TPE331 terminado al cliente, se realizan nuevamente pruebas de aceptación y conformidad, esta vez evaluando el motor como una sola entidad. Si todo está en orden, el motor puede ser enviado al comprador.

Cuando, por el contrario, uno de los componentes o el motor terminado no pasa alguna de las pruebas de conformidad, entonces se busca una acción correctiva que normalmente implica el re trabajo o incluso el reemplazo de alguna pieza hasta lograr cumplir con todos los requerimientos. Si las inconformidades son identificadas como recurrentes por el ingeniero de proyectos, entonces se solicita una acción correctiva a nivel diseño.

El departamento de diseño, comprendido a su vez por 4 entidades principales (Dinámica de Fluidos o *Aero*, Estructuras, Materiales y Procesos y Diseño mecánico), buscará llegar a una o más soluciones al problema en cuestión, guiado por las instrucciones recibidas por parte de proyectos.

Dinámica de fluidos: Especialistas en aerodinámica que determinan la trayectoria que debe de seguir el flujo de aire a través del motor.

Estructuras: Ingenieros de estrés que determinan si el nuevo diseño podrá soportar las cargas a las que se verá sometido durante su uso. Ellos además identifican puntos de concentración de esfuerzos que podrían resultar en problemas.

Materiales y procesos (*M&PE*): Ingenieros mecánicos y químicos especialistas en materiales y post procesos. Ellos avalan la intercambiabilidad de los materiales e indican los post-procesamientos necesarios (tratamientos térmicos, inspecciones, anodizados, etc.) para asegurar que las propiedades mecánicas sean las adecuadas.

Diseño mecánico: Estos equipos se encargan de generar o cambiar la geometría de los componentes del motor, asegurándose de que sean intercambiables (que no afecten su ensamblado, forma ni función) con aquellos que buscan reemplazar. Además de esto, deben asegurarse de mantener una geometría que permita al fluido seguir la trayectoria determinada por los especialistas en aerodinámica. Todo esto manteniendo en mente el material a utilizar y los post-procesos por los que debe pasar el componente y buscando evitar puntos de concentración de esfuerzos determinados por el departamento de estructuras.

Este proyecto se desarrolla en el departamento de diseño mecánico pero necesita de la colaboración del resto de los departamentos para validar la intercambiabilidad de la nueva propuesta desde los puntos de vista mecánico, estructural y aerodinámico.

Un factor muy crítico en la industria aeroespacial es el peso de todos los componentes de las aeronaves y, como ya se mencionó anteriormente, antes de ser enviado al cliente, cada motor debe someterse a inspección y pruebas de conformidad.

Una de esas pruebas consta de pesar el motor y evaluar que se encuentre dentro del límite máximo de peso estipulado por contrato con el comprador.

Dependiendo de su aplicación, los modelos del motor Turbohélice de *Honeywell Aerospace* TPE331 pueden tener diferentes pesos. Si su aplicación fuese comercial, los motores deberán tener, por contrato, un peso nominal de 400 libras con un valor máximo de 413 libras; mientras que, si la aplicación fuese militar, deberán tener un peso nominal de 418 libras, con un valor máximo de 419 libras.

De acuerdo a la información de producción del TPE331-10 del año 2018, se elaboró una gráfica (Figura 6) donde se presenta la producción total de 78 órdenes en el año, con respecto a los pesos de producción, donde se observó que hubo ensambles que sobrepasan el estándar permitido. De acuerdo a los datos se observa que el peso de estos ensambles tiene una tendencia a aumentar.



Figura 6. Pesos de los TPE331-10 producidos en 2018.
Fuente: Elaboración propia

También cabe resaltar que todos los motores que se encuentran por encima de la línea roja la cual indica las 419 libras, fueron inconformidades que no pudieron ser enviadas a los clientes hasta cumplir con el requerimiento de peso, lo cual se logró removiendo material tras evaluar la condición de distintos componentes y determinar en cuáles era posible maquinarse material.

Además de lo anterior, como puede observarse de mejor manera en la Figura 7, el 8.97% de la producción total del TPE331-10YGD del 2018 presentó inconformidades de peso que impedían que los motores fueran entregados a los clientes y el 7.69% se encontraba en el límite máximo permitido (119 lb). Solamente el 83.33% presentó un peso igual o menor al nominal establecido (118 lb). A pesar de que se encuentran dentro del límite, los 6 motores que representaron un riesgo de incumplimiento por su peso en 2018, sirvieron, junto con los 7 con sobrepeso, para que se detectara una inconformidad recurrente que necesita acciones correctivas por parte de Diseño.

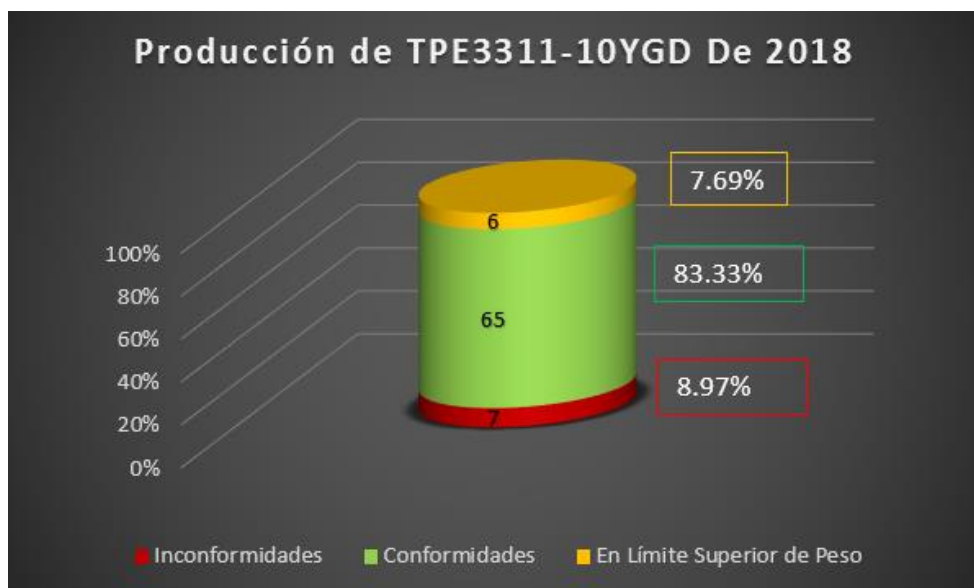


Figura 7. Porcentaje de conformidades, inconformidades y riesgos de inconformidad en los pesos de la producción del TPE331-10YGD de 2018.

Fuente: Elaboración Propia.

Al presentar el motor un exceso de peso (a partir del nominal) recurrente de entre 2 a 3 libras, *Honeywell* ha creado esfuerzos asegurar la reducción de peso en el motor TPE331.

El presente proyecto es uno de esos esfuerzos y pretende utilizar el Diseño para Manufactura Aditiva (*DfAM*, por sus siglas en inglés) para rediseñar dos componentes del motor (*Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle*) y fusionarlos en uno solo con miras a reducir el número de componentes y el peso del motor en al menos 1.5 lbs.

En la Figura 8 se muestra de manera simplificada el proceso de rediseño para manufactura aditiva de *Honeywell Aerospace*, después de que Proyectos ha dado la dirección de hacer una modificación a algún componente.

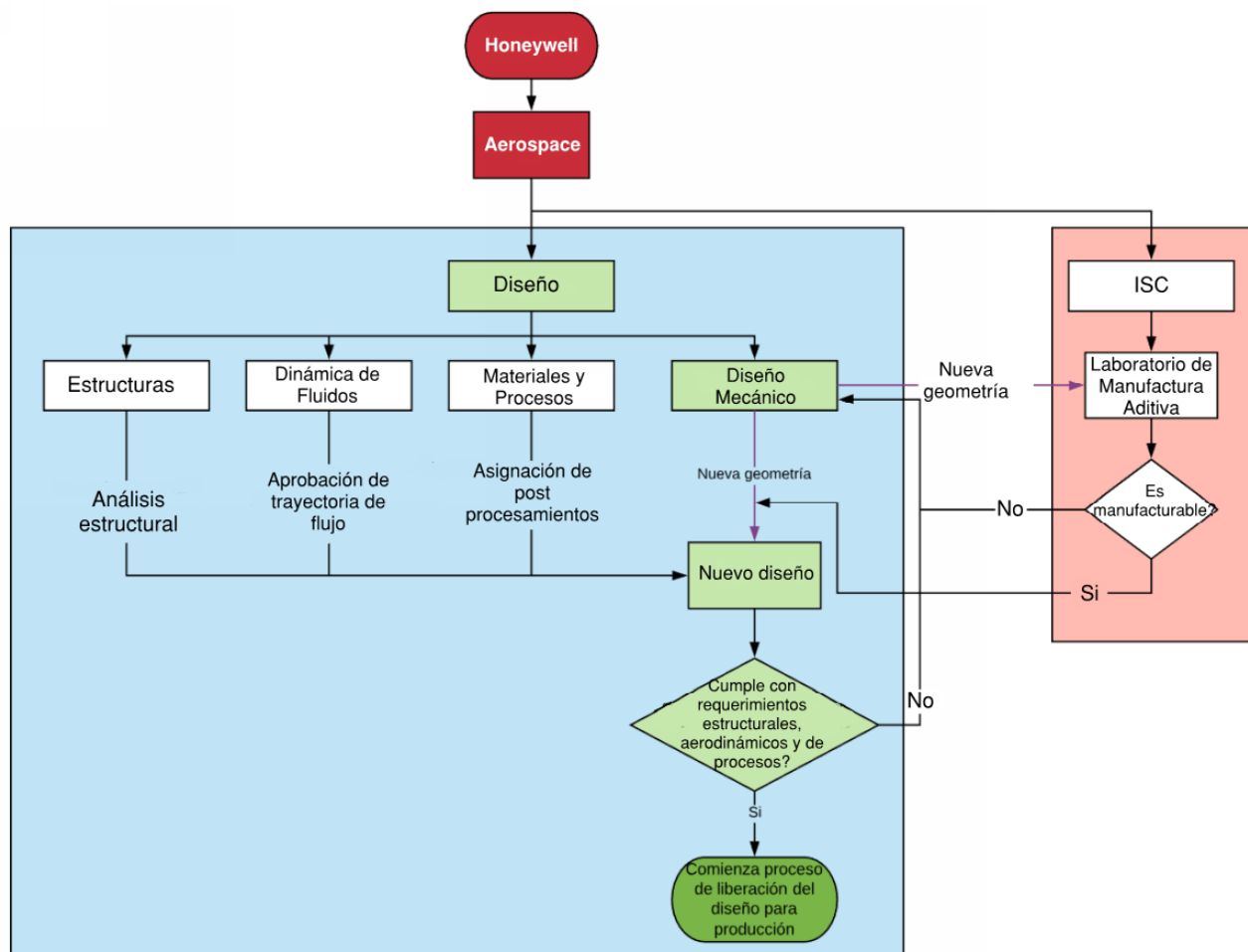


Figura 8. Esquema de la creación de un nuevo diseño para Manufactura Aditiva.

Fuente: Elaboración propia.

Como se mencionó anteriormente, el departamento de diseño consta de 4 unidades principales que en conjunto, producen cambios de diseño o diseños completamente nuevos.

Para el caso de un diseño para la manufactura aditiva, el proceso puede ser descrito de la siguiente manera:

La división de Diseño Mecánico genera una nueva geometría de acuerdo a lo que le fue solicitado. Dicha geometría pasa a ser solo una parte del diseño, el cual estará completo una vez que las otras divisiones de Diseño hagan su contribución. Al mismo tiempo en que Estructuras, Materiales y Procesos y el departamento de Dinámica de Fluidos hacen sus aportaciones al nuevo diseño, la nueva geometría es enviada (en forma de modelo 3D) al laboratorio de manufactura aditiva para ser evaluada y determinar si puede imprimirse. El laboratorio entonces puede rechazar la geometría y solicitar cambios que permitan la manufacturabilidad de la pieza. De ser así, Diseño Mecánico deberá hacer los cambios necesarios y el componente deberá someterse nuevamente a las aportaciones de las otras divisiones. Si alguna de las otras divisiones pidiese algún cambio en la geometría porque ésta no cumple algún requerimiento, aun cuando el laboratorio haya determinado que es manufacturable, Diseño Mecánico nuevamente tendrá que hacer los ajustes necesarios y someter la nueva geometría al estudio simultaneo del resto del departamento de Diseño y del laboratorio de manufactura aditiva.

Una vez que todas las partes están conformes con el diseño, éste se clasifica como "*In Review*" (listo para ser evaluado) y entonces comienza el proceso de liberación

del nuevo diseño para producción, lo cual significa que el nuevo diseño podrá ser producido y ensamblado en un motor que se va a vender.

1.1 Antecedentes.

En la industria aeroespacial es de suma importancia de controlar el peso de todos los componentes de las aeronaves.

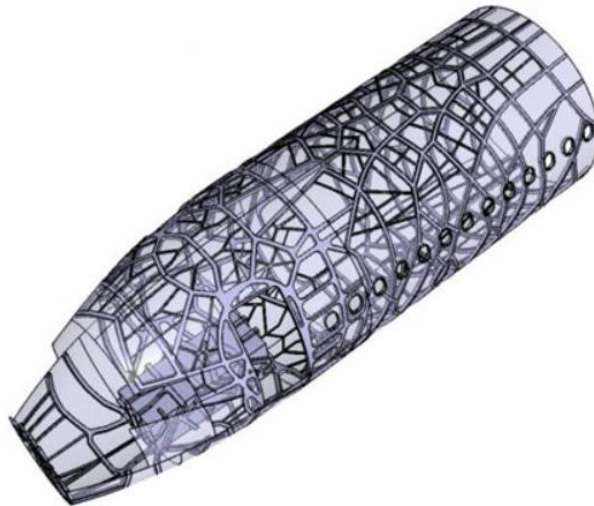
1.1.1. Manufactura Aditiva en la industria aeroespacial

La industria de la aviación ha comenzado a usar la manufactura aditiva o impresión 3D para reducir el peso de las aeronaves mientras se aumenta la personalización de los componentes y la eficiencia de construcción (Koppula, 2018).

Según Tiwari (2016), el mercado global aeroespacial de la impresión 3D crecerá una tasa compuesta de crecimiento anual del 55.85% en el periodo de 2016 a 2020, en gran parte por la demanda de producción e partes de motores más pequeñas y más ligeras.

(Contreras, 2018) menciona que la compañía de motores *Pratt & Whitney* diseñó y fabricó mediante manufactura aditiva (fusión de haz de electrones y sinterización directa de metal) aproximadamente doce partes, las cuales son en su mayoría piezas de sujeción, colectores de combustible y boquillas de inyección. La impresión 3D ahorró a *Pratt & Whitney* 15 meses en la fase de diseño y redujo el peso final de las piezas en un 50%.

STELIA Aerospace, utilizó la tecnología de fabricación aditiva de *Wire and Arc Additive Manufacturing (WAAM)* para crear un refuerzo para paneles de fuselaje. Como se muestra en la Figura 9, se pudo crear una geometría compleja con libertad de diseño que métodos de manufactura convencionales no permitirían (Contreras, 2018).



9. *STELIA Aerospace*.
Fuente: Contreras (2018)

Otro ejemplo es *Renishaw Ibérica*, empresa británica-española que pretende desarrollar turbinas aeroespaciales de alta velocidad, livianas y de alto rendimiento producidas por medio de manufactura aditiva (Contreras, 2018).

Contreras (2018) afirma que “La impresora de metal RenAM 500M de Renishaw es capaz de hacer “súper aleaciones” basadas en níquel en geometrías complejas que no pueden crearse utilizando métodos de fabricación tradicionales.”

Koldo Arandia (2015), director general de Ibarria, compañía vasca que junto con el centro de investigación TecNALIA y la Universidad del País Vasco, crearon la mayor impresora 3D industrial del mundo, comenta:

"La fabricación aditiva es ideal para crear piezas únicas o donde, con la técnica habitual, el desperdicio de material es enorme. En el sector aeronáutico, por ejemplo, se llega a desperdiciar en viruta el 80%; por supuesto una parte se recicla, pero el proceso es claramente ineficiente" (citado por Arrieta, 2016, sección ¿Para qué sirve?, párr. 6).

1.1.2. Manufactura Aditiva en Honeywell

En *Honeywell Aerospace* la mejora continua es uno de los pilares filosóficos que ha llevado a la creación de programas que evalúen componentes que sean buenos candidatos para ser reemplazados por componentes más ligeros y más compactos, fabricados por manufactura aditiva.

Honeywell fue la primera compañía aeroespacial en construir laboratorios de impresión 3D en China, India, Europa, México y Estados Unidos (Brecken, 2016).

Actualmente, además de contar con el departamento de diseño mecánico, el cual puede ser asignado para trabajar con manufactura aditiva, *Honeywell Aerospace* cuenta con un departamento especializado en la manufactura aditiva que se encarga de evaluar piezas fabricadas por métodos convencionales, determinar si son buenas candidatas para ser impresas y de ser así, de optimizar el diseño para facilitar la impresión y de ser posible, reducir el peso de las piezas sin sacrificar calidad.

En Junio de 2010, *Honeywell* se convirtió en la primera compañía aeroespacial en utilizar piezas impresas de aleación de níquel 718 en un avión de pruebas activo.

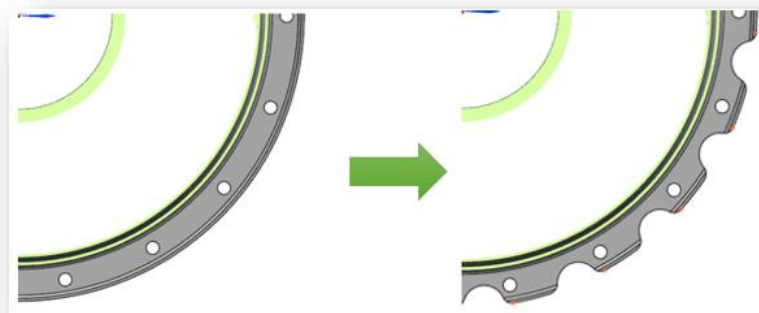
Además de su capacidad interna, *Honeywell* ha aprobado que proveedores externos como *Sigma Labs*, *3D Systems* y *Sintavia*, impriman componentes aeroespaciales para la compañía. Esta aprobación cubre todos los programas de

Honeywell, lo que significa que los proveedores podrán trabajar con componentes de aplicación en aerolíneas, aviación general, espacio y defensa (Haria, 2018).

1.1.3. Reducción de peso y manufactura aditiva en el TPE331

Como industria Aeroespacial, *Honeywell* se compromete a cumplir con requerimientos establecidos por contrato sobre el peso de los componentes que fabrica. Un incumplimiento de estos requerimientos por un exceso de peso resultará en el rechazo del producto por parte del cliente, pues mayor peso significará mayor combustible necesario y mayor costo para el cliente final: las aerolíneas y milicia usuarios de aeronaves.

Cuando un motor está terminado y es necesario reducir el peso, se toman acciones correctivas de remoción de material, como por ejemplo crear cortes en zonas que lo permitan, como se ve en la Figura 10. Sin embargo, esas medidas son correctivas y lo ideal es generar acciones preventivas y definitivas que eviten el sobre peso en los motores.



*Figura 10. Ejemplo de cortes realizados para reducción de peso.
Fuente: Elaboración propia.*

El equipo de diseño mecánico de motores, en conjunto con el equipo de Materiales y Procesos, así como el de Estructuras, ubicados en Mexicali, B.C. y Phoenix, AZ., ha

presentado diversas alternativas para reducción de peso para diferentes números de parte del TPE331 que van desde cambios de material de algunas piezas hasta cambio de las herramientas con las que se fabrica una pieza. Por ejemplo, un molde para vaciado que tiene muchos años de uso se erosiona con el tiempo, de modo que la pieza final termina con material adicional al deseado.

Otra de las alternativas que se presentan es la búsqueda de reducción de peso por medio de la eliminación de números de parte en los ensambles y la reducción de material por medio de implementación de geometrías complejas y espesores de pared más delgados. Estas propuestas ambiciosas implican la utilización de un método de manufactura no convencional: la manufactura aditiva o impresión 3D.

Honeywell Aerospace cuenta con la capacidad de crear y modificar diseños para manufactura aditiva, así como también tiene la capacidad de producir sus propias piezas impresas en el Laboratorio de Manufactura Aditiva, ubicado en Phoenix, AZ.

Un caso de éxito que se puede resaltar es el mostrado en las Figuras 11 y 12, el cual es un componente tubular, compuesto de 3 partes que se sueldan entre sí y que tiene forma compleja. El componente original, fabricado por medio de fundición, se encargaba de conducir aceite a través del motor y presentaba problemas de flujo debido al cordón de soldadura. La manufactura aditiva permitió generar una solución de una sola pieza que aumenta el claro entre sí misma y los componentes de alrededor (mediante la reducción del grosor de la pared) mientras que aumenta el área interna de flujo. La impresión 3D permitió eliminar los problemas de este componente, así como una reducción de peso del 5%.



Figura 11. Cordón de soldadura que causa falla en flujo.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 12. Impresión simultánea de 12 tubos de una sola pieza.
Fuente: Elaboración propia.

1.2. Justificación.

La línea de producción del motor TPE331 de *Honeywell Aerospace*, cuya manufactura se realiza en el sitio de *Phoenix Engines* en Phoenix, AZ, Estados Unidos y cuyo equipo de diseño se encuentra en Phoenix, AZ, Estados Unidos y en Mexicali, B.C., México, presenta aleatoriamente, desde inicios del 2017, un incumplimiento de los requerimientos nominales de peso estipulados por el cliente al generar productos con un sobrepeso de entre 2 y 3 libras (a partir del peso nominal). Si bien para los motores comerciales el sobre peso de 2 libras entra dentro del rango de tolerancia de 13 libras, el motor de aplicación militar deja de cumplir con el valor permitido y éste es rechazado por el cliente, lo cual impacta directamente en el capital de la compañía, al no permitir ingresos (de aproximadamente medio millón de dólares) en los tiempos estipulados, con retrasos de hasta 2 meses; durante los cuales además se deben realizar re-trabajos y operaciones de remoción de material hasta eliminar el sobrepeso.

Además de eso, teniendo en cuenta que el costo de hora por trabajo de un empleado en Estados Unidos es de 130 *USD*, en la Figura 13 se muestra el registro del costo correspondiente generado para la remoción de 1 y 2 lb, las cuales corresponden a los motores que pesaron 120 y 121 lb respectivamente, durante el año 2018.



Figura 13. Costo en USD del re-trabajo de motores TPE331 en 2018.

Fuente: Elaboración propia

El costo total por el re-trabajo de los motores que sobrepasaron las 119 lb durante el año 2018 fue de 7020 USD.

Además de lo anterior, el incumplimiento de la fecha estipulada de entrega del producto afecta negativamente el acuerdo de confianza entre el cliente y la compañía, acuerdo de suma importancia para *Honeywell* y su política de “Experiencia del Usuario” en la cual, se busca tener siempre en mente al cliente y que éste tenga la mejor experiencia desde el momento en que hace una orden, hasta el momento en que ya tiene el producto y lo está utilizando.

La realización de este proyecto permite la aplicación de los conocimientos adquiridos al cursar la maestría en ingeniería e innovación mientras se resuelve una problemática real de la industria aeroespacial. El componente que se espera obtener de este proyecto permitirá erradicar las inconformidades de peso que han surgido en la producción del TPE331 desde hace poco más de un año, evitando retrasos y ahorrando

dinero y tiempo empleados actualmente en re-trabajar productos que no cumplen con los requerimientos estipulados.

1.3. Planteamiento del problema.

Las variaciones en los pesos de los motores TPE331 datan de los últimos 4 años y se le atribuyen a distintas causas que van desde cambios de proveedores e intervención de operadores y cambios de material en algunos componentes.

En inicios de 2017, dichas variaciones comenzaron a sobrepasar el valor máximo permitido por los clientes de la compañía.

Por esta razón, en *Honeywell Mexicali* nacen iniciativas de diseño para reducción de peso a nivel sub-ensamble de los componentes que conforman el motor TPE331 y el equipo de diseño del TPE331 es comisionado con diversos números de parte. Este proyecto es una de esas iniciativas.

Se pretende utilizar el *DfAM* para fusionar dos componentes de Inconel 718 que actualmente son considerados independientes y una vez soldados entre sí, forman parte de un sub ensamble de la turbina del TPE331.

Se busca que el nuevo componente sea un número de parte nuevo que tenga una reducción de al menos 1.5 lb de lo que pesaban los componentes originales por separado y que además sea capaz de soportar las cargas a las que estará sometido en operación. A continuación se describen los componentes actuales.

Componentes actuales

Turbine Bearing Support (Figura 14). El diseño actual es fabricado en *Honeywell* de Republica Checa y consta de dos piezas fabricadas por fundición y que son soldadas entre sí. Su función es transferir cargas radiales a la estructura principal y transmitir el flujo del escape de la turbina mediante un difusor.

Configuración: El difusor es una fundición de Inconel 718 y la pared interna es de Inconel 713LC. Ambas estructuras se unen por medio de 3 palas cuya sección transversal es un perfil aerodinámico.

Peso: 7.186 lb

Costo: 7253 USD

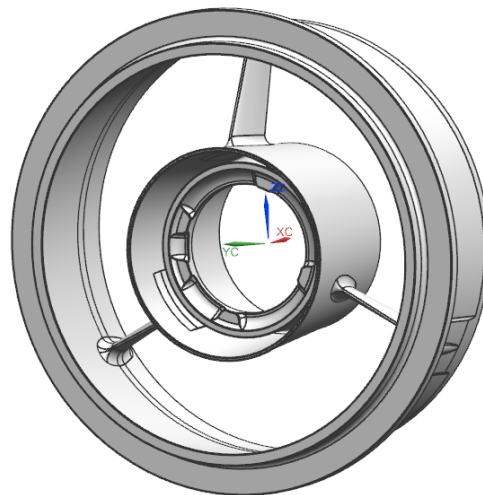


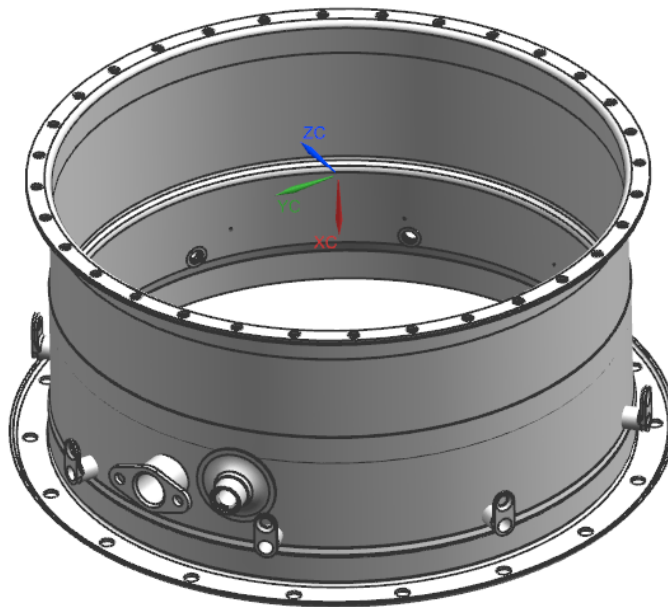
Figura 14. *Turbine bearing support*.
Fuente: *Elaboración propia*.

Exhaust Nozzle (Figura 15). El diseño actual está hecho de hojas de metal (*sheet metal*) de Inconel 718 y provee monturas para 8 termopares T5 de salida, así como de una cavidad anular para el sensor de presión en la etapa 5 del motor (del ciclo termodinámico) y de diez agujeros de .048 pulgadas que se conectan internamente para la medición de dicha presión. Cabe mencionar que el arreglo

para crear a dicha cavidad, consiste en 3 piezas de *sheet metal*. Además, el *Exhaust Nozzle* funciona como soporte para el puerto por donde entra aceite al *Turbine Bearing*. Finalmente, provee de una brida para la unión del motor con la interfaz del cliente.

Peso: 5.6 lb

Costo: 1998 *USD*



*Figura 15. Exhaust Nozzle.
Fuente: Elaboración propia.*

Con base a lo anterior, se tiene que el peso total del ensamble de ambos componentes es de 12.786 libras y su costo de 9251 *USD*.

1.4. Preguntas de investigación.

A continuación se presenta la pregunta general de investigación, la cual da pie al objetivo principal del presente proyecto de aplicación.

- ¿Cómo integrar los componentes *Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle* del motor TPE331-10 utilizando el Diseño para Manufactura Aditiva de modo que se puedan reducir por lo menos 1.5 libras del peso del ensamble y que soporte las cargas a las que está sometido en operación?

1.5. Problemática.

Aquí se presenta la problemática derivada de la pregunta general de investigación, la cual se enlista a continuación:

- ¿Cuáles son las restricciones tanto de operación, como de diseño y manufactura a las que estaría sometido un componente que fusione las piezas *Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle* del motor TPE331-10?
- ¿Cómo asegurar que las restricciones de diseño y manufactura en la geometría de un componente que fusiona las piezas *Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle* del motor TPE331-10, se cumplan?
- ¿Cómo puede el Diseño para la Manufactura Aditiva permitir una reducción de peso de más de 1.5 libras en el ensamble del TPE331-10?
- ¿Cómo asegurar que las restricciones de operación (estructurales y aerodinámicas) en la geometría de un componente que fusiona las piezas *Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle* del motor TPE331-10, se cumplan?

- ¿Cuáles son los requerimientos para que un prototipo del nuevo componente sea impreso en el laboratorio de Honeywell *Engines* en Phoenix, AZ, Estados Unidos?

1.6. Objetivo general.

Desarrollar una nueva pieza para el motor TPE331 como resultado de la fusión de dos componentes diferentes (*Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle*), que reduzca el peso del ensamble donde son utilizados, en un mínimo de 1.5 libras, mediante la aplicación del Diseño para la Manufactura Aditiva; para contribuir a la erradicación del sobrepeso existente en el motor.

1.7. Objetivos específicos.

1. Identificar las restricciones tanto de operación como de diseño y manufactura del nuevo componente que se pretende crear.
2. Diseñar una geometría que fusione los componentes *Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle* del motor TPE331-10, que cumpla con las restricciones tanto de diseño como de manufactura.
3. Demostrar que la geometría propuesta con Diseño para Manufactura Aditiva puede reducir el peso del motor TPE331-10 en más de 1.5 libras.
4. Lograr que la geometría propuesta para fusionar los componentes *Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle* del motor TPE331-10 y reducir peso, cumpla con las restricciones de operación (requerimientos estructurales y de aerodinámica) con los que cumplen actualmente los componentes originales; así como con características que permitan su óptima impresión.

5. Crear un diseño que se pueda imprimir en 3D en el laboratorio de manufactura aditiva de Honeywell *Engines* en Phoenix, AZ, Estados Unidos.

1.8. Hipótesis.

La fusión de los componentes *Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle* mediante el Diseño para Manufactura Aditiva permite reducir el peso del motor TPE331-10 en más de 1.5 libras.

II. Capítulo 2: Marco teórico y referencial

2.1. Marco teórico.

En esta sección se presenta el soporte documental necesario para el presente proyecto, dividido en 4 temas.

El primero, “motores turbohélice” habla sobre el tipo de motores en el que se ensamblan los componentes que se pretenden fusionar (*Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle*), como objetivo de este proyecto. El segundo tema, “métodos convencionales de manufactura” define en qué consisten los procesos de manufactura actualmente utilizados para fabricar dichos componentes, así como sus limitaciones. El tercer tema, “Manufactura Aditiva”, explica los principios básicos de la impresión 3D y su utilidad para construir geometrías complejas. El cuarto tema, “Diseño para Manufactura Aditiva”, habla de los principios utilizados para diseñar partes óptimas para la manufactura aditiva.

2.1.1. Motores turbohélice.

Un motor turbohélice es un sistema de propulsión que combina un turboreactor con una hélice. La Figura 16 muestra de manera simplificada el esquema de uno de estos motores.

La parte de la hélice y la caja de engranajes se encarga de succionar grandes cantidades de aire, de las cuales, una gran parte generará propulsión directamente (mediante la tercera ley de Newton “Acción y Reacción”) mientras que otra parte pasará por el turboreactor.

La parte del turborreactor permite la propulsión toma aire y lo hace fluir a través de turbo-maquinaria, para que éste sea sometido a las diferentes etapas de un ciclo termodinámico. La primera etapa es el compresor, el cuál puede constar de varias fases o escalones. Una vez comprimido, el aire pasa a la segunda etapa: la cámara de combustión, donde eleva su temperatura mediante la quema de combustible. La tercera etapa es la turbina, la cual permite la expansión de los gases y genera la energía que mueve todos los componentes rotativos de las etapas anteriores a través del eje del motor. Finalmente, los gases se expanden aún más en una tobera de salida, produciéndose un chorro de gases con gran velocidad y en sentido contrario al del movimiento, generando así, propulsión (Tarifa, 1951).

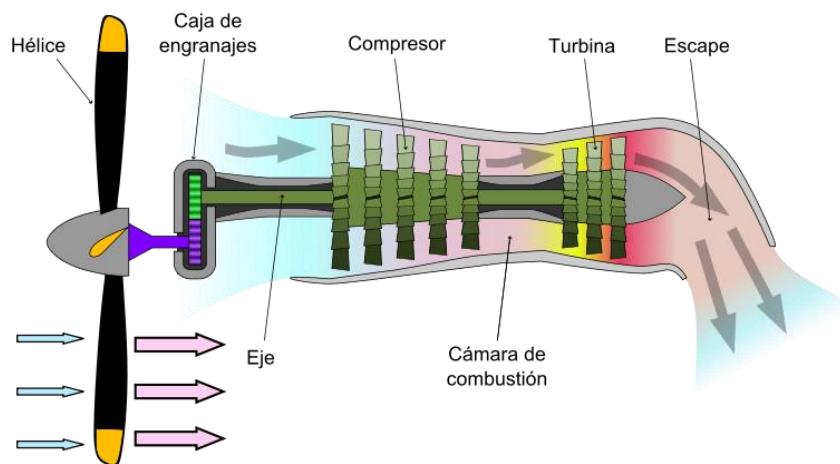


Figura 16. Esquema básico de un motor Turbohélice.
Fuente: How it Works (2016)

2.1.2. Métodos convencionales de manufactura.

Según la *EAE Business School* (2017), los procesos o métodos de manufactura son aquellas operaciones durante el proceso productivo por las que pasa la materia prima para transformarse en el producto real que una empresa ofrece.

Algunos de los métodos convencionales de manufactura más comunes en la industria aeroespacial, y específicamente en la creación de las piezas del TPE331 se mencionan a continuación.

Fundición (*Casting*): Proceso de producción de piezas comúnmente metálicas pero también de plástico, por vaciado del material fundido dentro de un molde y que luego es enfriado y solidificado (EcuRed, 2018).

El proceso más común es la fundición en arena. Esta consiste en colar un metal fundido, típicamente aleaciones de hierro, acero, bronce, latón y otros, en un molde de arena, dejarlo solidificar y posteriormente romper el molde para extraer la pieza fundida. Los moldes de arena son convenientes pues el material abunda en la naturaleza y se puede moldear sin perder la permeabilidad que posibilita evacuar los gases del molde al tiempo que se vierte el metal fundido (Sabogal, 2018).

Sin embargo, existen importantes limitaciones y desventajas para este proceso: Existe porosidad en las piezas finales, se requieren amplias tolerancias de perfil (± 0.015 pulgadas), se requieren moldes costosos y en particular de las piezas en el TPE331, los espesores de pared no pueden ser menores a .08 pulgadas.

Maquinado: Es un proceso de fabricación que comprende un conjunto de operaciones de conformación de piezas mediante la eliminación de material, ya sea por arranque de viruta o por abrasión. Se realiza a partir de productos semielaborados como lingotes u otras piezas previamente conformadas por otros procesos como moldeo o forja (EcuRed, 2018).

Algunas de sus desventajas y limitaciones son: geometrías complejas o esféricas requieren tiempos prolongados de producción y son costosas. Geometrías internas están limitadas a que la herramienta pueda acceder a esas zonas del componente para poder remover material.

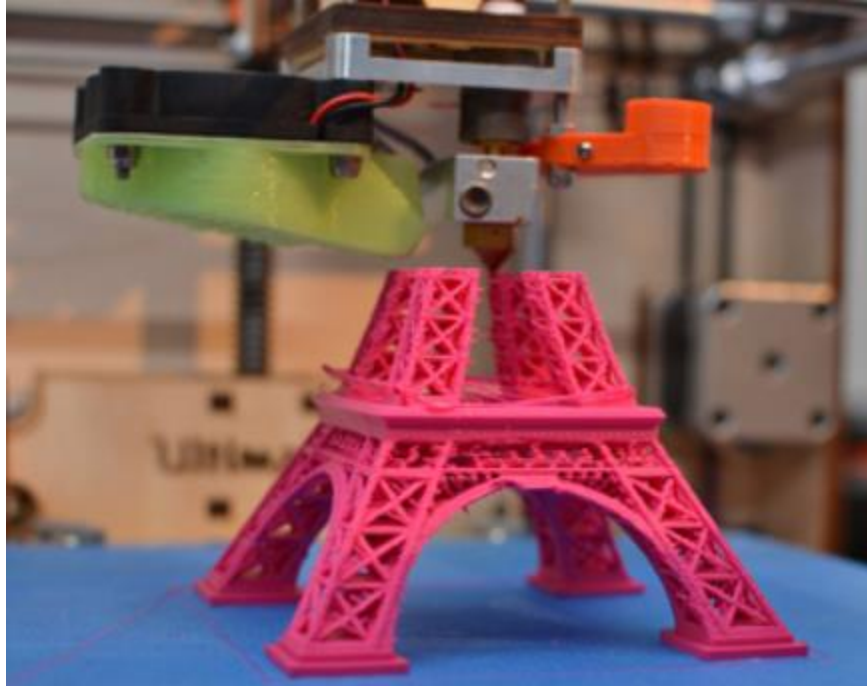
Forja: La forja es un proceso de modelado del metal aplicando presión (Frisa, 2018). En el curso del forjado, el metal se hace más denso y se elevan sus propiedades mecánicas. Según la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad del País Vasco, algunas limitaciones son: espesores de pared no pueden ser muy delgados, amplias tolerancias y acabados superficiales pobres, no es posible forjar agujeros de diámetro pequeño ni aristas sin radios.

Doblado de lámina o chapa metálica: Este proceso consiste en doblar láminas delgadas de metal mediante estampado en frío para generar piezas de formas básicas. Limitaciones: Para conformar piezas complejas de chapa metálica, diferentes piezas simples son soldadas entre si hasta formar la geometría deseada (3DCadPortal, 2019).

2.1.3. Manufactura aditiva (AM, por sus siglas en inglés).

Al contrario de los procesos convencionales de manufactura, la manufactura aditiva permite fabricar partes “capa por capa”, añadiendo material únicamente donde es necesario, hasta conformar un objeto tridimensional pre-diseñado (Jiang, Lou & Hu, 2019).

En la Figura 17, se muestra la adición de material “Capa por capa” de un modelo a escala de la Torre Eiffel.



*Figura 17. Construcción "Capa por Capa" de un modelo 3D mediante AM.
Fuente: Malik (2016)*

Con esta tecnología, partes con estructuras elaboradas, como la estructura de la Torre Eiffel, pueden fabricarse en un solo paso, eliminando así las limitaciones de estrategias de procesamiento tradicionales o formas básicas. Adicionalmente, la eliminación o reducción de la necesidad de ensamblar múltiples componentes puede llevar a una reducción significativa en tiempos de fabricación y horas hombre, (Jiang et al., 2019).

La Figura 18 muestra el proceso de manufactura aditiva conocida como sinterizado selectivo por láser, el cuál será utilizado para fabricar el componente resultante del presente proyecto.

El sistema comienza aplicando una capa delgada de polvo de metal en la plataforma de impresión. Un poderoso rayo láser fusiona el polvo exactamente en los puntos que definen la primera sección transversal del modelo digital 3D, creando así la

primera capa del componente. Seguido de esto, la plataforma de impresión disminuye su altura y una nueva capa de polvo de metal es aplicada. Una vez más, el material es fusionado en exactamente los puntos necesarios y, esta vez, al solidificarse, se une a la capa anterior. Este proceso se repite hasta que la geometría deseada es completada y el polvo restante que no fue fusionado es evacuado de la impresora, emergiendo así el componente terminado (Electro Optical Systems, [EOS], 2019).

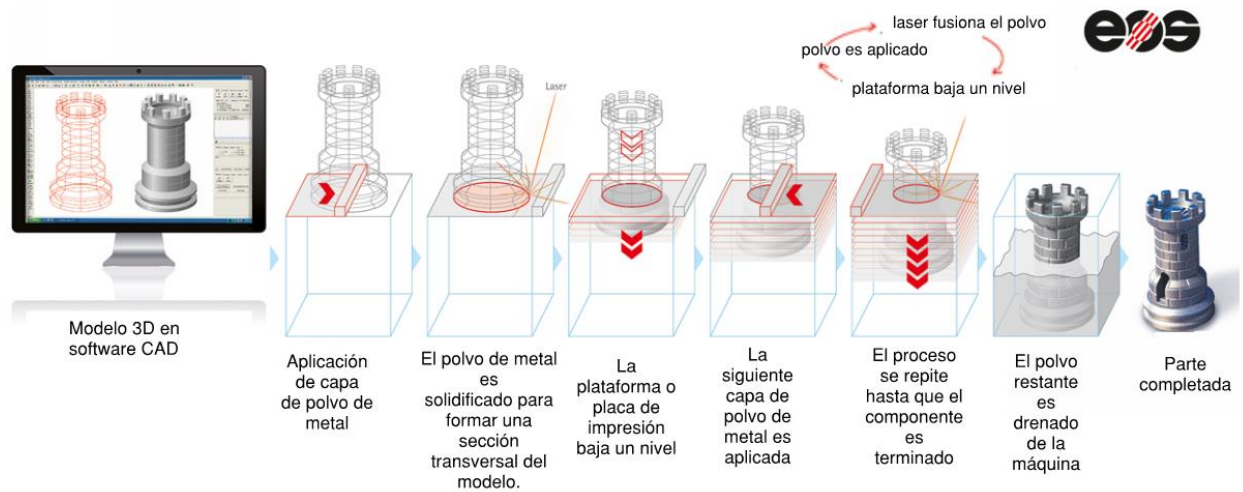


Figura 18. Proceso de impresión.
Fuente: EOS (2019)

La manufactura aditiva proporciona una gran libertad para crear componentes de formas irregulares y complejas, directamente desde el *software CAD*, sin la necesidad de herramental de alto precio. Estos diseños complicados serían muy difíciles de fabricar con métodos convencionales, si no imposibles. Los componentes aditivos son usualmente más ligeros, más eficientes y mejor adaptados a su aplicación.

La flexibilidad que proporciona la manufactura aditiva no da completa libertad de diseñar cualquier forma imaginable, al menos no a un costo prudente (Renishaw, 2017).

2.1.4. Diseño para Manufactura Aditiva (*DfAM*).

Como todos los procesos de manufactura, las tecnologías *AM* tienen sus capacidades y sus limitantes. El *DfAM* consiste en lograr un Diseño óptimo y eficiente que pueda producirse satisfactoriamente a pesar de las limitantes que presenta la impresión 3D.

El *DfAM* es un conjunto de métodos de diseño con el que se puede optimizar la manufacturabilidad y funcionalidad de un producto gracias a las capacidades de la manufactura aditiva. El *DfAM* es crítico si se busca producir partes que combinen un funcionamiento excepcional con manufactura aditiva práctica y rentable.

A continuación se presentan los aspectos a considerar durante el *DfAM*: material de soporte, orientación, local mínima, modificación de geometría, orientación respecto a la aplicación de polvo, y optimización topológica:

- Material de Soporte:

Cuando un diseño tiene secciones en voladizo o excedentes, de modo que se requiera crear capas encima de varias pulgadas de polvo sin fusionar, soportes sacrificiales son necesarios para poder imprimir las secciones transversales de dichas zonas. Estos soportes son sólidos impresos y aumentan el tiempo de impresión, consumen materiales y requieren de post-procesamiento adicional para ser separados del cuerpo del componente principal (Renishaw, 2017). La Figura 19 muestra cómo una geometría funcional optimizada requiere de mucho material de soporte si no es diseñada para AM, volviendo ineficiente su fabricación.

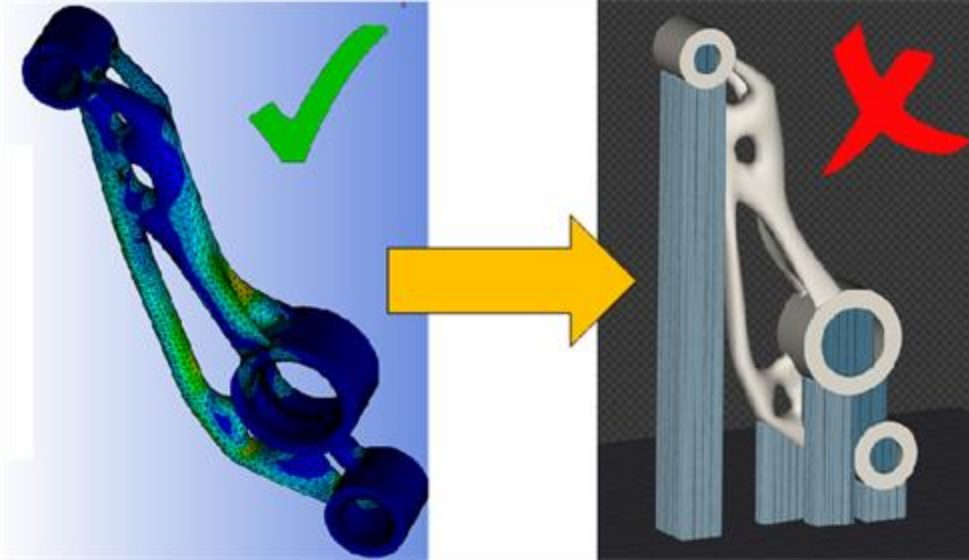


Figura 19. Parte funcional optimizada que no ha sido diseñada para AM requiere de mucho material de soporte.
Fuente: (Renishaw, 2017).

- Orientación

La orientación de una parte en AM, se refiere a la dirección ortogonal a las capas del objeto que está siendo fabricado (Jiang, Xu & Stringer, 2018).

En la manufactura aditiva, la orientación de la parte durante su fabricación se vuelve crítica, pues una orientación adecuada puede mejorar la calidad de la pieza, reducir tiempos de producción y reducir el material de soporte necesario, lo cual se deriva en un menor costo de fabricación (Jibin, Liu & Wu 2006).

La orientación deberá ser elegida para producir la construcción más estable posible con la cantidad mínima de material de soporte.

En el proceso de adición y fusión de capas de polvo de metal, la manera en que estas capas se relacionan entre sí, es importante. Conforme una capa es derretida, ésta necesita de la capa anterior para proveer tanto soporte físico como un conducto para disipar el calor provocado por la fusión.

Como se muestra en la Figura 20, cuando el láser derrite polvo en un área donde la capa anterior es metal sólido, el calor de la soldadura fluye hacia la estructura debajo, volviéndola a derretir parcialmente y creando una soldadura fuerte. Al contrario, cuando existe una zona en cantiléver o excedente, al menos una parte del material debajo de lo que se fusiona es polvo sin derretir, el cual no es tan buen conductor térmico como el metal sólido. Esto ocasiona que el calor de la fusión sea retenido por más tiempo, lo cual puede resultar en el sinterizado de polvo de los alrededores y por ende, material adicional adherido a la superficie excedente y un acabado superficial pobre en esa zona (Renishaw, 2017).

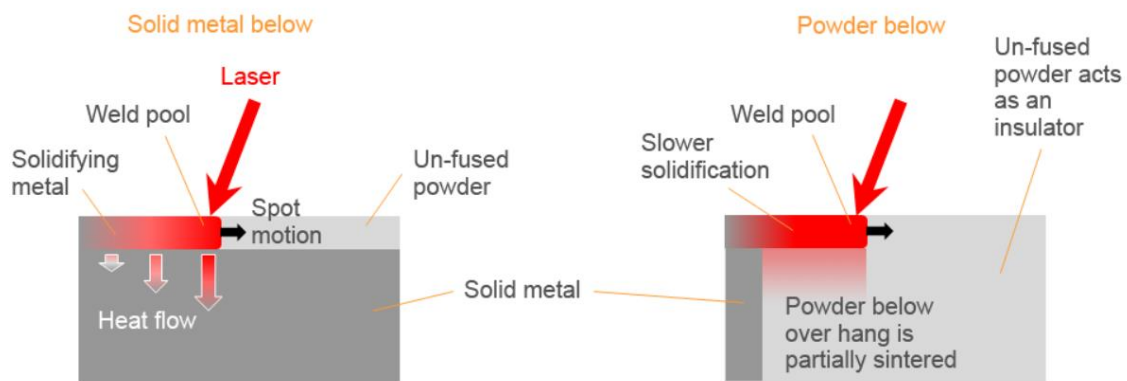
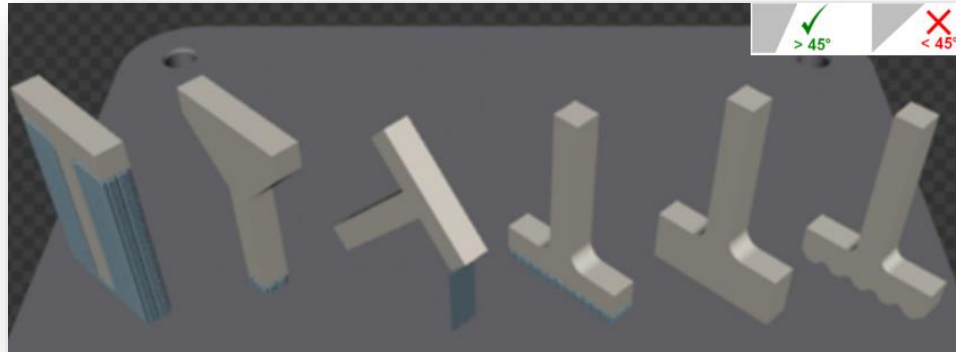


Figura 20. La fusión de polvo encima de metal sólido permite el rápido enfriamiento. En regiones excedentes, sobre polvo sin derretir, el enfriamiento es más lento.

Fuente: (Renishaw, 2017).

Generalmente hablando, excedentes o zonas cantiléver que se encuentren a menos de 45 grados con respecto a la plataforma de impresión, requerirán soporte. Aquellas a más de 45 grados son conocidas como *down-skins* o “caras hacia abajo” y pueden soportarse a sí mismas sin necesidad de soportes, pero tendrán un acabado pobre por el sinterizado adicional mencionado anteriormente.

Como se muestra en la Figura 21, un componente usualmente puede ser impreso en muchas orientaciones distintas y el cuidado que se tenga al seleccionar una será de gran impacto en la cantidad de material desperdiciado y post procesamiento requerido (Renishaw, 2017).



*Figura 21. Diferentes orientaciones para un diseño.
Fuente (Renishaw, 2017).*

- Local mínima

Se le llama Local mínima a todas aquellas áreas de la parte que comienzan a imprimirse sin estar conectadas al resto del cuerpo impreso. Estas áreas requerirán soporte para anclarse durante la construcción y no ser desplazada por la máquina al depositar una capa nueva de polvo (Renishaw, 2017). La Figura 22 muestra un claro ejemplo de Local mínima pero estos también pueden presentarse en el centro de agujeros laterales o angulares, como se muestra en la Figura 23.

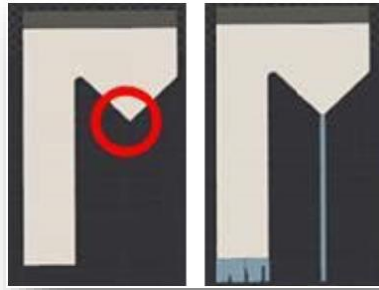


Figura 22. Ejemplos de local mínima.
Fuente: (Renishaw, 2017).

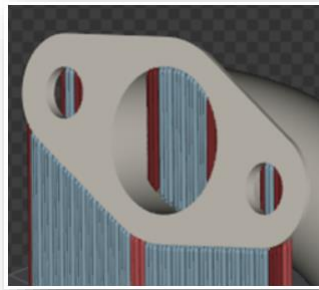


Figura 23. Local mínima en agujeros laterales y diagonales.
Fuente: (Renishaw, 2017).

En *DfAM*, se busca diseñar componentes con la menor cantidad posible de local mínima.

- Orientación respecto a la aplicación de polvo

Conforme una nueva capa de polvo es depositada y una escobilla lo empuja para distribuirlo en el área de impresión, se genera una presión sobre el polvo que ayuda a que la nueva capa sea densa (Figura 24).

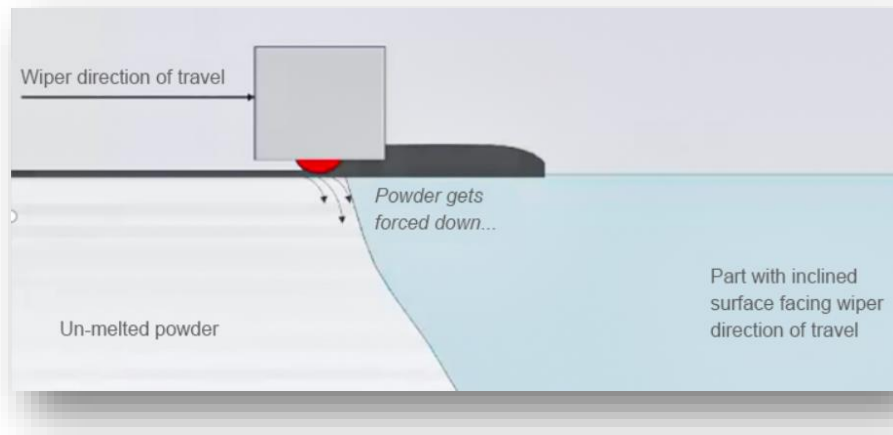


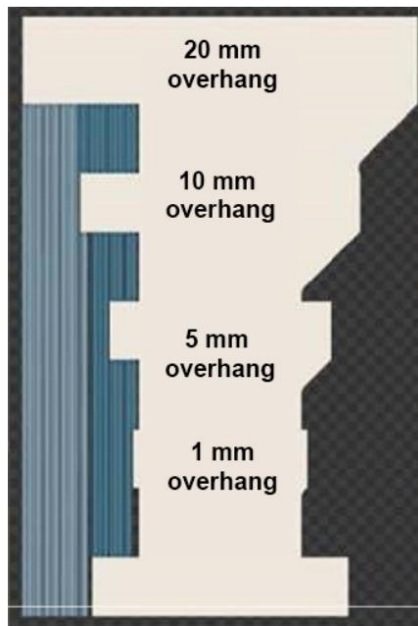
Figura 24. Interacción entre la escobilla de la impresora y el eje inclinado de un componente.
Fuente: (Renishaw, 2017).

Cuando se está imprimiendo una parte cuya superficie está inclinada en la dirección opuesta al movimiento de la escobilla, la presión hacia abajo del polvo puede causar el levantamiento del borde que está inclinado hacia la escobilla, causando una colisión entre la escobilla y el sólido (Renishaw, 2017).

Es por esto que los soportes y sólidos inclinados deben orientarse en una dirección distinta a la línea de acción de la escobilla de la impresora.

- Modificación de geometría

La empresa líder en manufactura aditiva Renishaw, (2017) menciona que mientras que excedentes o zonas cantiléver de hasta 1 mm no necesitan material de soporte, esto no es recomendado. Para estos casos y para excedentes mayores que en definitiva necesitan de material de soporte, *chamfers* y radios pueden ser agregados para eliminar zonas cantiléver. Esto se muestra en la Figura 25.



*Figura 25. Alternativas de chamfer para sustituir excedentes horizontales.
Fuente: (Renishaw, 2017)*

Como ya se mencionó anteriormente, agujeros en caras laterales pueden requerir de material de soporte. Agujeros y tubos de diámetro mayor a 10 mm pueden ser rediseñados para que puedan soportarse a sí mismos. Esto se hace mediante la utilización de caras a 45 grados (o más) con respecto a la placa de impresión.

La Figura 26 muestra diferentes maneras de evitar material de soporte. Los primeros dos agujeros fueron modificados a tener una forma de gota y diamante respectivamente que pueden soportarse a sí mismos con mínimo material a maquinarse. El tercer agujero fue transformado a sólido para ser maquinado por completo posteriormente (Renishaw, 2017).

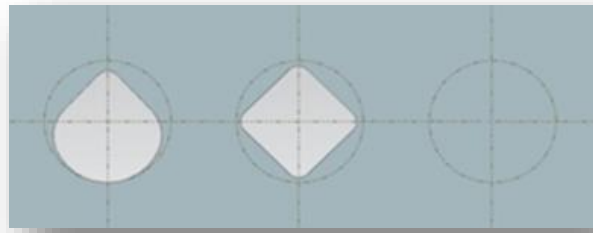


Figura 26. Alternativas para eliminar material de soporte.

Fuente: (Renishaw, 2017)

- Optimización Topológica

La capacidad de la manufactura aditiva de producir formas complejas permite buscar la optimización topológica de los componentes. Esto tiene como meta principal mantener la fuerza estructural y rigidez de las piezas mientras que se remueve material innecesario. Esto resulta generalmente en disminución de peso y apariencias más complejas y orgánicas, como se muestra en la Figura 27.

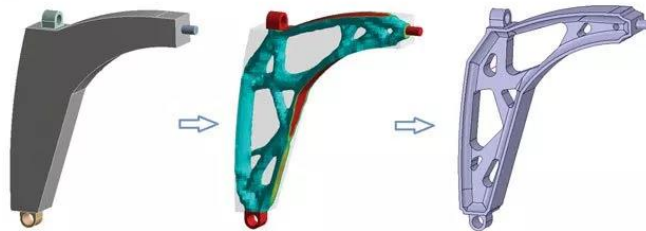


Figura 27. Optimización topológica.

Fuente: (Renishaw, 2017)

Es importante mencionar, que un componente completamente optimizado, no siempre puede ser ideal para la manufactura aditiva, pues si se diseña únicamente para cumplir su función y no para su manufactura, probablemente mucho material de soporte sea necesario y la pieza final tenga un acabado superficial pobre (Renishaw, 2017).

2.2. Marco Referencial.

Para un motor de una potencia dada, reducir el consumo específico de combustible se traduciría en ahorros, mientras que el aumento de la carga útil se traduciría en ganancias para las aerolíneas comerciales o más espacio para armas y cargamento en el caso de aeronaves militares (Cirigliano, 2017).

Desafortunadamente, el peso de un motor, de cualquier tipo, generalmente se ve atado por restricciones estructurales, como los son esfuerzos mecánicos y térmicos, ciclos termodinámicos, dimensiones permitidas, entre otras (Cirigliano, 2017). Es por esto que, una vez acordado un peso de un motor entre el cliente y el fabricante, cualquier aumento en él será rechazado o amonestado.

Por otro lado, cualquier disminución en él se verá como un beneficio pero deberá comprobarse que dicha disminución no compromete las propiedades mecánicas del componente al que se le aplica la reducción.

Debido a la importancia de mantener o reducir el uso de combustible de sus aeronaves, la industria aeronáutica (tanto aerolíneas como compañías manufactureras de aeronaves y sus componentes) se han dado a la tarea de siempre estar en búsqueda de aumentar la eficiencia de los combustibles que se utilizan mediante la creación de diferentes esfuerzos que engloban acciones durante el vuelo y en tierra.

Un ejemplo presentado por el *Air Transport Action Group* (ATAG, 2018), es el de *British Airways*, quien creó el Programa de Eficiencia de Combustible, mediante el cual un equipo se ha dedicado a buscar ahorros de combustible en operaciones de vuelo, operaciones de red y en ingeniería. Con este programa, la aerolínea generó una guía de

economía de combustible y los empleados son alentados a proponer ideas para ahorrar turbosina.

Koppula (2018) menciona otros esfuerzos realizados: la utilización de sistemas flexibles de navegación y operaciones continuas de ascenso y descenso, lo cual permite seleccionar mejores rutas y condiciones de vuelo que resultaran en menor quema de combustible (por el menor esfuerzo que realiza la aeronave).

Igualmente, cambios en el diseño aerodinámico de las aeronaves, como la utilización de *winglets*, los cuales son dispositivos que se añaden en la punta de las alas para aumentar la eficiencia aerodinámica y reducir el arrastre que a su vez causa consumo de combustible (Koppula, 2018).

Finalmente, existen los cambios de diseño como la reducción del peso general del avión y de sus motores para así, reducir el consumo específico de combustible y aumentar la carga útil.

Warwick (2016), presenta un ejemplo de General Electric con su motor Turbohélice Avanzado, (*ATP*, por sus siglas en inglés *Advanced Turboprop*). Al fabricar 12 componentes mediante manufactura aditiva y reemplazar 855 partes manufacturadas por métodos convencionales, lograron reducir 5% del peso y el consumo de combustible en 1%.

Zelinski (2019), habla de un caso de estudio de la compañía Airbus, en el cual se comparó una bisagra de acero fabricada por fundición, contra una parte equivalente pero optimizada topológicamente y fabricada por medio de impresión 3D con titanio. Entre los resultados obtenidos se encontró que la parte impresa requería de 75% menos material

que la de fundición y que esa reducción de peso representó una reducción en emisiones de dióxido de carbono asociadas con esta parte a lo largo de su vida útil. Los componentes comparados se presentan en la Figura 28.



Figura 28. Comparación de componente fabricado por fundición vs componente fabricado con AM.
Fuente: Zelinski (2019)

III. Capítulo 3: Metodología

Esta sección presenta la metodología utilizada para lograr el objetivo del presente proyecto, el cual busca reducir el peso del motor TPE331-10 en por lo menos 1.5 libras, mediante el desarrollo de una nueva pieza con “Diseño para Manufactura Aditiva”, que fusione dos componentes: el *Turbine Bearing Support* y el *Exhaust Nozzle*.

La investigación es de tipo mixta, pues se recolectan y analizan datos cuantitativos como lo son los pesos de los motores TPE331 y cualitativos, pues se recolectan respuestas y opiniones de expertos en temas relevantes al proyecto.

Además de esto, la metodología utilizada es de carácter experimental. Se busca presentar la realidad de los temas abordados a través de un proceso iterativo en el que se genera una geometría que fusiona los componentes *Turbine Bearing Support* y el *Exhaust Nozzle* y ésta es puesta a prueba por diferentes equipos de la compañía. De encontrar que un cambio es necesario, se genera una geometría con las correcciones necesarias y nuevamente, es puesta a prueba.

3.1. Procedimiento.

El proceso se divide en 5 fases, que se alinean con los objetivos específicos del proyecto: 1) Identificación y análisis de restricciones de operación, diseño y manufactura, 2) Diseño de geometría, 3) Reducción de peso, 4) Iteraciones y 5) Impresión de geometría propuesta. La Figura 29 muestra las fases del proceso, así como las actividades asociadas a cada una.

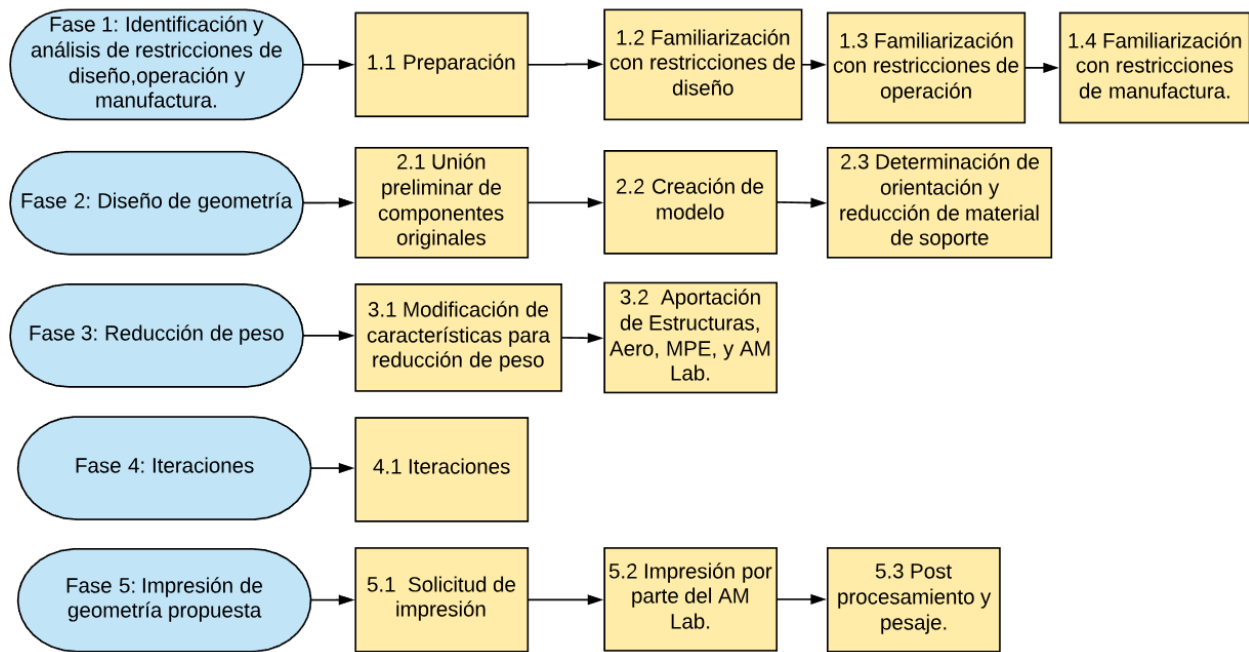


Figura 29. Fases del proceso a seguir durante el proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Durante la primera fase “Identificación y análisis de restricciones de operación, diseño y manufactura”, se busca hacer la preparación e investigación necesarias para familiarizarse con los componentes a trabajar: *Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle* del motor TPE331-10. Esto se realiza por medio de entrevistas a expertos del motor y por medio de análisis de los dibujos de ingeniería y modelos 3D existentes. Se busca identificar tanto, las limitantes que existen en el diseño por las condiciones estructurales y aerodinámicas a las que debe someterse el componente, como, las limitantes que existen por la manera en que la pieza debe ensamblarse con el resto del motor. Además de esto, se pretende establecer cuáles de las limitaciones de la manufactura aditiva afectan el diseño del nuevo componente propuesto.

Durante la fase de “Diseño de geometría” comienza el proceso de “Diseño para la Manufactura Aditiva” se tiene como objetivo crear la fusión geométrica entre los

componentes *Turbine Bearing Support* y el *Exhaust Nozzle*, con base a las restricciones de diseño y manufactura definidas en la fase 1. Se realiza la unión preliminar de los modelos 3D de ambas piezas, utilizando el software *CAD NX 10 de Siemens*, para comenzar a visualizar cómo se vería la fusión entre ellos. Seguido de esto se crea el nuevo modelo 3D, utilizando el “Diseño para Manufactura Aditiva” para asegurar el cumplimiento de las restricciones de diseño y manufactura. En esta fase también se determina la mejor orientación para la impresión, durante consultas con ingenieros del laboratorio de manufactura aditiva.

La tercera fase “Reducción de peso” pretende comprobar que gracias al Diseño para Manufactura Aditiva, la geometría propuesta puede reducir el peso del motor TPE331-10 en más de 1.5 libras. Aquí ocurre la modificación de la geometría generada para eliminación de material y por consecuencia, el peso. Se busca realizar acciones de reducción de peso que no representen concentraciones de esfuerzos riesgosas, modificación de la geometría en contacto con el flujo de aire, y/o necesidad de material de soporte que después no se podrá remover, entre otros aspectos a considerar en la impresión 3D, por lo que es necesario realizar consultas con los departamentos de Estructuras, *M&PE* y el Laboratorio de Manufactura Aditiva (*AM Lab*) sobre las acciones de reducción de peso realizadas.

La cuarta fase “Iteraciones” busca asegurar que la geometría propuesta sea formalmente evaluada por los departamentos de *Aero*, Estructuras, *M&PE* y el *AM Lab*. El modelo les es enviado y éste es evaluado de la siguiente manera: por Estructuras, para determinar si la fusión y reducción de peso como conjunto, han resultado en un componente capaz de resistir las condiciones estructurales a las que será sometido en

operación. Por *M&PE*, para evaluar el post-procesamiento que será necesario, asignarle operaciones a realizar después de la impresión, como lo son operaciones de marcado, el fresado químico (*chemical etching*), inspecciones radiográficas, entre otros. El *AM Lab*, por otra parte, deberá evaluar el producto final para determinar si puede ser impreso de manera satisfactoria. El departamento de *Aero*, se encarga de verificar que las geometrías críticas para el flujo de aire permanezcan funcionales. Si alguno de los departamentos determina que hay cambios necesarios, se realizarán iteraciones para realizar modificaciones al modelo, hasta que todos los involucrados aprueben el nuevo diseño. Una vez aprobado el modelo final para impresión, se realizan las operaciones de maquinado en el modelo y se genera el modelo post-procesado, es decir, el modelo de la parte final.

Finalmente, la quinta fase busca la impresión de un primer prototipo en el laboratorio de manufactura aditiva de Honeywell *Engines* ubicado en Phoenix, AZ, Estados Unidos. Para lograr esto, es necesario haber iterado en la fase tres hasta llegar a un diseño que cumpla con todos los requerimientos de diseño, operación y manufactura y que además muestre que reduce por lo menos 1.5 libras de peso del ensamble del motor TPE331 al realizar una medición de peso en el *software NX* de *Siemens*. En esta fase únicamente es necesario realizar la solicitud de impresión al laboratorio y proporcionarles el modelo 3D en formato *.step*. Al final de la fase se espera tener un componente terminado y se espera realizar el pesaje para confirmar si se cumple o no el peso predicho por el *software NX*.

3.2. Planeación.

En la Tabla 1 se puede observar un resumen de la planeación, con los entregables para cada fase de la metodología a seguir.

Tabla 1. Planeación.

ACTIVIDAD	ENTREGABLE	DESCRIPCION DEL ENTREGABLE	TIEMPO (HORAS)
FASE 1: "Identificación y análisis de restricciones de operación, diseño y manufactura"			17
1.1 Preparación	Resumen de la tarea asignada	" <i>Checklist</i> " para identificar si se tiene lo necesario para comenzar la asignación.	3
1.2 Familiarización con las restricciones de diseño	Resumen de características de los componentes " <i>Turbine Bearing Support</i> " y " <i>Exhaust Nozzle</i> "	Resumen sobre los componentes contestando a las preguntas: ¿Qué es? ¿Cuál es su función? ¿Cómo se ensambla con otros componentes? ¿Cuánto pesa? ¿Cuánto mide su <i>envelope</i> ?	5
1.3 Familiarización con las restricciones de operación	Resumen de restricciones operacionales de los componentes " <i>Turbine Bearing Support</i> " y " <i>Exhaust Nozzle</i> "	Lista de superficies, interfaces, espesores o dimensiones críticas que son cruciales para la correcta operación de los componentes.	5
1.4 Familiarización con las restricciones de manufactura.	Resumen de restricciones de manufactura a tomar en cuenta.	Lista de posibles restricciones de manufactura: superficies en voladizo (<i>overhangs</i>), tamaño potencial del componente, necesidad de material de soporte.	4
FASE 2: "Diseño de geometría"			52
2.1 Unión preliminar de los componentes "<i>Turbine Bearing Housing</i>" y "<i>Exhaust Nozzle</i>"	Modelo 3D	Modelo 3D en software NX de la fusión preliminar de los componentes.	9

2.2 Creación del modelo	Modelo 3D	Modelo 3D en software NX de la propuesta de diseño.	25
2.3 Determinación de orientación y reducción de material de soporte	Orientación de impresión óptima	Modelo 3D en software NX que muestre la orientación del componente con respecto a la placa de la impresora 3D. La orientación elegida debe justificarse.	18
FASE 3: "Reducción de peso"			46
3.1 Modificación de características para reducción de peso	Modelo 3D	Modelo 3D en software NX que indique una reducción de peso de al menos 1.5 lb en comparación con la suma de los pesos de los componentes originales.	16
3.2 Aportación de Estructuras, Aero, MPE y AM Lab	Resumen de aportaciones de otros departamentos	<i>Checklist</i> de aprobación de la geometría por parte de los departamentos de Estructuras, Aero, M&PE, y el laboratorio de AM.	30
FASE 4: "Iteraciones"			150
4.1 Iteraciones	Modelo 3D para impresión y modelo post-procesado.	Modelos 3D en software NX resultantes de las iteraciones realizadas a partir de la consulta y aportaciones de los departamentos de Estructuras, Aero, M&PE, y el laboratorio de AM. Se espera tener un historial de cada versión del modelo tras una nueva iteración hasta que el modelo sea aceptado por todos los departamentos.	150
FASE 5: "Impresión de geometría propuesta" Entregable: Prototipo terminado			77
5.1 Solicitud de impresión	WRS (Solicitud de trabajo)	Formato de solicitud de trabajo al laboratorio de Manufactura Aditiva	1
5.2 Impresión por parte del AM Lab	Pieza impresa sin procesar	Pieza impresa que aún no es despegada de la placa de impresión.	26
5.3 Post procesamiento y pesaje	Pieza post procesada	Componente maquinado y terminado que es pesado para comprobar la disminución de peso.	50

Fuente: Elaboración propia.

3.3. Cronograma.

Tomando en cuenta días laborales de 9 horas, el tiempo institucional y sin actividad, se cuenta con el siguiente cronograma (Figura 30), donde se muestra la lista de actividades para cada fase y la planeación en cuanto a las fechas estimadas de ejecución y conclusión para cada una.

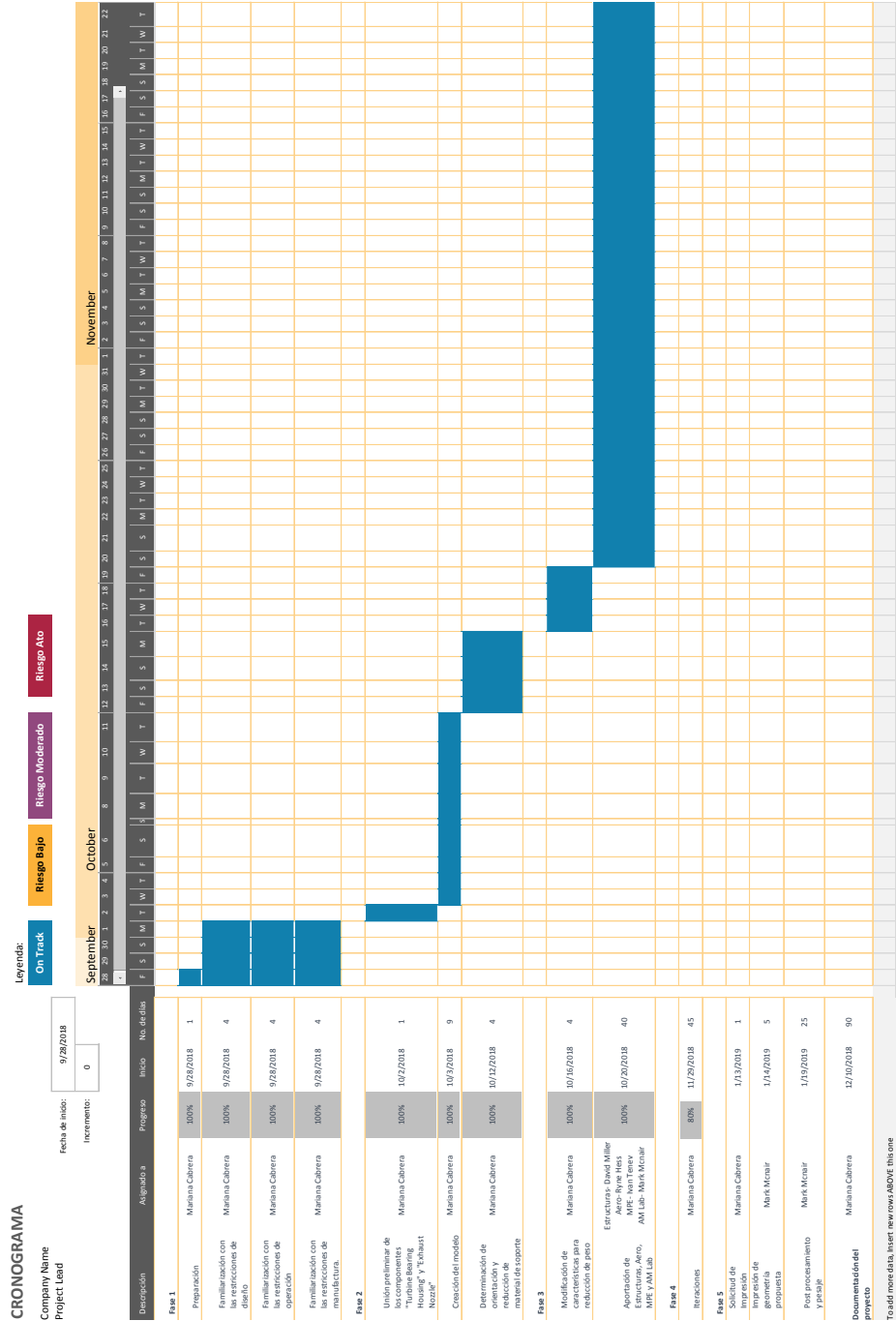


Figura 30. Cronograma.
 Fuente: Elaboración propia

CRONOGRAMA

Company Name
Project Lead

Legenda:

-
 On Track
-
 Riesgo Bajo
-
 Riesgo Moderado
-
 Riesgo Ato

Fecha de Inicio: 9/28/2018
Incremento: 55

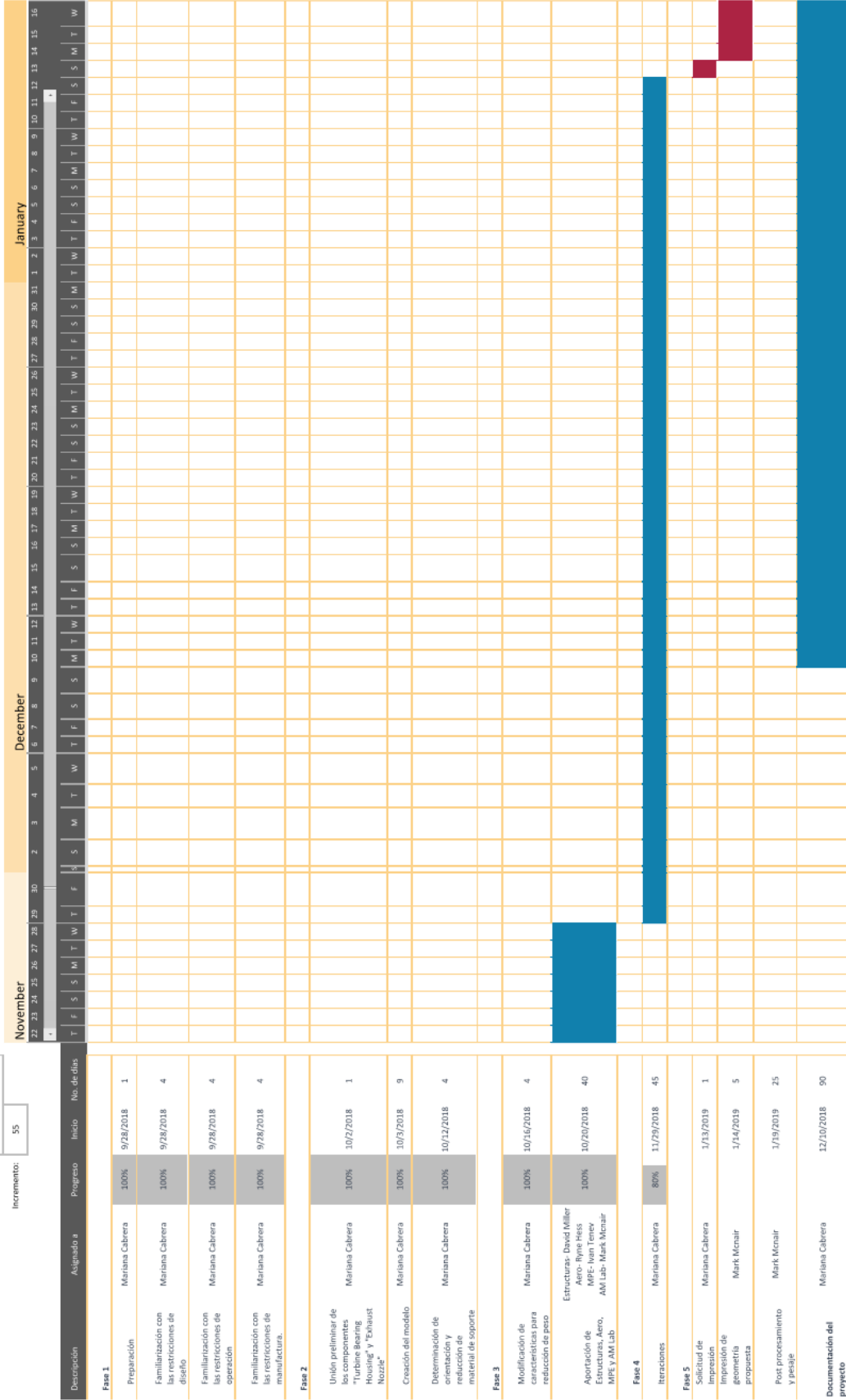


Figura 30. Cronograma.
Fuente: Elaboración propia
(Continuación)

CRONOGRAMA

Company Name
Project Lead

Fecha de inicio: 9/28/2018

Incrementos: 110

Leyenda:

On Track

Riesgo Bajo

Riesgo Moderado

Riesgo Alto

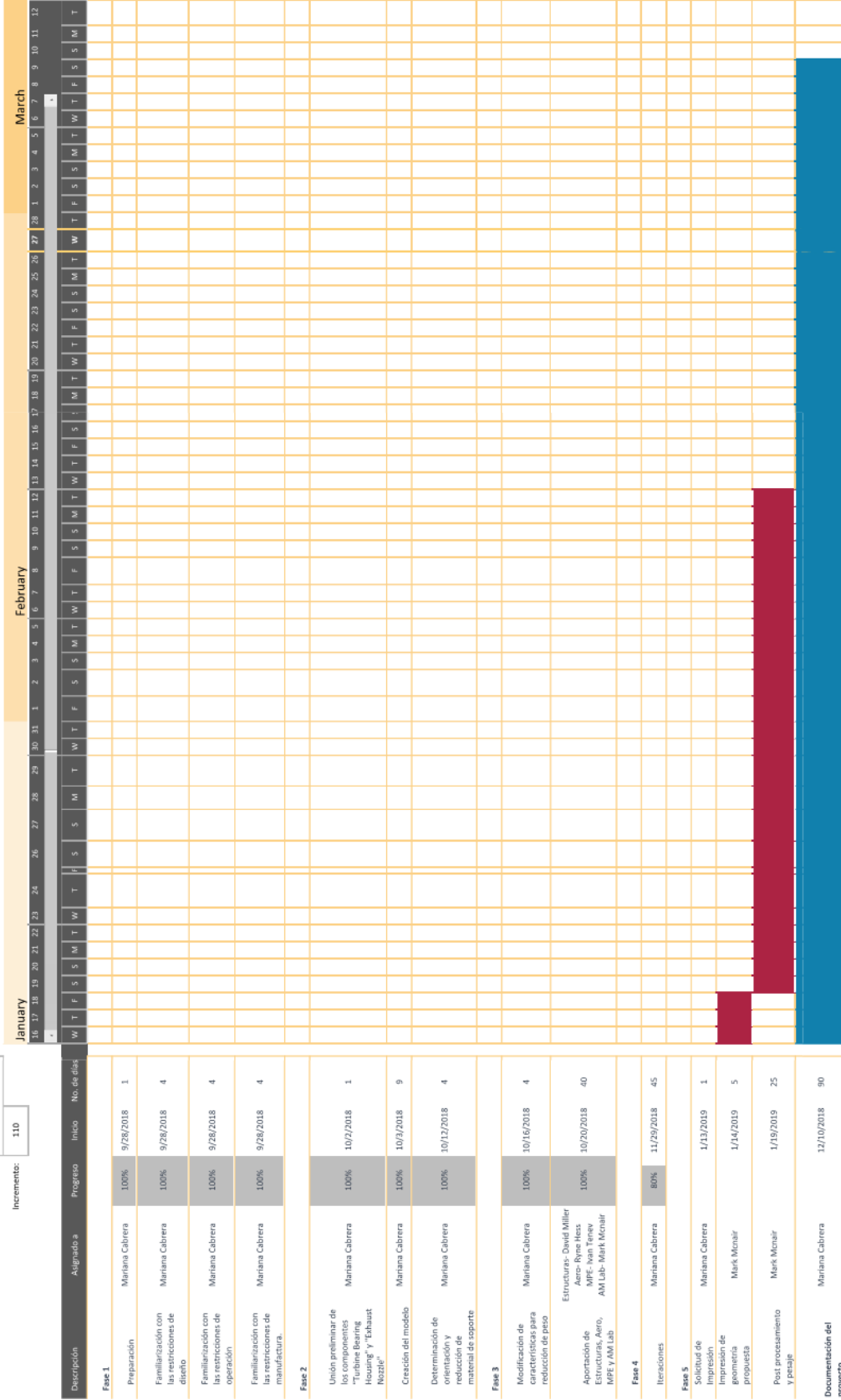


Figura 30. Cronograma.
Fuente: Elaboración propia
(Continuación)

3.4. Recursos.

Para poder cumplir con lo estipulado anteriormente, cada una de las fases requerirá de los siguientes recursos, mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Recursos

ACTIVIDAD	RECURSOS MATERIALES	RECURSOS HUMANOS	PRESUPUESTO (HORAS)	PERMISOS DE LA INSTITUCION DONDE SERÁ REALIZADO EL PROYECTO
FASE 1: "Identificación y análisis de restricciones de operación, diseño y manufactura"			20	NA
1.1 Preparación	Computadora <i>Work Station</i> Acceso a internet y servidor de <i>Honeywell</i>	Consulta con el ingeniero de proyectos de la tarea	NA	NA
1.2 Familiarización con las restricciones de diseño	Computadora <i>Work Station</i> Acceso a internet y servidor de <i>Honeywell</i> <i>Software CAD NX10</i>	Consulta con el ingeniero de proyectos de la tarea	NA	NA
1.3 Familiarización con las restricciones de operación	Computadora <i>Work Station</i> Acceso a internet y servidor de <i>Honeywell</i> <i>Software CAD NX10</i>	Consulta con el ingeniero y con ingenieros expertos con los componentes a fusionar.	NA	NA
1.4 Familiarización con las restricciones de manufactura.	Computadora <i>Work Station</i> Acceso a internet y servidor de <i>Honeywell</i> <i>Software CAD NX10</i>	Consulta con ingenieros del equipo de manufactura aditiva.	NA	NA
FASE 2: "Diseño de geometría"			60	NA
2.1 Unión preliminar de los componentes "Turbine Bearing Housing" y "Exhaust Nozzle"	Computadora <i>Work Station</i> Acceso a internet y servidor de <i>Honeywell</i> <i>Software CAD NX10</i>	NA	NA	NA
2.2 Creación del modelo	Computadora <i>Work Station</i> Acceso a internet y servidor de <i>Honeywell</i> <i>Software CAD NX10</i>	NA	NA	NA

2.3 Determinación de orientación y reducción de material de soporte	Computadora <i>Work Station</i> Acceso a internet y servidor de <i>Honeywell</i> <i>Software CAD NX10</i>	Consulta con ingenieros del laboratorio de manufactura aditiva	NA	NA
FASE 3: "Reducción de peso"			70	NA
3.1 Modificación de características para reducción de peso	Computadora <i>Work Station</i> Acceso a internet y servidor de <i>Honeywell</i> <i>Software CAD NX10</i>	NA	NA	NA
3.2 Aportación de Estructuras, Aero, MPE y AM Lab	Computadora <i>Work Station</i> Acceso a internet y servidor de <i>Honeywell</i>	NA	NA	NA
FASE 4: "Iteraciones"			120	NA
4.1 Iteraciones	Computadora <i>Work Station</i> Acceso a internet y servidor de <i>Honeywell</i> <i>Software CAD NX10</i>	Consulta con ingenieros del laboratorio de manufactura aditiva, Estructuras, Aero y M&PE	NA	NA
FASE 5: "Impresión de geometría propuesta"			77	Orden de trabajo de ISC y laboratorio de manufactura aditiva aprobada
5.1 Solicitud de impresión	Computadora <i>Work Station</i> Acceso a internet y servidor de <i>Honeywell</i>	Consulta con el ingeniero de proyectos	NA	NA
5.2 Impresión por parte del AM Lab	NA	Esta acción es realizada por ingenieros del laboratorio de manufactura aditiva	NA	NA
5.3 Post procesamiento y pesaje	NA	Esta acción es realizada por ingenieros del laboratorio de manufactura aditiva y planta ISC en Phoenix, AZ.		NA

Fuente: elaboración propia.

Además, para la realización del presente proyecto, es necesario tomar en cuenta la necesidad de los recursos mostrados en la Tabla 3.

Tabla 3. Recursos

DOCUMENTACION DEL PROYECTO			
Actividad		RECURSOS HUMANOS NECESARIOS	PERMISOS DE LA INSTITUCION DONDE SERÁ REALIZADO EL PROYECTO
a)	Elaboración del capítulo 1	Interacciones con expertos en manufactura aditiva y el TPE331 en <i>Honeywell</i> . Interacción con Directora de proyecto.	Autorización de proyecto y carta institucional en inglés y español para presentar a quienes lo requieran al ser consultados como expertos o para obtener datos del motor TPE331.
b)	Elaboración del capítulo 2	Interacciones con expertos en manufactura aditiva y el TPE331 en <i>Honeywell</i> . Interacción con Directora de proyecto.	Autorización de proyecto y carta institucional en inglés y español para presentar a quienes lo requieran al ser consultados como expertos o para obtener datos del motor TPE331.
c)	Elaboración del capítulo 3	Interacciones con expertos en manufactura aditiva y el TPE331 en <i>Honeywell</i> . Interacción con Directora de proyecto.	Autorización de proyecto y carta institucional en inglés y español para presentar a quienes lo requieran al ser consultados como expertos o para obtener datos del motor TPE331.
e)	Elaboración del capítulo 5	Interacciones con expertos en manufactura aditiva y el TPE331 en <i>Honeywell</i> . Interacción con Directora de proyecto.	Autorización de proyecto y carta institucional en inglés y español para presentar a quienes lo requieran al ser consultados como expertos o para obtener datos del motor TPE331.

Fuente: elaboración propia.

IV. Capítulo 4: Resultados

En el presente apartado se presentan los resultados obtenidos en el presente proyecto de aplicación, el cual tuvo el objetivo de desarrollar una nueva pieza para el motor TPE331 mediante la fusión de dos componentes diferentes (*Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle*), con el fin de reducir al menos 1.5 libras de peso. Los resultados se presentan de acuerdo a la metodología definida en el Capítulo III de este documento, la cual consistió en 5 fases alineadas a cada uno de los objetivos específicos.

4.1. Fase 1: “Identificación y análisis de restricciones de operación, diseño y manufactura”.

La primera fase buscaba la familiarización con los requerimientos, restricciones, funciones y características de los componentes “*Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle*” del TPE331 desde 3 perspectivas distintas: operación, diseño y manufactura. Esto para determinar elementos críticos de las geometrías que deben permanecer en el componente resultante de la fusión de ambas piezas, es decir, qué podía cambiarse y qué no. Para ello se realizaron cuatro actividades.

Para la primera actividad, “Preparación”, se consultó con el ingeniero de proyectos sobre el objetivo de la tarea asignada y sobre los requerimientos internos de la compañía para comenzar a trabajar. Como resultados se obtuvo la lista de nombres e información de interés presentada en la Figura 31.

NUMERO DE CARGO:	
<input checked="" type="checkbox"/>	SI
<input type="checkbox"/>	NO
DEPARTAMENTO: PHX 60079	
PROGRAMA: TPE 331	
CM: DENISE MILSAPS	
PROJECT ENGINEER: RYNE HESS	
LIDER DE DISEÑO: JOSE CANEZ	
TAREA: Unir componentes 3101529-5 y 3101582-8 para reducir 1.5 lb de peso.	

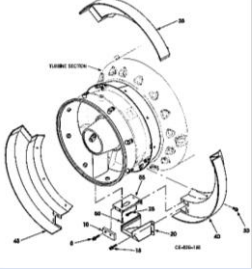
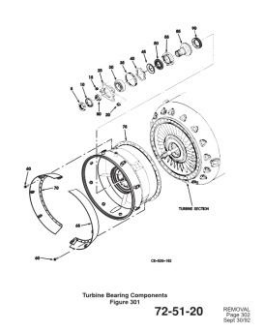
Figura 31. Checklist para dar inicio a la tarea.
Fuente: Elaboración propia.

En la segunda actividad de esta fase, “Familiarización con las restricciones de diseño”, se buscó obtener un resumen sobre los componentes “*Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle*”. Para ello se diseñó una serie de preguntas que sirvieran para identificar y conocer los componentes. Las preguntas generadas fueron:

¿Qué es?, ¿Cuál es su función?, ¿Cómo se ensambla con otros componentes?
¿Cuánto pesan?, ¿Cuánto miden sus *envelopes*?

De acuerdo a éstas, se realizaron entrevistas al ingeniero de proyectos y al líder de diseño del motor TPE331. Además de esto, se realizó un análisis del ensamble del motor y de los planos individuales de los componentes a fusionar. Como resultado de las entrevistas y de los análisis realizados, se presenta la Tabla 4, donde se describen las características relevantes de los componentes.

Tabla 4. Características principales del Turbine Bearing Support y Exhaust Nozzle

Componente	Función	Peso [lb]	Envelope (Volumen burdo de impresión) [in ³]	Ensamble con otros componentes
<i>Turbine Bearing Support</i>	Transferir cargas radiales a la estructura principal y transmitir el flujo del escape de la turbina mediante un difusor	7.186	12x12x4	 
<i>Exhaust Nozzle</i>	Provee monturas para 8 termopares T5 de salida, así como de una cavidad anular para sensores con diez agujeros de .048 pulgadas. Funciona como soporte para el puerto por donde entra aceite al <i>turbine bearing</i> . Finalmente, provee de una brida para la unión del motor con la interfaz del cliente.	5.6	5.82x13x13	

Fuente: elaboración propia.

De la tabla anterior es importante resaltar la importancia de conocer el peso de los componentes originales, pues la suma de éstos será comparada con el peso final de la pieza resultante de éste proyecto. El *envelope*, el cual representa el volumen de impresión (largo x alto x ancho), permite conocer si la fusión de los componentes cabrá en las impresoras 3D. Mientras que conocer el cómo se ensamblan los componentes permite confirmar que ninguna otra pieza se ensambla entre el *Bearing Support* y el *Exhaust Nozzle*, lo cual hace viable que ambas piezas se fusionen y sean fabricadas simultáneamente. Además de esto, se aprendió que existen muchas operaciones de soldadura para unir las diferentes piezas de cada componente, las cuales traen consigo problemas de calidad y material extra por los cordones de soldadura.

Para la tercera actividad de la fase, “Familiarización con las restricciones de operación”, se entrevistaron tanto al ingeniero de proyectos como a ingenieros de manufactura que conocen las superficies y zonas críticas para el ensamble y flujo aerodinámico. Además de esto, se consultó con el departamento de estructuras sobre zonas estructurales críticas.

Como resultado de estas entrevistas se determinó, con respecto al componente *Exhaust Nozzle*, que las zonas resaltadas en la Figura 32 muestran aquellas que son críticas por ser parte de la interfaz del componente con el resto del ensamble. Éstas incluyen las bridas que conectan con la turbina e interfaz del cliente, las interfaces para el sensor de presión estática y termopares, así como el puerto que permite el flujo de aceite.

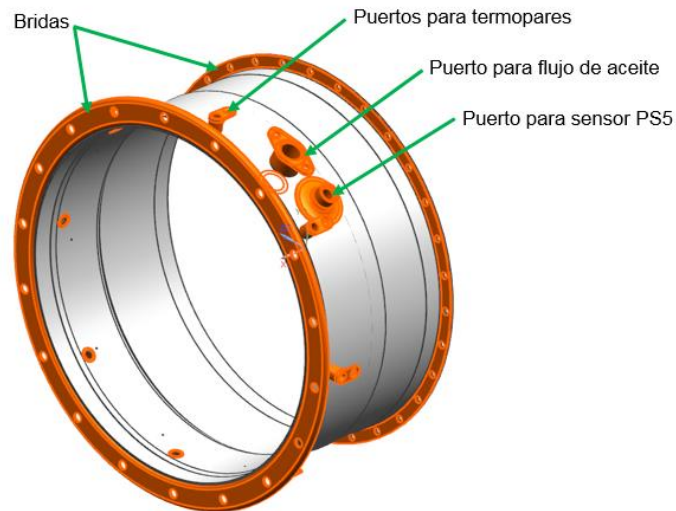


Figura 32. Zonas críticas del Exhaust Nozzle.
Fuente: Elaboración propia.

Otro resultado que se obtuvo fue la familiarización con una cavidad anular de la esta pieza llamada “*anulus*”, la cual sirve para medir la presión estática de la etapa 5 del motor, conocida como “*PS5*” (Figura 33). El tamaño de esta cavidad es resultante del

método de manufactura convencional del componente, el cual utiliza *sheet metal* y soldadura. Es importante mencionar que las entrevistas realizadas arrojaron que el tamaño del “*anulus*” podía reducirse. Con esto, se identificó un potencial cambio de geometría en esta zona que no necesitaría de soldadura ni de las dos hojas de metal utilizadas en el componente original.

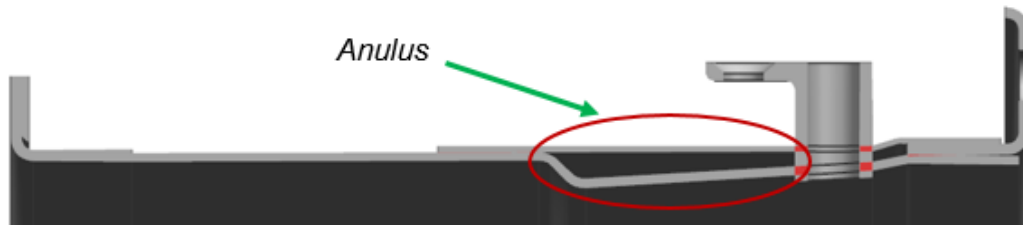
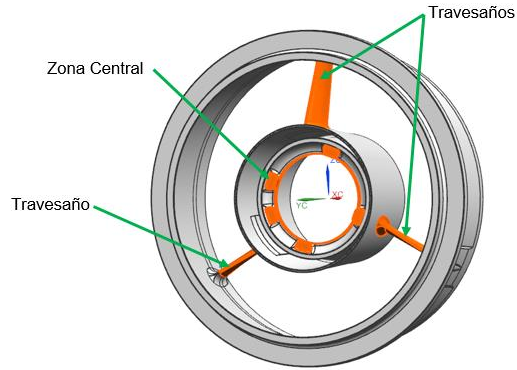


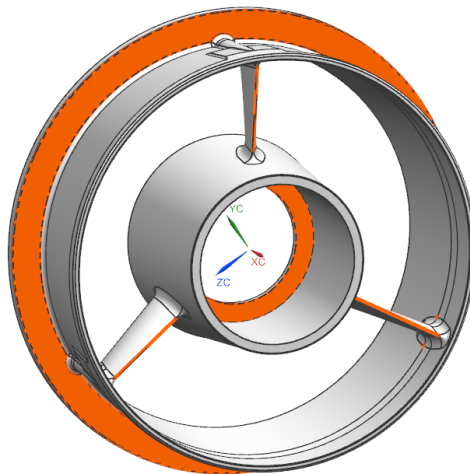
Figura 33. Vista de sección transversal del Exhaust Nozzle que muestra el “*anulus*” (circulado en rojo).
Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al componente *Bearing Support*, resultó que las zonas resaltadas en la Figura 34 muestran zonas críticas en el centro por ser interfaz de ensamble con el resto de los componentes del TPE331 y 3 zonas críticas estructurales y aerodinámicas (perfiles alares que funcionan como travesaños y sostienen la zona central con el resto de la carcasa). Se aprendió sin embargo, que las cargas a las que se someten los travesaños no son muy altas, y que se podía buscar volverlos huecos y así reducir el peso. De igual modo, al analizar el plano de este componente, se observó que existían elementos tipo “diente” utilizados para ensamblarse con el resto del motor. Estos elementos no se mostraban en el modelo 3D de la pieza original, pero si debían estar presentes en el nuevo modelo propuesto.



*Figura 34. Zonas críticas del Bearing Support.
Fuente: Elaboración propia.*

Para finalizar la fase uno, en la actividad cuatro, “Familiarización con las restricciones de manufactura”, se analizaron las posibles restricciones para la impresión de los componentes, en base a la teoría de Diseño para Manufactura Aditiva, como lo son superficies en voladizo, local mínima, acabado de las superficies y agujeros laterales. Como resultado de esta actividad, las figuras 35 y 36 muestran superficies que, aun en la orientación de impresión más lógica, necesitarán de material de soporte y/o probablemente resulten con un acabado superficial pobre. Se encontró que lo ideal era que las zonas marcadas en los 3 travesaños de la Figura 35, fueran orientadas hacia abajo, pues éstas son superficies de salida del aire.



*Figura 35. Zonas problemáticas para impresión del Bearing Support.
Fuente: Elaboración propia.*

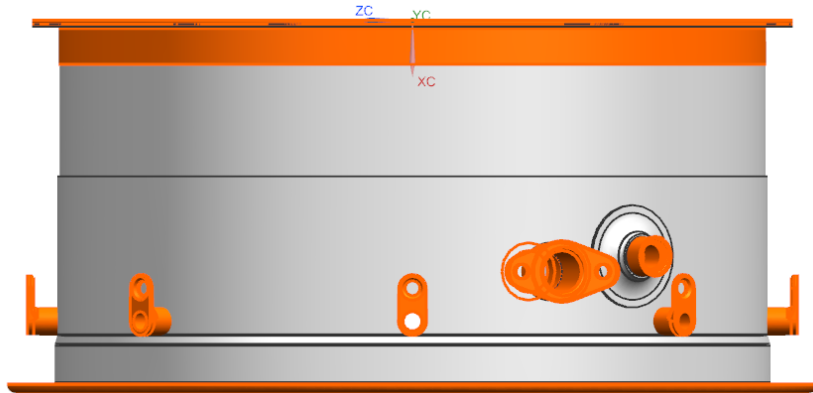


Figura 36. Zonas problemáticas para impresión del Exhaust Nozzle.
Fuente: Elaboración propia.

4.2. Fase 2: “Diseño de geometría”

Durante la fase 2 del procedimiento, se buscó fusionar las geometrías de los componentes *Turbine Bearing Support* y el *Exhaust Nozzle*, con base a las restricciones de diseño y manufactura que se encontraron durante la fase 1, así como determinar la mejor orientación para la impresión del componente propuesto. Esto requirió tres actividades.

La primera actividad, “Unión preliminar de los componentes *Turbine Bearing Housing* y *Exhaust Nozzle*” consistió en crear un ensamble preparatorio de los modelos 3D individuales de cada pieza, con el software NX10 de Siemens. Básicamente, los modelos se colocaron en la posición en la que normalmente son ensambladas las partes; para visualizar las piezas como una sola. El resultado se muestra en la Figura 37, donde se puede observar el *Exhaust Nozzle* de color azul y el *Turbine Bearing Support* de color gris. Además, como resultado de esta visualización preliminar, al realizar un corte de sección, se pudieron observar no solamente el *Anulus* y otro claro que existe entre ambos componentes (B, en la Figura 38), sino también las diferentes piezas de metal y de *sheet*

metal que conforman el arreglo para crear el puerto para el sensor de presión PS5 (A, en la Figura 38). Esto presentó una oportunidad para que, en fases y actividades posteriores, se simplificara la geometría de esa zona por medio de DfAM.

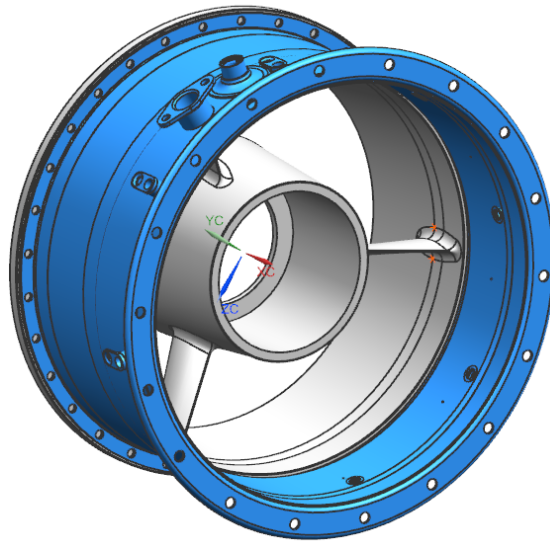


Figura 37. Unión para visualización del Turbine Bearing Support y el Exhaust Nozzle.
Fuente: Elaboración propia.

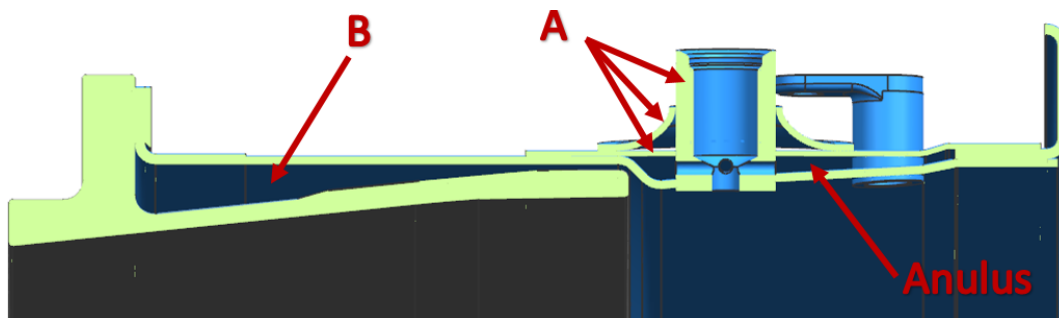


Figura 38. Vista de sección transversal de la unión preliminar del Turbine Bearing Support y el Exhaust Nozzle. A) Arreglo para el sensor de presión P5 y B) Claro entre ambos componentes
Fuente: Elaboración propia.

Para la segunda actividad, “Creación del modelo”, lo que se buscó fue modelar en 3D el nuevo componente como una sola geometría, fusionando las caras que fueran posibles, según la información obtenida como resultado de las fases anteriores.

Como resultado de esta actividad se obtuvo una primera geometría que buscaba incorporar desde la impresión, elementos que en los componentes originales eran maquinados después de la obtención de la pieza de *sheet metal* o fundición, por ejemplo: barrenos laterales de .125 pulgadas, los cuales según la teoría de DfAM, no necesitan de material de soporte para sostenerse durante la impresión.

Esta geometría permitía además eliminar el arreglo complicado del puerto para el sensor de presión. Esto hizo posible eliminar las hojas de metal, la barra de metal maquinada y las operaciones de soldadura necesarias para unirlos. La Figura 39 muestra el antes y el después de esta zona del componente. Se puede observar que de tener 6 piezas individuales que se soldaban, se obtuvo una sola pieza que no requería ninguna operación de soldadura.

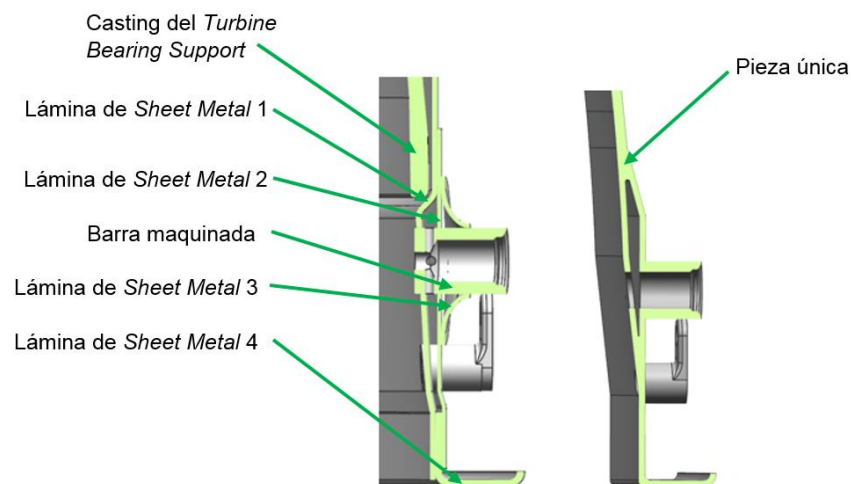


Figura 39. Izquierda: Arreglo para conexión de sensor de presión original. Derecha: Arreglo para conexión del sensor de presión propuesto con DfAM.
Fuente: Elaboración propia.

Como consecuencia de esta nueva configuración más simple, el volumen del *Anulus* se vio reducido y tomó un valor de 5.2975 in³. El peso del componente indicado por el *software* CAD NX10 en este punto del proceso fue de aproximadamente 14 libras.

Cabe mencionar que los 8 puertos para termopares también fueron impresos, eliminando así 8 operaciones de soldadura adicionales. Con esto, se tiene que un total de 12 piezas que eran soldadas entre sí, fueron fusionadas en una sola.

Para la tercera actividad de esta fase “Determinación de orientación y reducción de material de soporte”, se utilizó la teoría de *DfAM* para resolver potenciales problemas de manufactura mediante la selección de la orientación óptima de impresión y mediante la modificación de la geometría para reducir los soportes necesarios. La Figura 40 muestra el resultado de la implementación de un radio bajo la brida superior para evitar material de soporte. También se implementaron aperturas con forma de gota que permiten la extracción de polvo de metal sobrante (no fusionado) sin necesitar de material de soporte. La figura muestra también el resultado de la selección de orientación óptima, la cual fue elegida por requerir la menor cantidad de soportes. Además de esto, los soportes que si se necesitaran, estarían en contacto con caras que no requerían un acabado superficial muy bueno.

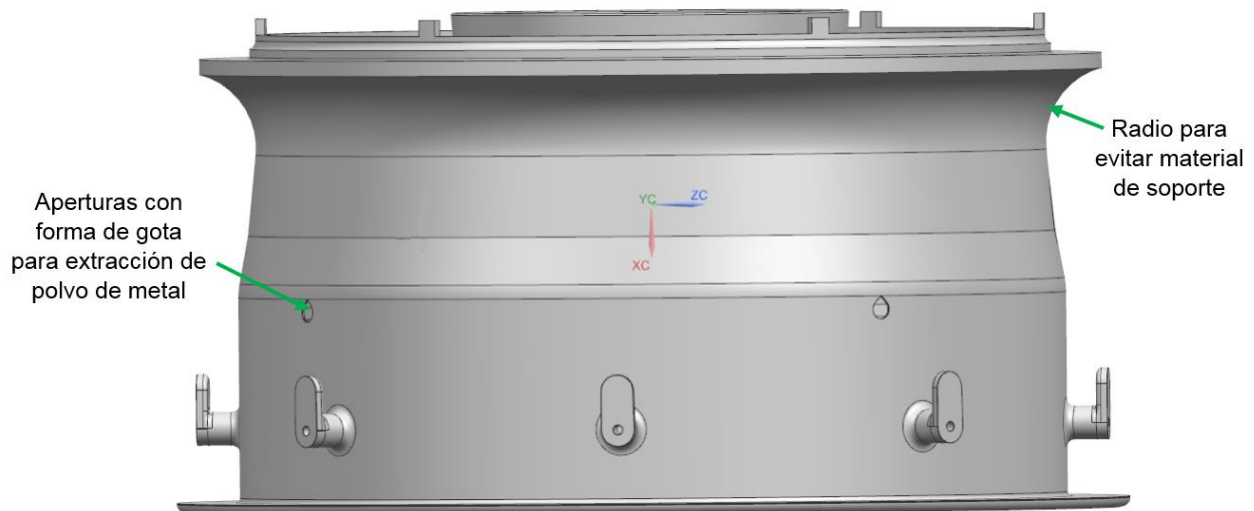


Figura 40. Primera propuesta de geometría. Fuente: Elaboración propia.

El peso del componente indicado por el *software* NX10 en este punto del proceso fue de aproximadamente 14.5 libras.

4.3. Fase 3: “Reducción de peso”

La tercera fase de la metodología tenía como objetivo utilizar el Diseño para Manufactura Aditiva para eliminar aún más peso del que se eliminó como resultado de la fusión entre los componentes en la fase 2.

La Figura 41 muestra el resultado obtenido de la fase 3, donde puede observarse un *Anulus* mucho más pequeño, con volumen de 1.9985 in³, así como aperturas resultantes de que los travesaños se diseñaran huecos. Además, muestra un corte de sección que permite ver por dentro dichos travesaños.

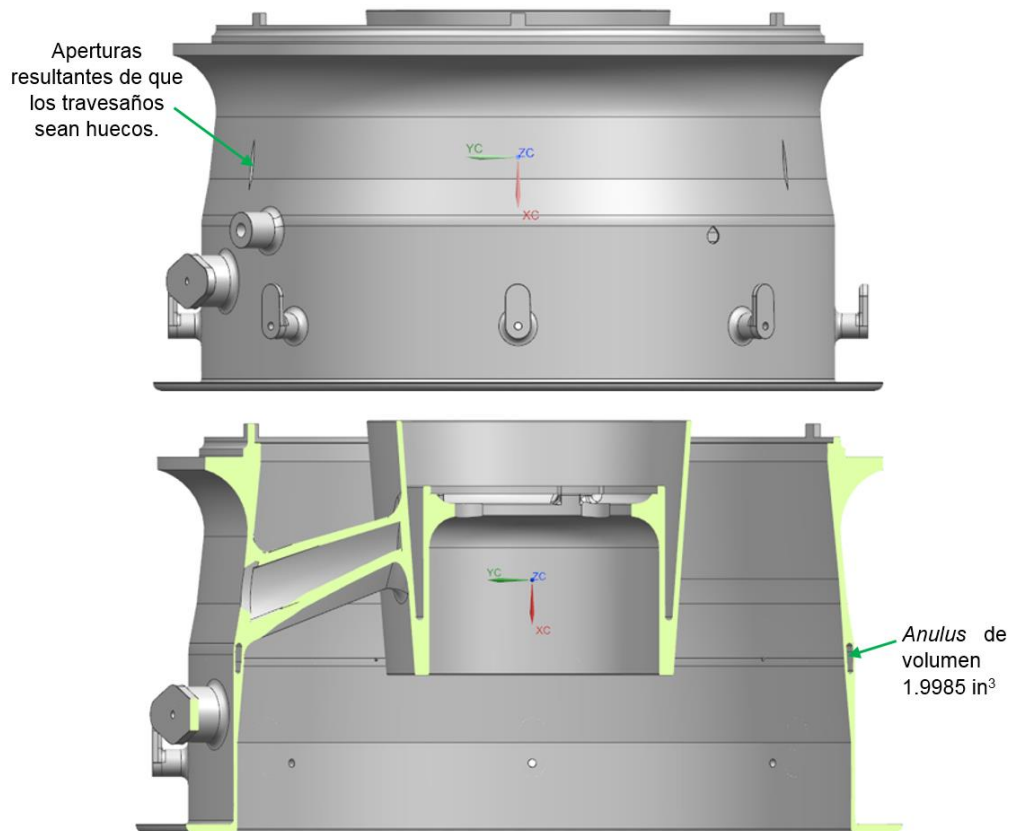


Figura 41. Resultados de fase 3.
Fuente: Elaboración propia.

Para la obtención de los resultados mencionados, se realizaron dos actividades que son explicadas a continuación:

La primera actividad “Modificación de características para reducción de peso” consistió en el análisis de la pieza propuesta para identificar y modelar en 3D, acciones de disminución de material con el único objetivo de eliminar peso. Fue importante tener en cuenta los resultados obtenidos durante la fase 1, donde ocurrió la familiarización con los componentes.

Como resultado del análisis se obtuvo que el volumen del *Anulus* podía ser aún más pequeño, permitiendo así eliminar un área grande de material que cubría el exterior de la cavidad (lo cual eliminaría peso). Otro resultado a destacar, fue la propuesta de hacer huecos los perfiles que funcionaban como unión entre la parte central y la carcasa del *Bearing Support*.

Los resultados de la primera actividad estuvieron muy de la mano con la actividad dos: “Aportación de Estructuras, *Aero*, *MPE* y *AM Lab*”.

El objetivo de esta segunda actividad era obtener la aprobación de los departamentos de Estructuras, *Aero*, *MPE* y *AM Lab* de las acciones de reducción de peso propuestas en la primera actividad.

La consulta con los ingenieros de dichos grupos, permitió que las acciones de reducción de peso fueran aprobadas o rechazadas. Además de esto, la entrevista e intercambio de información con ellos, permitió mejorar las modificaciones propuestas antes de ser formalmente evaluadas por ellos.

Como resultado de esto se obtuvo la aprobación preliminar del departamento de aerodinámica, estructuras, *MPE* y *AM Lab*.

Gracias a estas acciones, se eliminaron .5 libras de peso, quedando el estimado arrojado por NX10 en aproximadamente 14 libras.

4.4. Fase 4: “Iteraciones”

La cuarta fase del procedimiento tenía como objetivo modificar la geometría propuesta según fuese requerido por los departamentos de Aero, Estructuras, M&PE y el AM Lab, tras ser evaluada formalmente por ellos. En el Anexo 1 se presenta una fotografía de una prueba de impresión realizada en Honeywell de República Checa antes de concluir las iteraciones.

Tras 3 iteraciones, se obtuvieron los siguientes resultados por parte de los 4 departamentos:

- El departamento de *Aero* corroboró que las superficies propuestas funcionaran de igual manera que en el ensamble original a nivel maquinado, es decir, después del post-procesamiento.
- Estructuras realizó un análisis estructural por elemento finito de la geometría, y se recalcó que el espesor de pared mínimo que podía existir en la pieza era de .06 pulgadas.
- El *AM Lab* solicitó adición de material de *stock* (material que es removido en el post-procesamiento) para asegurar un maquinado completo, sin remanentes. Además de esto, se requirió de la utilización de *chamfers* para eliminar la necesidad de material de soporte en los puertos para los termopares y en el puerto del sensor de presión. Otro cambio importante requerido fue el cambio del radio de la brida superior, por un *chamfer* a 45 grados con respecto a la placa de impresión. De igual forma, solicitaron

mejorar las características de la brida que estaría en contacto con la placa de impresión.

- Materiales y Procesos asignó los post-procesamientos necesarios, los cuales se mostrarán en el dibujo de ingeniería de la pieza, una vez que comience el proceso de liberación.

Durante las iteraciones también fue requerido que los agujeros que se habían considerado para ser impresos en lugar de ser maquinados durante el post-procesamiento, fueran eliminados del modelo para que éstos tuvieran un mejor acabado superficial.

Con base a los resultados obtenidos, se hicieron las modificaciones necesarias al modelo 3D durante las iteraciones. Los resultados de dichas modificaciones se muestran en las Figuras 42, 43, 44 y 45 y se pueden identificar con las letras asignadas a continuación:

A) Adición de .05 pulgadas de stock en las zonas marcadas en la Figura 42.

B) Adición de *chamfers* para evitar material de soporte.

C) Reemplazo de radios de las bridas superiores por *chamfers*.

D) Eliminación de agujeros laterales a nivel impresión (Figura 45).

E) Modificación de brida inferior: se incluyó un *chamfer* para facilitar el desprendimiento del componente de la placa de impresión, utilizando mecanizado por haz de electrones (*EBM*, por sus siglas en inglés *Electron*

Beam Machining). También se eliminaron los radios internos que estarían en contacto con la placa.

La adición de material en *chamfers* y en *stock*, causaron un aumento del peso arrojado por el *software* NX10, el cual alcanzó casi las 16 libras.

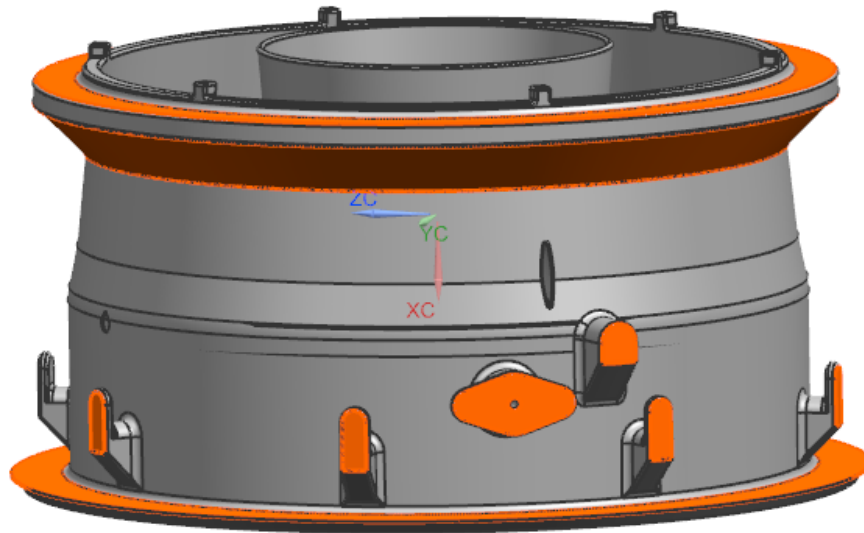


Figura 42. Zonas donde se añadió stock.
Fuente: Elaboración propia.

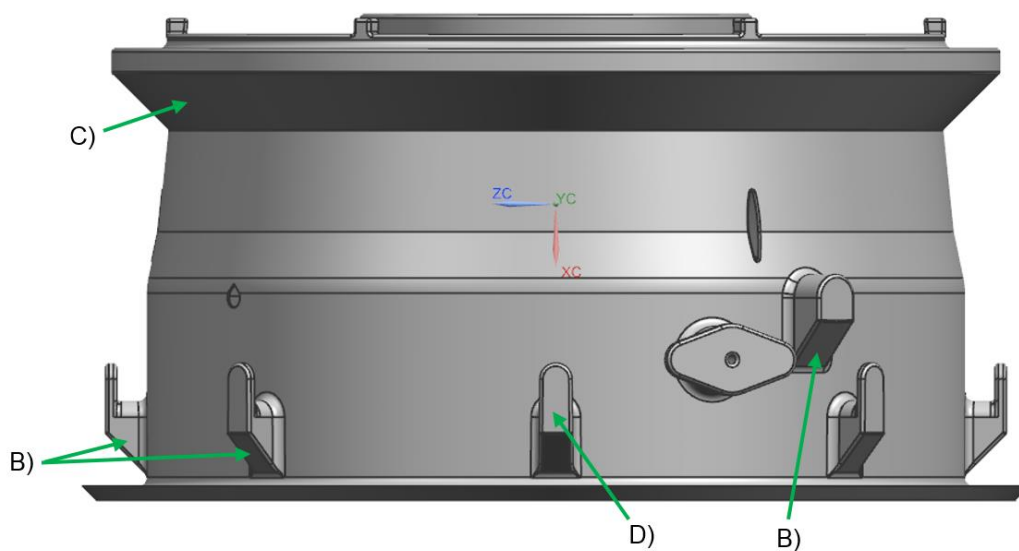


Figura 43. Modelo resultante de etapa 4.
Fuente: Elaboración propia.

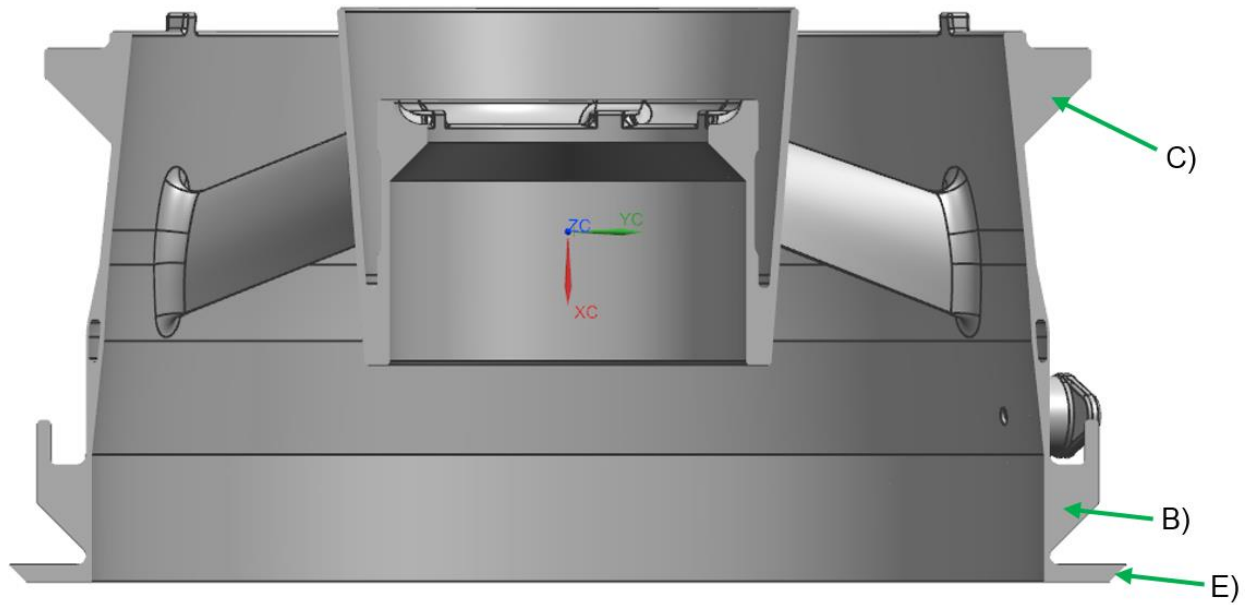


Figura 44. Sección transversal de modelo resultante de etapa 4.
Fuente: Elaboración propia.

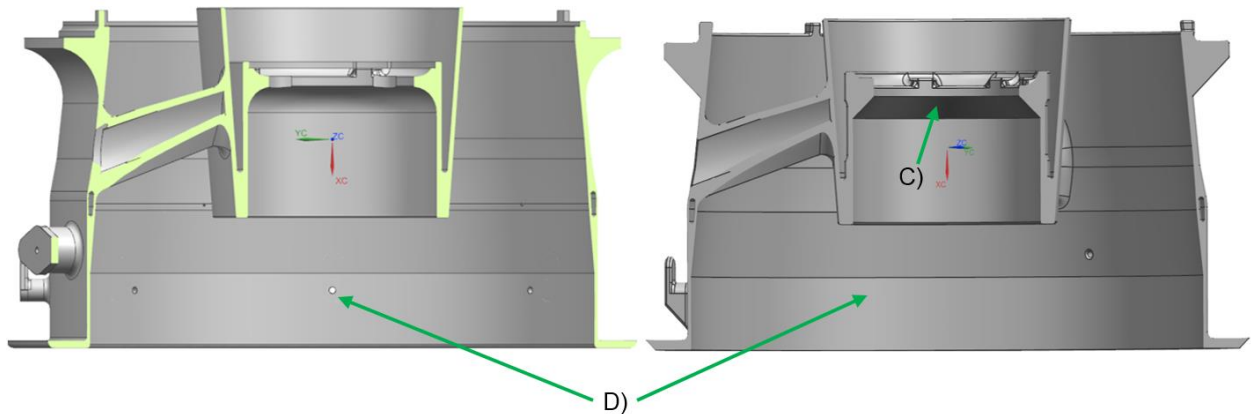


Figura 45. Modelo resultante de etapa 3 (izquierda) VS Modelo resultante de etapa 4 (derecha). Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se contó con el modelo final para impresión, se realizó la simulación del post procesamiento, lo cual generó el resultado mostrado en las Figuras 46, 47 y 48, en las que las zonas que fueron maquinadas están marcadas en azul.

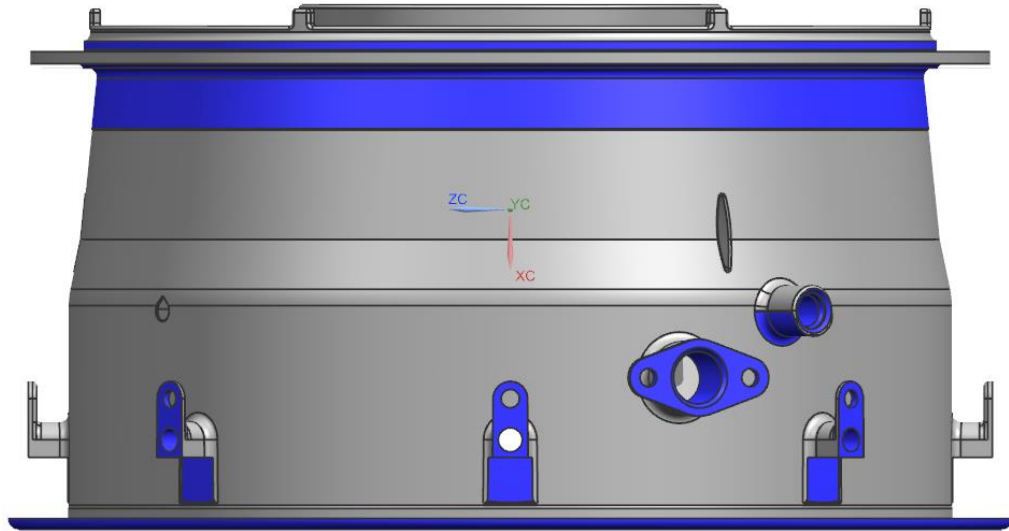


Figura 46. Modelo 3D después del post procesamiento.
Fuente: Elaboración propia.

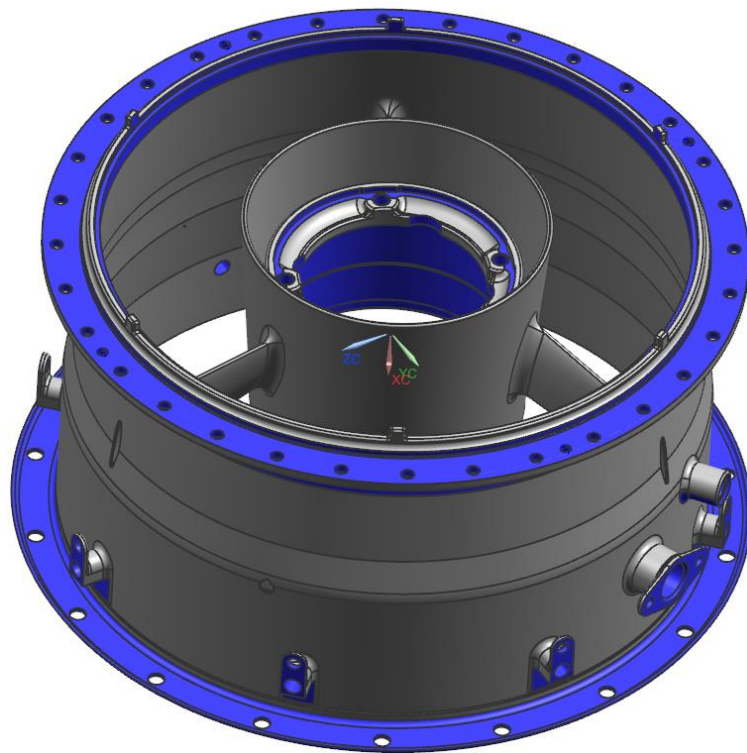
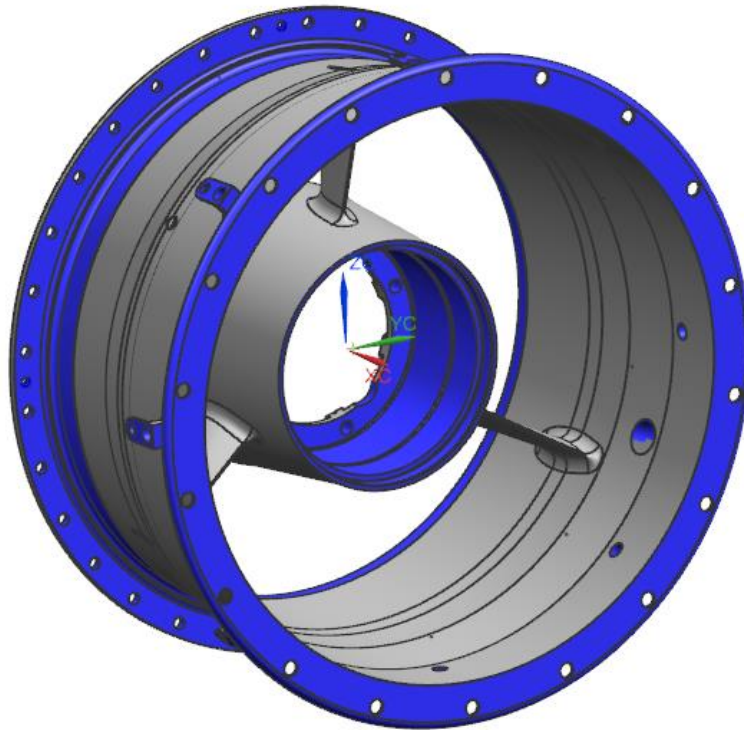


Figura 47. Modelo 3D después del post procesamiento.
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 48. Modelo 3D después del post procesamiento.
Fuente: Elaboración propia.*

Es importante mencionar que, en este punto del proceso, tras haber removido todo el material añadido como consecuencia del *DfAM*, fue en el que el *software* NX10 pudo arrojar un estimado del peso del nuevo componente que mostrara una disminución con respecto a la suma de los pesos de los componentes originales. El peso estimado arrojado fue de 9.686 libras, lo cual representa una reducción de 3.1 libras o, aproximadamente un 24% del peso del ensamble de ambas piezas originales (12.786 libras).

4.5. Fase 5: “Impresión de geometría propuesta”

La quinta y última fase del proceso constó de 3 actividades. La primera, “Solicitud de impresión” consistió en la creación por parte del departamento de Diseño del

requerimiento de impresión. Esto tuvo como resultado el formato de solicitud de trabajo al laboratorio de AM, cuya evidencia se muestra en la Figura 49.

The screenshot displays the Work Request System (WRS) interface. At the top, it shows the Honeywell logo and the text "Inside Honeywell Changes". The page title is "Work Request System" and the user is logged in as "Raul De Thomas' Home". The main content area shows a request for "713738 - DMLS Lab to remove the supports on two bearing supports 70100424-111 recently printed". The request is marked as "Not U.S. Export Restricted". The interface includes a sidebar with "my Requests" and "my Drafts", and a main form with fields for Site, Service Group, Work Type, Program, Milestone, Labor Charge Number, Material Charge Number, Requesting Site, Requester, Focal Point, Distribution List, Request Submission Date, Start Dates, Completion Dates, Budgeted Hours, Engine or Program, and Statement of Work. The Statement of Work field contains the text: "Mark Mc Nair to print 2 bearing supports, remove support material in bearing supports printed, so Michael Kohn can do the machining job." The page footer shows the URL "https://wrs.honeywell.com/cfml/index.cfm?fuseaction=view.displayRequest&requestid=713738" and the date "3/5/2019".

Figura 49. WRS generado para impresión de las piezas.
Fuente: Elaboración propia.

Para la segunda actividad, "Impresión por parte del AM Lab", se envió el modelo para impresión final al laboratorio en versión *Standard for the Exchange of Product Data*,

(STEP, por sus siglas en inglés). Este es un formato de intercambio de datos tridimensionales de manera que pueda ser reconocido por diferentes programas.

Las Figuras 50 y 51 muestran el componente impreso, previo al post procesamiento.



*Figura 50. Turbine Bearing Support and Exhaust previo al post procesamiento.
Fuente: Elaboración propia.*



*Figura 51. Turbine Bearing Support and Exhaust Additive previo al post procesamiento.
Fuente: Elaboración propia.*

La tercera actividad, “Post procesamiento y pesaje”, consistió, como su nombre lo dice, en el post procesamiento de la pieza por parte del laboratorio de *AM* y *ISC*. Esto significó que la pieza fue sometida a todas las operaciones de maquinado que no solamente removieron soportes, sino removieron material de stock que había sido añadido para evitar soportes o facilitar la impresión. Además de esto, el post procesamiento permitió lograr acabados finales necesarios para el correcto funcionamiento de la pieza. El resultado del post procesamiento puede apreciarse en las Figuras 52, 53 y 54, donde las secciones más brillantes equivalen a las zonas azules en las Figuras 44 a 46, es decir, las zonas que fueron maquinadas.

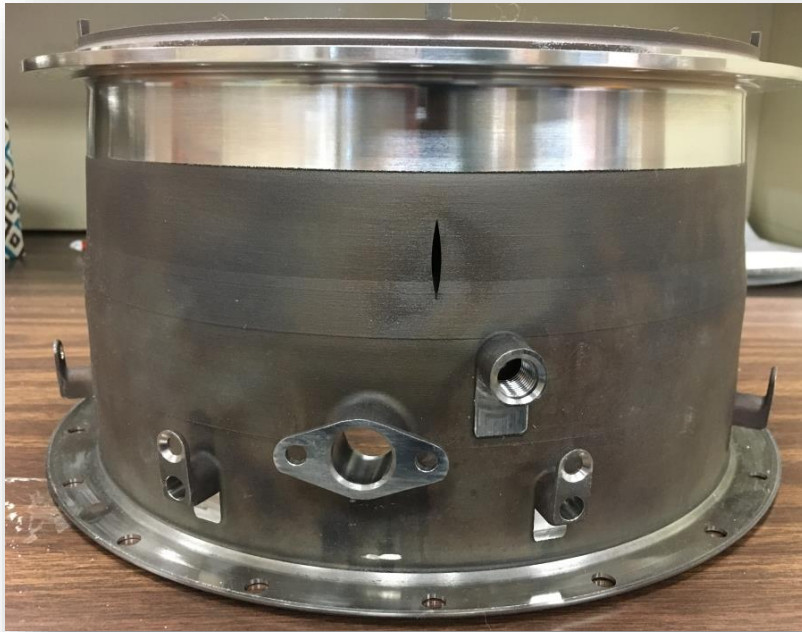


Figura 52. Turbine Bearing Support and Exhaust Additive después del post procesamiento.
Fuente: elaboración propia.



Figura 53. Vista superior e inferior del Turbine Bearing Support and Exhaust Additive después del maquinado.
Fuente: elaboración propia.



*Figura 54. Vistas laterales del Turbine Bearing Support and Exhaust Additive después del maquinado
Fuente: Elaboración propia.*

Finalmente, como parte del post procesamiento, el componente terminado fue pesado. El resultado que se obtuvo fue de 9.936 lb. Esto representó una reducción de 2.85 lb, es decir, un 22.29% del peso total del ensamble de los dos componentes originales (12.786 libras). En la Figura 55 se muestra el nuevo componente después del post procesamiento completo (maquinado y tratamientos térmicos) y con la instalación de conductos en los puertos de los termopares.



*Figura 55. Nuevo componente después del post procesamiento.
Fuente: Elaboración propia.*

En la Figura 56 se muestra la comparación entre el *Exhaust Nozzle* original y el nuevo componente. En el original, se observan operaciones de soldadura en la base de todos los puertos y uniones (indicado con flechas). En el nuevo componente ya no son necesarias dichas operaciones. Ver Anexos 2 y 3 para imágenes de mayor tamaño.



*Figura 56. Comparación entre Exhaust Nozzle original (Izquierda) y el nuevo componente (derecha).
Fuente: Elaboración propia.*

La Figura 57 expone el *Exhaust Nozzle* con algunas conexiones instaladas en su versión original y en su nueva versión.



Figura 57. Comparación entre Exhaust Nozzle original (Izquierda) y el nuevo componente (derecha) con conexiones instaladas. Fuente: Elaboración propia.

V. Capítulo 5: Conclusiones, Discusión y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

En este apartado se realizan las conclusiones de los resultados obtenidos en este proyecto de aplicación, el cual tuvo como objetivo desarrollar una pieza para el motor TPE331-10 como resultado de la fusión de dos componentes diferentes (*Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle*), que reduzca el peso del ensamble donde son utilizados, en un mínimo de 1.5 libras, mediante la aplicación del Diseño para la Manufactura Aditiva; esto para contribuir a la erradicación del sobrepeso existente en el motor.

Las conclusiones, al igual que los resultados, se exponen con base en las 5 fases en las que se dividió la metodología de este proyecto de aplicación la cual, a su vez, está alineada con los objetivos específicos establecidos en el capítulo 1.

Durante la fase uno, “Identificación y análisis de restricciones de diseño, operación y manufactura”, la cual buscaba la familiarización con los requerimientos, restricciones, funciones y características de los componentes “*Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle*” del TPE331, se realizaron entrevistas a ingenieros involucrados y familiarizados con estos componentes. Además, se realizó un análisis de los planos de ingeniería que definían dichas partes. Los resultados obtenidos permitieron conocer las zonas críticas de ambos componentes que deberían permanecer sin cambio alguno después de la fusión. Se conocieron además datos importantes que servirían en la fase 2 para la selección de la orientación de impresión, por ejemplo, el sentido en el que el aire circula a través de los componentes, dato que se obtuvo al conocer la manera en que éstos se ensamblan con el resto del motor.

Así pues, se lograron identificar las restricciones de operación, diseño y manufactura de los componentes a fusionar, cumpliendo con el primer objetivo específico de este proyecto.

Durante la segunda fase, “Diseño de geometría”, se buscó fusionar las geometrías de los componentes *Turbine Bearing Support* y el *Exhaust Nozzle*, con base en las restricciones de diseño y manufactura que se encontraron durante la fase 1.

El primer resultado importante obtenido, fue el conocer cómo interactuaban los componentes originales entre sí, esto para encontrar las caras que sería posible y conveniente fusionar. Se observaron también, claros que existían entre ambas piezas que representaban un potencial cambio de geometría en el nuevo componente. Adicionalmente, se conocieron características de los componentes que eran resultantes de los métodos convencionales de manufactura que se utilizaban para fabricarlos, por ejemplo, el arreglo para el puerto para tomar la presión PS5, que utilizaba material innecesario por la naturaleza de la manera en que era manufacturado (Figura 38). Después de esto se procedió con la creación de la nueva propuesta de diseño, donde se obtuvo como resultado la fusión de los componentes *Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle*. En esta fusión, el total de 6 piezas que se soldaban entre sí para formar el ensamble original de ambas piezas, fue reducido a una sola pieza que no requería de ninguna operación de soldadura (Figura 39).

Otro resultado importante de esta fase fue la selección de la orientación de impresión. A pesar de que siguiendo los lineamientos de *DfAM*, fácilmente se podían descartar orientaciones en las que la cara del cilindro principal estuviera en contacto con la placa de impresión (por ejemplo la orientación mostrada en la Figura 35), fue de suma

importancia tomar en cuenta los resultados adquiridos en la fase de familiarización con los componentes, (fase 1), pues esto permitió conocer el sentido del flujo del aire. Por lo tanto, fue posible tomar la decisión de orientar hacia abajo caras que no influían en la aerodinámica. De este modo, a pesar de que dichas caras requerirían de material de soporte, el acabado superficial pobre que resultara, no afectaría el flujo del aire.

Con base a lo anterior, se cumplió con el segundo objetivo específico de este proyecto, pues se logró diseñar una geometría que fusionara los componentes *Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle* del motor TPE331-10, y que cumpliera con las restricciones de diseño y manufactura identificadas.

Para la tercera fase, “Reducción de peso”, cuyo objetivo era utilizar el Diseño para Manufactura Aditiva para restar aún más peso del que se eliminó como resultado de la fusión entre los componentes en la fase 2. Durante esta fase se realizaron acciones de reducción de material como lo fueron:

- Eliminación de material con la reducción del volumen de la cavidad *Anulus*.
- Diseño hueco de travesaños que unen la carcasa exterior del *Housing Nozzle* con el centro del *Bearing Support*.

Con estas acciones, las cuales se muestran en la Figura 41, se obtuvo una disminución de .5 libras con respecto al primer diseño propuesto. Es importante mencionar que, al contar con material de más, debido al *DfAM*, el peso del componente en este punto del procedimiento, era mayor al del ensamble original del *Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle*.

En la cuarta fase, “Iteraciones”, se buscó que la geometría propuesta fuera formalmente evaluada por los departamentos de Estructuras, *M&PE* y el *AM Lab*. Tras cada iteración, la geometría fue modificada según fue requerido por los departamentos consultados hasta que ésta cumpliera con todas las restricciones de operación (estructurales y de aerodinámica), así como que cumpliera con requerimientos establecidos por el *AM Lab* para facilitar la impresión del componente.

Después de 3 iteraciones, se obtuvo el modelo 3D final para impresión, el cual contaba con material de stock adicional para asegurar un maquinado completo en el post procesamiento, *chamfers* a 45 grados de la placa de impresión para evitar material de soporte y modificaciones a la brida inferior que permitiera un mejor post procesamiento para separar la pieza de la placa de impresión.

Esta geometría en 3D fue sometida al post procesamiento y el modelo 3D de la pieza final fue creado. Éste puede observarse en la Figura 48 y el peso estimado arrojado por el *software* NX10 fue de 9.686 libras, lo cual representó una reducción de 3.1 libras o, aproximadamente un 24% del peso del ensamble de ambas piezas originales (12.786 libras).

Así pues, gracias a lo realizado en estas dos fases, se pudo cumplir con el tercer y cuarto objetivo específico.

Finalmente, la quinta fase, “Impresión de geometría propuesta” buscó la obtención del nuevo componente tras ser impreso y post procesado físicamente en el laboratorio de manufactura aditiva e instalaciones de *ISC* ubicadas en el campus de *Honeywell Engines* en Phoenix, AZ.

Tras la impresión y el maquinado del componente propuesto, se realizó el pesaje que arrojó un resultado satisfactorio de 9.936 lb. Esto representó una reducción de 2.85 lb, es decir, un 22.29% del peso total del ensamble de los dos componentes originales (12.786 libras).

Con lo anterior, se pudo cumplir con el quinto objetivo específico, el cual buscaba crear un diseño que se pudiera imprimir en 3D en el laboratorio de manufactura aditiva de Honeywell *Engines*.

Recordando que el objetivo general del presente trabajo era desarrollar una nueva pieza para el motor TPE331-10 mediante la fusión del *Turbine Bearing Support* y el *Exhaust Nozzle*, que redujera el peso del ensamble en un mínimo de 1.5 libras, utilizando el Diseño para la Manufactura Aditiva; se puede decir que al obtener como resultado final una fusión entre ambos componentes que logró una disminución de 2.85 libras de peso, se cumplió exitosamente con la finalidad de este proyecto de aplicación. La Figura 58 muestra un resumen que compara las geometrías originales contra la geometría obtenida por Diseño para Manufactura Aditiva. De la cual se resalta la fusión de un total de 12 piezas que formaban ambos componentes originales, para formar una sola pieza que se fabrica mediante impresión 3D. Para más detalles de esta fusión, vea la Sección 4.2 del presente documento.

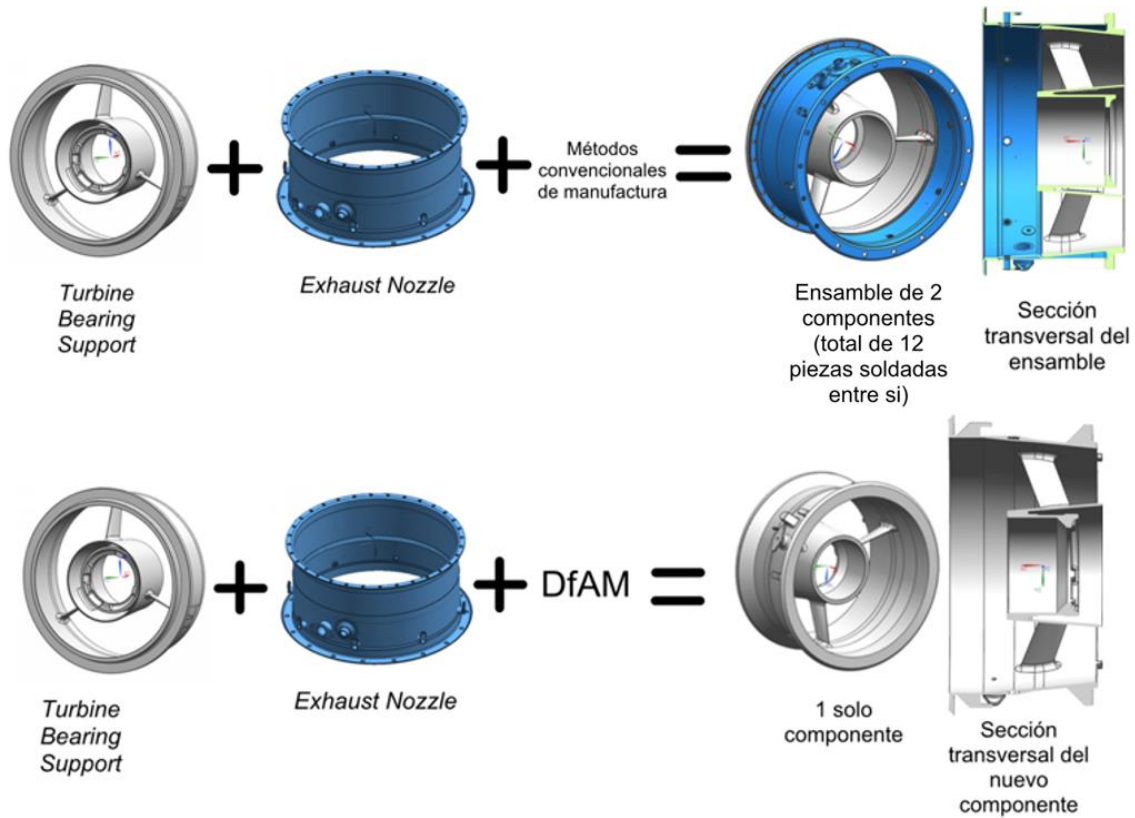


Figura 58. Cambios en número de piezas entre ensamble original y el nuevo componente.
Fuente: Elaboración propia.

En consecuencia de los logros presentados, la hipótesis planteada en la sección 1.8 de este documento “La fusión de los componentes *Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle* mediante el Diseño para Manufactura Aditiva permite reducir el peso del motor TPE331-10 en más de 1.5 libras” es aceptada.

5.2 Discusión

Con base a los resultados obtenidos y conclusiones realizadas, en este apartado se presenta la discusión sobre la creación de un nuevo componente para el motor TPE331-10 como resultado de la fusión del *Turbine Bearing Support* y *Exhaust Nozzle* que logró reducir 2.85 lb (22.29%) del peso total del ensamble de los dos componentes originales.

La manufactura aditiva permitió crear un componente que contribuye a la disminución del peso de una aeronave, característica muy valiosa en la industria aeroespacial. A raíz de esto, el componente creado será agregado al ensamble del motor TPE331-10 como parte alternante al ensamble de los dos componentes originales. Un reemplazo definitivo ha sido descartado por la compañía al encontrar que debido al costo del material, del post procesamiento y que en la impresora disponible únicamente se puede imprimir una pieza a la vez, el costo de cada componente es de 14,214.04 USD, lo cual representa el 153.64% del precio del ensamble original.

El mantener este componente como alternante permitirá tener la disponibilidad de imprimirlo de ser necesario para eliminar 2.85 libras de peso. De igual forma, actualmente Honeywell se encuentra en un proceso muy importante de transiciones a nuevos métodos de manufactura con el fin de expandir las fuentes de componentes con las que se cuentan. Si por alguna razón, el *Turbine Bearing Support* o el *Exhaust Nozzle* no pudieran ser fabricados por los métodos convencionales, el diseño presentado en este proyecto podrá solicitarse e imprimirse para evitar que la línea de producción del motor TPE331 se detenga.

Aunado a esto, es importante mencionar que los costos de la manufactura aditiva tenderán a bajar conforme sistemas de múltiples láseres se vuelvan disponibles (Simpson, 2018), lo cual representaría en un futuro una oportunidad para evaluar el reemplazo definitivo del *Turbine Bearing Support* y el *Exhaust Nozzle* por el nuevo componente impreso.

Finalmente, es importante mencionar la importancia de expandir los esfuerzos de reducción de peso y optimización a otros motores mediante la manufactura aditiva, no sólo como reacción a inconformidades existentes, sino para buscar la mejora continua en diseños que actualmente no presentan problemas.

La manufactura aditiva no pone atención únicamente en el desempeño que tendrá la pieza final, sino que pone atención al cómo será fabricada esa pieza. Cuando el diseño es un componente integral del proceso de manufactura aditiva, el resultado es una impresión exitosa que puede ser eficientemente post procesada y que cumplirá su función satisfactoriamente.

La fuerza de trabajo de Honeywell está desarrollando habilidades de *DfAM* que pueden ayudar a crear sistemas de propulsión más ligeros, que generen más ganancia y que permitan a la compañía permanecer como empresa aeroespacial líder en innovación y desarrollo de tecnología.

5.3 Recomendaciones

En esta sección se presentan las áreas de oportunidad y recomendaciones identificadas durante la realización de este proyecto de aplicación.

Sobre el proceso de manufactura aditiva en Honeywell. Al ser este componente una parte pionera en la manufactura aditiva, se observó que el proceso para la creación y aprobación de un nuevo diseño para impresión 3D podría optimizarse y estandarizarse con la utilización de herramientas *Six Sigma*.

El proceso de iteraciones, mencionado en el capítulo 3, podría disminuir significativamente si se siguiera un proceso lineal en el que los diferentes departamentos involucrados evalúen el diseño uno a la vez en lugar de simultáneamente.

Se recomienda además que los departamentos involucrados sean informados de los cambios que se pretenden hacer previo a realizar los cambios en el modelo 3D. Esto podría ahorrar tiempo, eliminar trabajo desperdiciado y por ende, disminuir las iteraciones.

Finalmente, se recomienda continuar con los esfuerzos de reducción de peso mediante el *DfAM*, evaluando desde un principio, en conjunto con ingeniería de proyectos, la capacidad de producción que se tiene en la compañía, de modo que se pueda prever si un componente tendrá un alto costo. Esto para evaluar si un esfuerzo del tipo realizado en este proyecto vale la pena.

Referencias

- 3DCadPortal, (2019). Chapa metálica: Sheet metal. En *CAD Portal*. Recuperado de <http://www.3dcadportal.com/chapa-metalica-sheet-metal.html>
- Air Transport Action Group (2018). British Airways case study: first class fuel efficiency. En *Aviation benefits*. Recuperado de <https://aviationbenefits.org/case-studies/first-class-fuel-efficiency/>
- Arrieta, E. (2016). ¿Es la impresión 3D la gran oportunidad para la industria aeronáutica? En *Expansión*. Recuperado de <http://www.expansion.com/economia-digital/innovacion/2015/12/13/566b2238268e3ec3348b4617.html>
- Bouchard, J. & Villaumé, F. (2018). New technology may Help Airlines cut fuel use and travel time. En *Forbes*. Recuperado de <https://www.forbes.com/sites/oliverwyman/2018/07/20/new-technology-may-help-airlines-cut-pricey-fuel-consumption-and-meet-environmental-regulations/#6f30cb88f076>
- Brecken, S., (2016). Honeywell's additive manufacturing: All science, no fiction. En *Honeywell*. Recuperado de <https://www.honeywell.com/newsroom/news/2016/08/honeywells-additive-manufacturing-all-science-no-fiction#collapse-1e7413a9-a582-441e-b9da-b3345c3aafd8>
- Cirigliano, D. (2017). Engine-type and propulsion-configuration selections for long-duration uav flights (Tesis de maestría). Universidad de California, Irvine, Estados Unidos. Recuperado de <https://www.politesi.polimi.it/bitstream/10589/134017/1/UAV%20Propulsion%20-%20Cirigliano.pdf>
- Contreras, L. (2018). Top 10 con las aplicaciones de la impresión 3D en la aeronáutica. En *3Dnatives*. Recuperado de <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-en-la-aeronautica-010320182/>

- EAE Business School (2017). Proceso de producción: en qué consiste y cómo se desarrolla. En *Retos en Supply Chain*. Recuperado de <https://retos-operaciones-logistica.eae.es/proceso-de-produccion-en-que-consiste-y-como-se-desarrolla/>
- EcuRed: Enciclopedia Cubana (2018). Forja. En *EcuRed*. Recuperado de <https://www.ecured.cu/Forjado>
- EcuRed: Enciclopedia Cubana (2018). Fundición. En *EcuRed*. Recuperado de <https://www.ecured.cu/Fundici%C3%B3n>
- EcuRed: Enciclopedia Cubana (2018). Maquinado. En *EcuRed*. Recuperado de <https://www.ecured.cu/Maquinado>
- Electro Optical Systems (2019). Additive Manufacturing, Laser-Sintering and industrial 3D printing - Benefits and Functional Principle. En *EOS*. Recuperado de https://www.eos.info/additive_manufacturing/for_technology_interested
- Frisa (2018). Ventajas de la forja. En *Frisaexpress*. Recuperado de https://www.frisaexpress.com/files/FRISA_Ventajas_Forja.pdf
- Haacker, J. (2007). Fuel efficiency. En *International airport review*. Recuperado de <https://www.internationalairportreview.com/article/1487/fuel-efficiency/>
- Hand, J. (2018). The four forces of flight. En *Mansfield middleschool*. Recuperado de <https://www.mansfieldct.org/Schools/MMS/staff/hand/flight4forcesoverview.htm>
- Haria, R., (2018). Honeywell approves sintavia to 3d print metal aerospace components. En *3D printing industry*. Recuperado de <https://3dprintingindustry.com/news/honeywell-approves-sintavia-3d-print-metal-aerospace-components-127230/>
- How it Works Team (2016) How do turboprop engines work? En *How it works daily*. Recuperado de <https://www.howitworksdaily.com/how-do-turboprop-engines-work/>

- Jiang, J., Lou, J. & Hu, G. (2019). Effect of support on printed properties in fused deposition modeling processes, virtual and physical prototyping. Recuperado de <https://doi.org/10.1080/17452759.2019.1568835>
- Jiang, J., Xu, X., y Stringer, J., (2018). Support Structures For Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2 (4), 8. Recuperado de <https://www.mdpi.com/2504-4494/2/4/64>
- Jibin, Z., Liu, W., y Wu, J. (2006). Determination of optimal build orientation based on satisfactory degree theory for RPT. doi: 10.1109/CAD-CG.2005.32.
- Koppula, R. (2018). The top 6 technologies for improving aircraft fuel efficiency. En *Prescouter*. Recuperado de <https://www.prescouter.com/2018/01/technologies-improving-aircraft-fuel-efficiency/>
- Malik, P. (2016). 3D Printing: Introduction. En *Medium*. Recuperado de <https://medium.com/@pulkmalik/3d-printing-9ed7e0e4ed5d>
- Renishaw (2017). Design for metal AM- a beginner's guide. En *Renishaw*. Recuperado de <https://www.renishaw.com/en/design-for-metal-am-a-beginners-guide--42652>
- Renishaw (2019). Is topological optimisation really optimal? En *Renishaw*. Recuperado de <https://www.renishaw.com/en/is-topological-optimisation-really-optimal--42112>
- Sabogal, D. (2018) Fundición: ventajas y limitaciones. En Academia. Recuperado de https://www.academia.edu/15351419/FUNDICION_expoventajas_y_limitaciones
- Segelstein, J. (2008). And you think you're trying to save gas. En *NBC News*. Recuperado de http://www.nbcnews.com/id/25592648/ns/business-cnbc_tv/t/you-think-youre-trying-save-gas/#.XBceW1VKipo
- Tarifa, C. (1951). *Motores de Reacción y Turbinas de Gas*. España: Imprenta del Instituto Nacional de Técnica Aeronáutica Esteban Terradas. Recuperado de http://oa.upm.es/6515/1/Tarifa_29.pdf

- Tiwari, R. (2016). Aerospace 3D printing market to grow at 55.85% CAGR to 2020. En *Cision PR Newswire*. Recuperado de <https://www.prnewswire.com/news-releases/aerospace-3d-printing-market-to-grow-at-5585-cagr-to-2020-605212606.html>
- Universidad del País Vasco (2018) Conformado Plástico de Metales: El proceso de forja. En *Universidad del País Vasco*. Recuperado de http://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/713_ca.pdf
- Warwick, G. (2016). Commercial aviation technologies will evolve in 2017. *Aviation Week & Space Technology*. 108-108. Recuperado de <https://awin.aviationweek.com/ArticlesStory/tabid/975/Status/IPAddress/id/f9a9ce36-810f-46f1-b99b-d560f2ca4eda/Default.aspx>
- Zelinski, P. (2019). Why additive manufacturing needs the executive perspective. En *Additive Manufacturing*. Recuperado de <https://www.additivemanufacturing.media/why-additive-manufacturing-needs-the-executive-perspective/>

Anexo I



*Anexo 1. Impresión de Prueba antes de terminar iteraciones del capítulo 4.
Fuente: Elaboración propia.*

Anexo II



*Anexo 2. Exhaust Nozzle original. Costuras de soldadura indicadas con flechas.
Fuente: Elaboración propia.*

Anexo III



Anexo 3. Nuevo componente después del maquinado