



FACULTAD DE INGENIERÍAS Y CIENCIAS APLICADAS

Trabajo de fin de Carrera titulado:

Propuesta de material alternativo para impulsor de la bomba de agua del vehículo

Chevrolet Sail 2016

Realizado por:

Erika Natali Silva Gavilanez

Director del proyecto:

X Ing. Edilberto Antonio Llanes Cedeño, Ph.D.

Como requisito para la obtención del título de:

**MAGISTER / INGENIERO EN DISEÑO MECÁNICO
MENCION FABRICACIÓN DE AUTOPARTES DE VEHÍCULOS**

QUITO, octubre del 2022

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Erika Natali Silva Gavilanez, ecuatoriano, con Cédula de ciudadanía N°.0504346032, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional, y se basa en las referencias bibliográficas descritas en este documento.

A través de esta declaración, cedo los derechos de propiedad intelectual a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y normativa institucional vigente.

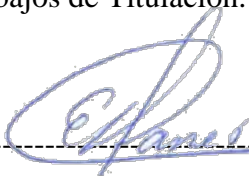


ERIKA NATALI SILVA GAVILANEZ

C.I.: 050434603-2

DECLARACIÓN DEL DIRECTOR DE TESIS

Declaro haber dirigido este trabajo a través de reuniones periódicas con el estudiante, orientando sus conocimientos y competencias para un eficiente desarrollo del tema escogido y dando cumplimiento a todas las disposiciones vigentes que regulan los Trabajos de Titulación.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'E. Llanes', is written over a horizontal dashed line.

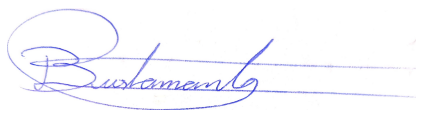
Ing. Edilberto Antonio Llanes Cedeño, Ph.D.

LOS PROFESORES INFORMANTES:

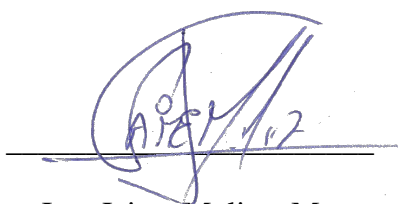
Ing. Diego Bustamante, Msc

Ing. Jaime Molina, Msc

Después de revisar el trabajo presentado lo han calificado como apto para su defensa oral ante el tribunal examinador.



Ing. Diego Bustamante, Msc



Ing. Jaime Molina, Msc

Quito, 14 de octubre del 2022

DECLARACIÓN DE AUTORÍA DEL ESTUDIANTE

Declaro que este trabajo es original, de mi autoría, que se han citado las fuentes correspondientes y que en su ejecución se respetaron las disposiciones legales que protegen los derechos de autor vigentes.



ERIKA NATALI SILVA GAVILANEZ
C.I.: 050434603-2

Índice de contenido

Resumen	9
Abstract	10
Introducción	11
Antecedentes	11
Planteamiento del problema	13
Justificación	13
Hipótesis	15
Estado del arte	16
Método	20
Tipo de Estudio	20
Modalidad de investigación	20
Metodología	20
Determinación de propiedades del material actual	22
Diseño CAD	23
Cálculos analíticos para obtener el factor de seguridad	23
Triángulos de velocidades	23
Resolución del triángulo de entrada	26
Resolución del triángulo de salida	28
Fuerzas en los alabes	31
Fuerza radial (<i>Fr</i>)	32
Esfuerzo de tracción (<i>σn</i>)	33
Esfuerzo de torsión (<i>ζT</i>)	33
Componentes de la fuerza de empuje	34
Fuerza axial (<i>Fa</i>)	34
Fuerza tangencial (<i>Fu</i>)	35
Momento flector de la fuerza axial (<i>MFa</i>)	36
Momento flector de la fuerza tangencial (<i>MFu</i>)	36
Esfuerzo de flexión (<i>σf</i>)	37
Esfuerzo equivalente (<i>σeq</i>)	38
Factor de seguridad con el ACERO AISI 1018 (<i>FS</i>)	38
Aplicación del método multicriterio MCDM	38
Cálculo del factor de seguridad con el material CF20 (Copolíéster reforzado con fibra de carbono)	43
Fabricación aditiva del prototipo	44

Ensayos de corrosión	45
Resultados	47
Material actual del impulsor	47
Diseño CAD	48
Resultados de triángulos de velocidades	48
Resultados de esfuerzos y factor de seguridad con el acero AISI 1018	49
Prioridades de los criterios de evaluación de los materiales propuestos	49
Aplicación de los métodos multicriterio	50
Resultados de método TOPSIS	51
Resultados de método VIKOR	52
Resultados de método COPRAS	53
Comparación de resultados de los métodos multicriterio	54
Resultado de los esfuerzos y factor de seguridad del material CF20	54
Resultado de la fabricación	55
Resultado del ensayo de corrosión	57
Discusión de resultados	59
CONCLUSIONES	61
RECOMENDACIONES	62
Referencias bibliográficas	63
ANEXOS	65

Índice de figuras

Figura 1.....	21
Figura 2.....	23
Figura 3.....	23
Figura 4.....	24
Figura 5.....	24
Figura 6.....	26
Figura 7.....	26
Figura 8.....	28
Figura 9.....	29
Figura 10.....	31
Figura 11.....	32
Figura 12.....	34
Figura 13.....	34
Figura 14.....	37
Figura 15.....	46
Figura 16.....	47
Figura 17.....	47
Figura 18.....	48
Figura 19.....	49
Figura 20.....	50
Figura 21.....	50
Figura 22.....	56
Figura 23.....	57
Figura 24.....	57
Figura 25.....	¡Error! Marcador no definido.

Índice de tablas

Tabla 1	22
Tabla 2	22
Tabla 3	45
Tabla 4	48
Tabla 5	49
Tabla 6	51
Tabla 7	51
Tabla 8	51
Tabla 9	51
Tabla 10	52
Tabla 11	52
Tabla 12	52
Tabla 13	52
Tabla 14	53
Tabla 15	53
Tabla 16	53
Tabla 17	53
Tabla 18	54
Tabla 19	54
Tabla 20	55
Tabla 21	55
Tabla 22	56
Tabla 23	58

Índice de anexos

ANEXO 1.....	55
ANEXO 2.....	60
ANEXO 3.....	61
ANEXO 4.....	62
ANEXO 5.....	63
ANEXO 6.....	64
ANEXO 7.....	66

Abreviaturas

C.A.D. Computer Aided Design (Diseño asistido por computadora)

C.A.E. Computer Aided Engineering (Ingeniería asistida por
computador)

FDM Modelado por Deposición Fundida

MCM Métodos multicriterio

Resumen

En el presente trabajo se describe el estudio de un material alternativo para el impulsor de la bomba de agua de un vehículo Chevrolet Sail 2016 el cual actualmente es fabricada de Acero AISI 1018, el mismo que al estar expuesto al líquido refrigerante sufre de corrosión lo cual provoca un desgaste del mismo y por consiguiente la contaminación del refrigerante que circula por el motor, el cual a la vez puede generar daños en el motor del vehículo. Para este estudio se aplicó la selección de métodos multicriterio MCM con alternativas de materiales compuestos para fabricación FDM (Modelado por Deposición Fundida) que cumpla con las propiedades físicas, mecánicas y además presenten resistencia a la corrosión, consideraron 4 materiales de filamentos de impresión 3D: ABS-Kevlar (ABS reforzado con fibra de Kevlar), CF20 (Copoliéster reforzado con fibra de carbono), GF30 -PA6 (Poliamida 6 reforzada con fibra de vidrio), GF30 -PP (Propileno reforzado con fibra de vidrio), con los cuales realizando la aplicación del método multicriterio se obtuvo el material CF20 como la mejor alternativa para la fabricación del impulsor. Para validar el correcto funcionamiento del impulsor con el material alternativo seleccionado se calcularon los esfuerzos presentes en el elemento mecánico para obtener el factor de seguridad que garantiza su correcto funcionamiento, seguido de esto se realizó la fabricación del impulsor mediante impresión 3D, para posterior a esto realizar ensayos de corrosión bajo la norma ASTM B117-11 “Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus” durante 48h, con lo cual se verificó que al someter los dos materiales en la cámara de solución salina al 5% de Na Cl, el material actual Acero AISI 1018 presento corrosión mientras que el material compuesto CF20 no presenta indicios de corrosión.

Palabras clave: Impulsor, MCM (métodos multicriterio), FDM (Modelado por Deposición Fundida), corrosión.

Abstract

In the present work, the study of an alternative material for the impeller of the water pump of a Chevrolet Sail 2016 vehicle is described, which is currently made of AISI 1018 Steel, the same that when exposed to the coolant suffers from corrosion which causes wear of the same and therefore contamination of the coolant that circulates through the engine, which in turn can cause damage to the vehicle's engine. For this study, the selection of MCM multicriteria methods was applied with alternatives of composite materials for FDM (Fused Deposition Modeling) manufacturing that meets the physical, mechanical properties and also presents resistance to corrosion, consider 4 3D printing filament materials: ABS- Kevlar (ABS reinforced with Kevlar fiber), CF20 (Copolyester reinforced with carbon fiber), GF30 -PA6 (Polyamide 6 reinforced with fiberglass), GF30 -PP (Propylene reinforced with fiberglass), with which Carrying out the application of the multicriteria method, the CF20 material was obtained as the best alternative for the manufacture of the impeller. To validate the correct operation of the impeller with the selected alternative material, the efforts present in the mechanical element were calculated to obtain the safety factor that guarantees its correct operation, followed by the manufacture of the impeller by 3D printing, for subsequent to this performing corrosion tests under the norm ASTM B117-11 "Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus" during 48h, with which it was verified that by subjecting the two materials in the saline solution chamber to 5% Na Cl, the current AISI 1018 Steel material shows corrosion while the CF20 composite material shows no signs of corrosion.

Key words: Impeller, MCM (multicriteria methods), FDM (Fused Deposition Modeling), corrosion.

Introducción

Antecedentes

El incremento del parque automotor del país lleva consigo el desarrollo de la producción de autopartes, es importante mencionar que en los últimos años los plásticos, polímeros y materiales compuestos de fibras, polvos tanto sintéticos como naturales, estos materiales se han posicionado en la industria automotriz como uno de los principales materiales en la manufactura, debido a sus propiedades mecánicas y su bajo peso lo cual permite que los vehículos sean más livianos y por ende puedan adquirir mayor velocidad, es importante mencionar una de las propiedades importantes de estos materiales como es su resistencia a la corrosión, la cual es una ventaja frente a los materiales convencionales como los aceros, aluminios, aleaciones los cuales tienden a corroerse y producir fallas mecánicas en las piezas (Tan et al., 2020; Molina, 2019).

Actualmente se realizan ensayos de corrosión de materiales mediante una cámara de niebla salina, la cual permite identificar el comportamiento de materiales y sus recubrimientos, este ensayo se basa en la Norma ASTM B117-11, donde especifica las condiciones y procedimientos para generar un ambiente corrosivo y exponer los materiales con la finalidad de conocer de manera confiable la resistencia de un material a la corrosión (Schmiedl y Audelo, 2017).

El desarrollo industrial que se experimenta día a día, ha llevado consigo nuevas metodologías de diseño entre las cuales se puede mencionar a la ingeniería inversa cuyo objetivo es crear e innovar productos indistintos del tipo de industria al que pertenezcan, permitiendo que el diseñador parta de un elemento, pieza o sistema ya existente, para innovar el mismo ya sea que se requiera un rediseño, mejorar su proceso de manufactura o simplemente un prototipado de la misma, es así que de la mano con la ingeniería inversa se encuentra la impresión 3D que es un proceso de manufactura muy importante debido a todas las facilidades de impresión que esta ofrece (Wang et al., 2017).

Uno de los tipos de impresión 3D más utilizada es la de modelado por deposición fundida más conocida por sus siglas en inglés como FDM (Modelado por Deposición Fundida), en este tipo de impresión el material a imprimir está en una bobina a manera de filamento el cual ingresa por el extrusor de la impresora donde se aprisiona el filamento para que este avance a la boquilla que calienta el material para su fusión y posterior

depósito del material fundido que va siendo depositado capa tras capa tomando la forma del modelo 3D proporcionado al software de la impresora (Dizon et al., 2018)(Brioso, 2016).

Entre los sistemas que constituyen un vehículo tenemos el sistema de refrigeración formado principalmente por las cámaras de agua, manguitos, radiador, bomba de agua, ventilador, termostato y elementos de control, cuya función es eliminar el excedente de calor que se acumula en el motor producto del proceso de combustión, manteniendo la temperatura óptima del motor la cual oscila entre 75°C y 90°C , es así que uno de los repuestos reemplazables del Chevrolet Sail es la bomba de agua, la cual según las recomendaciones de mantenimiento de este vehículo debe ser reemplazada cada 65 000 km de recorrido (Farfán y Sarmiento, 2015).

La bomba de agua es un elemento muy importante del sistema de refrigeración del motor, dado que esta se encarga de la circulación del refrigerante desde el radiador al interior del motor, sus componentes principales son la carcasa y el rodete, los cuales están fabricados de aleación de aluminio y latón respectivamente, fabricados mediante los procesos de manufactura convencionales como la fundición, fresado, taladrado, laminado y estampado (Farfán y Sarmiento, 2015).

Uno de los componentes más importantes de la bomba de agua es el impulsor, el cual es un elemento móvil que mediante su movimiento transmite potencia al líquido refrigerante para que este se distribuya en todo el sistema, según Montalvo (2017) en su trabajo de investigación menciona que, en el diseño de una bomba de agua del vehículo, la geometría del impulsor junto con la velocidad de giro definen las características de operación de la bomba como son la presión y el caudal. Es así que Montalvo (2017) analiza los triángulos de velocidades y sus magnitudes, dado que estos valores están directamente relacionados con la velocidad angular del impulsor, la cual a su vez es directamente proporcional a la velocidad del cigüeñal.

Los procesos de manufactura como la fabricación aditiva buscan mejorar los procesos de producción mediante métodos como la impresión 3D, Zhou & Zhao (2021) menciona que este proceso puede significar un ahorro de tiempo e inversión en mano de obra, en su investigación basada en la impresión 3D FDM (Modelado por Deposición Fundida) de un impulsor analiza la precisión de este proceso de fabricación, en esta se obtiene el modelo 3D que es posteriormente importado al software Cura, en el cual se configuran

los parámetros de impresión como espesor de capa, pared, densidad de llenado, velocidad de impresión, temperatura de impresión, con estos parámetros el software puede facilitar una vista previa de impresión y además estimar el tiempo de impresión. Una vez obtenido el impulsor impreso se realizan pruebas de medición, donde pese a la influencia de los factores de medición, se destaca que la precisión de la impresión 3D sigue siendo muy alta.

La selección de materiales es uno de los parámetros más importantes a definir en el diseño de cualquier elemento mecánico o producto, dado que de este depende en gran parte el correcto funcionamiento del mismo, además de que la selección del material debe estar acorde a los esfuerzos y demás fenómenos físicos y mecánicos a los cuales este sometido sin olvidar la disponibilidad de materiales del mercado, por lo antes mencionado se posee el siguiente problema de investigación: ¿Cómo seleccionar un material para el impulsor de la bomba de agua del Chevrolet Sail que mejore su durabilidad?.

Planteamiento del problema

La bomba de agua del vehículo se considera el elemento más importante del sistema de refrigeración, esta es una bomba centrífuga constituida principalmente por una polea, el impulsor, rodamientos y un eje, el impulsor a su vez contiene a los alabes o palas que mueven el refrigerante para que este se distribuya en todo el sistema de refrigeración del vehículo y evite el calentamiento del motor. La exposición continua de los componentes de la bomba al líquido refrigerante provoca que estos tiendan a oxidarse y corroerse, especialmente el impulsor el cual es fabricado de latón, la presencia de óxido en las aspas del impulsor de la bomba provoca un desgaste de las mismas, lo cual disminuye la presión de bombeo del refrigerante y este no se distribuye de manera eficiente en el sistema, además el óxido que se desprende contamina el líquido refrigerante afectando también a los sellos de goma de la bomba que se deterioran y dan lugar a la fuga de refrigerante, todos los problemas antes mencionados provocan que el motor no mantenga la temperatura óptima de trabajo que oscila entre 75 °C y 90 °C y por ende el recalentamiento del mismo que puede dañar sus elementos internos.

Justificación

La industria automotriz de Ecuador en el año 2019 registro una cifra de ventas de 132208 unidades, dicha cifra fue mayor a las proyecciones de ventas esperadas para ese

año, sin embargo, pese a superar las expectativas el número de ventas con las cuales cerró el año 2019 decreció un 3,9 % con respecto a las ventas del año 2018. En base a estas cifras para el año 2020 se previó que el número de ventas siguieran reduciendo en al menos un 10 % más, esto ante la presencia de una contracción económica evidente en el país, sin embargo, ante la presencia de la pandemia de Covid-19 que actualmente atraviesa el mundo estas proyecciones de disminución de ventas cayeron al 49 % teniendo apenas 33185 unidades vendidas (Anuario AEADE, 2020).

En el periodo enero- marzo 2021 se ha registrado la venta de 8574 vehículos tipo automóvil de los cuales se pueden destacar tres principales marcas que predominan en el mercado: el 22,9 % pertenecen a CHEVROLET siendo esta la marca líder en el mercado, el 18,4 % pertenece a KIA y 6.1 % pertenece a HYUNDAI (AEADE Sector automotor en cifras, 2021). Chevrolet oferta varios modelos en el mercado, siendo de preferencia del usuario: Emotion, Aveo, Sail, de los cuales el Chevrolet Sail figura entre los diez vehículos más vendidos de Ecuador (El Universo, 2021).

Es importante mencionar que ligado a este consumo de vehículos está la fabricación y venta de autopartes y repuestos que son reemplazados de acuerdo a las indicaciones de mantenimiento del fabricante del vehículo, los cuales en su gran mayoría son importados y vendidos en el mercado ya sea en las casas automotrices o por distribuidoras de repuestos (Toledo, 2019).

Actualmente la fabricación aditiva es un proceso de manufactura considerado dentro de la cuarta revolución de la industria 4.0, esta no utiliza ni moldes ni utillaje lo cual la convierte en una de las mejores opciones en la fabricación de autopartes, debido a la versatilidad de este proceso que permite obtener geometrías desde las más sencillas hasta las más complejas, además de la personalización del producto, es así que las piezas pueden obtenerse de manera directa de un archivo CAD (Brioso, 2016) (Yang et al., 2020). La fabricación aditiva se realiza tanto con polímeros como con materiales metálicos, consiste en depositar el material capa a capa de acuerdo al modelo CAD del producto.

La industria automotriz demanda de una selección de materiales que cumplan con las condiciones mecánicas, fenómenos físicos y medios donde va utilizarse un elemento o pieza mecánica, por lo cual el proceso de diseño se convierte en el eje principal para la fabricación de un producto. En los últimos años se han desarrollado métodos de selección

de materiales como los métodos multicriterios (MCDM) el cual tiene como finalidad seleccionar de un grupo de alternativas la más idónea, cada una de estas alternativas tienen un grupo de atributos que van a tener un orden jerárquico analítico que se obtiene mediante el método AHP (Proceso de análisis jerárquico) el cual permite determinar la prioridad que tiene un atributo sobre otro, posterior a esto los MCDM integran varios indicadores cuantitativos y cualitativos usando una matriz de comparación y herramientas estadísticas, entre los MCDM más utilizados se pueden mencionar el método COPRA-G, VIKOR, TOPSIS entre otros.

En base a las necesidades y desarrollo tecnológico presente en la industria automotriz, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo general: proponer un material alternativo de impresión 3D para la bomba de agua del vehículo Chevrolet Sail, mediante el método de multicriterio (MCDM), cálculos del factor de seguridad y ensayos de corrosión para el mejoramiento de sus propiedades y su durabilidad.

Para cumplir el objetivo general de la investigación se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Modelar el impulsor mediante la toma de medidas del elemento físico, para obtener el modelo 3D.
- Identificar los materiales de impresión 3D que cumplan con las propiedades físicas, mecánicas y termoquímicas por medio de los MCDM para la fabricación del impulsor de la bomba de agua.
- Evaluar el material de fabricación actual del impulsor y la alternativa del nuevo material resultante, mediante el cálculo del factor de seguridad del elemento mecánico.
- Evaluar la corrosión del material de fabricación actual de la pieza y el material alternativo mediante la exposición a un ambiente altamente corrosivo controlado basado en la norma ASTM B117-11 “*Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*”, para la fundamentación de la selección del material alterno.

Hipótesis

A partir de la investigación y selección de materiales para impresión 3D, se podrá realizar la fabricación aditiva del impulsor que cumpla con las propiedades físicas,

mecánicas y termoquímica que requiere el impulsor de la bomba de agua y además presente resistencia a la corrosión.

Estado del arte

Piedrahita & Sánchez (2007), en su estudio de los elementos de diseño de sistemas de enfriamiento de motores de combustión interna, menciona que el correcto funcionamiento de la bomba de agua del vehículo es de vital importancia dado que si esta deja de funcionar se genera un calentamiento del motor que disminuye la eficiencia del mismo. El funcionamiento de esta se genera mediante una conexión a la correa de distribución conectada al cigüeñal del motor, dado que a más revoluciones del motor el calor en el mismo aumenta por ende mientras el motor gire a más revoluciones la bomba también será accionada con mayor velocidad. Cuando no se ha realizado el mantenimiento respectivo, según las recomendaciones del fabricante esta puede presentar fugas del refrigerante y el conductor puede escuchar un ruido cuando gira la polea.

Montalvo (2017), en su estudio de rediseño de la bomba de agua identifica que la geometría del impulsor es la parte más crítica del diseño, dado que la forma de los alabes que contiene junto con la velocidad de giro influyen directamente en los valores de caudal y presión. En este estudio se modifica la entrada del impulsor que es originalmente de 60 mm a 61 mm, con lo cual se consigue una disminución del 5 % de las probabilidades de cavitación en la bomba.

Li, Ji, et al. (2020), en su trabajo investigativo menciona que la bomba de agua del vehículo en comparación con las bombas centrífugas convencionales esta funciona a temperaturas más altas, motivo por el cual es posible que se provoque un rendimiento de cavitación grave, ruido, vibración y un efecto negativo en la vida útil del sistema de enfriamiento. En este estudio se realiza la simulación del elemento mecánico mediante el software ANSYS considerando velocidades variables a las cuales funciona la bomba, con lo que se determina que las regiones de alta pérdida de energía aparecen en la salida del impulsor y en voluta, además el aumento de la velocidad de rotación deterioraría los campos de flujo interno y provocaría más pérdidas de energía. Por lo tanto, la bomba debe operarse dentro de un cierto rango de velocidad de rotación para mantener la alta eficiencia durante la operación.

Li, Li, et al. (2020), estudian la influencia de la cavitación en las características de rendimiento de la bomba, los rendimientos de cavitación con diferentes temperaturas se simularon numéricamente sobre la base de un modelo de cavitación corregido. Los resultados de la investigación muestran que los valores de simulación del coeficiente de distribución de presión en la superficie del hidrora a 70 °C están más de acuerdo con los valores experimentales cuando los coeficientes de evaporación y condensación son 10 y 0,002, respectivamente. Además, se menciona que con la disminución de la presión absoluta en la entrada de la bomba, las burbujas se produjeron primero en el lado de entrada de la pala cerca de la superficie de succión y luego se extendieron gradualmente a la superficie de presión y finalmente obstruyeron el paso del impulsor. Estos resultados proporcionan una referencia teórica para la predicción y optimización del rendimiento de la cavitación.

Rongshen et al. (2021), en su investigación del análisis de tensión estructural en el sistema de rotor de una bomba de sales fundidas de alta temperatura se realizó con base en ANSYS Workbench. En esta investigación se empleó un software de dinámica de fluidos computacional CFX para calcular los flujos turbulentos constantes en la bomba en múltiples condiciones de trabajo, y los resultados previstos se validaron con datos experimentales. Se estableció un modelo dinámico de acoplamiento flujo-estructura térmico para el sistema de rotor considerando las cargas hidrodinámicas, centrífugas y térmicas en la bomba, en base a este modelo, se investigó la influencia de las propiedades del material y la temperatura en el rendimiento estructural de la bomba y un análisis de tensión estructural en los componentes del sistema del rotor.

Los resultados muestran que bajo la misma condición de flujo, la deformación máxima de las palas del impulsor en diferentes materiales muestra una tendencia primero creciente y luego decreciente con el aumento de temperatura, en cuanto a la deformación del impulsor esta se mantiene básicamente constante y se ve menos afectada por el caudal, mientras que el nivel de tensión en el lado de presión de la pala es más alto que en el lado de succión de la pala, y el valor de tensión en el lado de succión de la pala en diferentes materiales exhibe una tendencia linealmente decreciente a diversas temperaturas. La posición con el esfuerzo equivalente más alto se concentra principalmente en las áreas donde las palas están en contacto con la cubierta y el cubo cerca de la salida del impulsor. Basado en el análisis exhaustivo sobre la deformación y resistencia del impulsor, el

impulsor con acero inoxidable 316L tiene el mejor desempeño de mecánica sólida en comparación con el de los aceros inoxidables 347 y 420.

Fernández et al. (2016), en este estudio se seleccionan dos materiales para la fabricación aditiva de impulsores ABS y ácido poliláctico (PLA), sin embargo, entre estos dos materiales se selecciona el ABS por su larga vida útil y resistencia mecánica, en comparación al PLA que es más frágil y tiende a astillarse y romperse. Al final de este experimento, ninguno de los impulsores FDM sufrió algún daño o degradación, el ABS tiene una resistencia mecánica adecuada y si el líquido bombeado es químicamente neutro al plástico del impulsor. Además, en este estudio se destaca que la rugosidad inherente en el proceso de fabricación de FDM de las superficies externas del impulsor no es una limitación en los resultados de la curva de flujo de cabeza de la bomba, sin embargo, la mejora de la calidad superficial del FDM impulsor que utiliza un postratamiento químico de bajo costo proporciona una mejora en el rendimiento de la bomba y un mayor comportamiento estable en el rango de operación de alto flujo de la bomba.

Pavlovic et al. (2017), en su trabajo de investigación evaluó polímeros comunes utilizados para fabricación aditiva para obtener prototipos de impulsores que cumplan con los requisitos funcionales de la pieza mecánica. En particular, la investigación se centró en un impulsor de bomba de agua como estudio de caso práctico, para el mismo se seleccionaron tres polímeros: ABS plus, ABS y PLA, realizando una comparación de las propiedades mecánicas de tracción y flexión de estos materiales. Después de realizar los ensayos de flexión y tracción de los materiales antes mencionados, se obtiene que los polímeros ABSplus y ABS satisfacen todos los requisitos mecánicos, mientras que PLA falla. Adicional a los ensayos realizados, los impulsores fueron incorporados y probados, comprobando así la funcionalidad de estos.

Este estudio demuestra que la selección de un polímero adecuado, permite que la fabricación aditiva se puede utilizar con éxito para producir complejos elementos, lo que conduce a una producción extremadamente rápida, alta precisión y precisión e incluso menores costos en comparación con otras convencionales tecnologías.

Adiaconitei et al. (2021), en su trabajo estudió el proceso de fabricación de un impulsor cerrado para sistemas de bucle de fluido bombeado mecánicamente (MPFL) mediante fabricación aditiva, usando tecnología SLM (Fusión selectiva con láser) la cual se basa en derretir partículas de polvo de metal y un proceso de fusión total. En el estudio

se empleó una aleación IN615, imprimiendo un impulsor abierto y tres impulsores cerrados en diferentes orientaciones, para evaluar su estabilidad geométrica, en términos de precisión dimensional tanto para las piezas impresas como para las desviaciones de las palas. Se concluyó que una orientación de impresión de $B + 45^\circ$ presenta la mejor correlación geométrica entre desviaciones y espesores de las palas del impulsor, los 45° de orientación fue un punto de ajuste preliminar para la fabricación de un pequeño impulsor cerrado con una geometría compleja sin la deposición de material de soporte en áreas dentro del impulsor cerrado que son imposibles de quitar. Tanto las operaciones de fabricación aditiva como las de torneado mostraron excelentes resultados en términos de mejora de la rugosidad y estabilidad dimensional, sin embargo, el proceso de fabricación aditiva requiere un medio y parámetros de proceso más adaptables para superar problemas y mejorar los resultados.

Gomez & Pernet (2004) en su monografía de análisis de los parámetros básicos de diseño de impulsores utilizados en bombas centrifugas describiendo las fórmulas que determinan los parámetros de diseño de un impulsor como el número de alabes, triángulos de velocidades, ángulos de ingreso y salida del fluido. El autor afirma que la determinación correcta del ángulo de entrada y salida del fluido al impulsor son muy importantes e influyen directamente en el rendimiento mecánico e hidráulico de la bomba.

Método

Tipo de Estudio

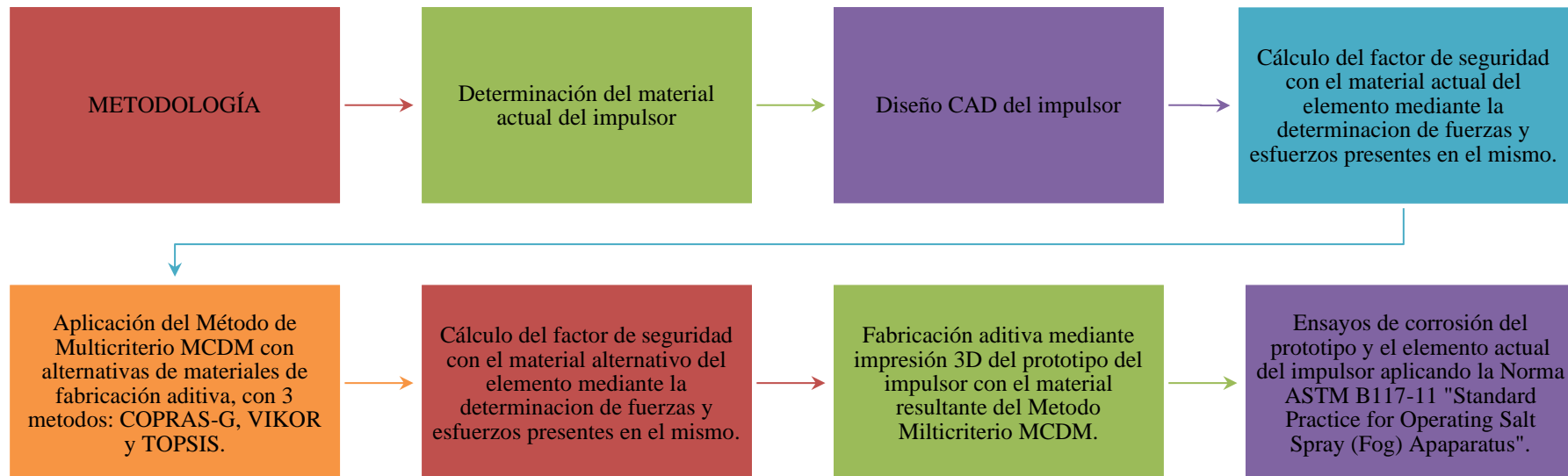
El presente proyecto de investigación tiene un enfoque cuantitativo, este inicia con una investigación exploratoria para conocer el funcionamiento, material y todo sobre el impulsor de la bomba de agua del vehículo Chevrolet Sail 2016, además de investigar materiales alternativos con tecnologías de manufactura aditiva, posterior a la misma se aplicará una investigación descriptiva para evaluar la mejor alternativa de un nuevo material para la fabricación del impulsor.

Modalidad de investigación

Esta investigación es de tipo experimental, en la cual se aplicará el método multicriterio para seleccionar un material alternativo de fabricación aditiva que permita un correcto funcionamiento del impulsor de la bomba y disminuya la corrosión de este elemento, para la validación del nuevo material se aplicaran simulaciones de elementos finitos de esfuerzo-deformación.

Metodología

El proceso para seleccionar un material alternativo de fabricación aditiva para el impulsor de la bomba de agua, se describe a continuación en la figura 1.

Figura 1*Pasos de la Metodología propuesta*

Determinación de propiedades del material actual

La determinación del material actual del cual se encuentra fabricado el impulsor de la bomba es indispensable para realizar la simulación de esfuerzo-deformación de a pieza y conocer el comportamiento de la misma ante las cargas a las cuales se encuentra sometida. Se aplicó un ensayo de metalografía, el cual consiste en tomar una muestra del material preparar la probeta, pulirla hasta obtener un efecto espejo que será expuesto ante un microscopio para determinar la cantidad de carbono presente en el material y definir el tipo de acero al carbono del cual está fabricada la pieza.

A continuación, en las Tablas 1 y 2, se describe el microscopio utilizado en el ensayo metalográfico y las condiciones del mismo.

Tabla 1

Especificaciones del microscopio metalográfico

Especificaciones del Microscopio Metalográfico			
	Equipo: Microscopio Metalográfico	Marca: RADICAL	Modelo: RMM-1
	Magnificación: 50-500X	Filtro: 4 colores	Iluminación: Luz fluorescente

Nota. Las características del microscopio utilizado fueron obtenidas del informe entregado por el Centro de Transferencia y Tecnología de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, en donde se realizó el ensayo.

Tabla 2

Parámetros del ensayo metalográfico

Parámetros del ensayo metalográfico			
Acondicionamiento de la superficie		Pulido mecánico	
Temperatura durante el pulido:	19 °C	Superficie preparada en:	Lijas: 240, 320, 400, 600, 1000, 1500, 2000
Ataque químico de la superficie	Nital 4	Duración:	3 segundos

Nota. La tabla muestra los parámetros de preparación de la probeta para obtener la imagen de la estructura metalográfica

Diseño CAD

Para obtener el modelo CAD del impulsor se utilizó un calibrador pie de rey (Figura 2) para la obtención de todas sus dimensiones (Figura 3) con las cuales se generó el modelo CAD utilizando el software Inventor.

Figura 2

Calibrador pie de rey utilizado para tomar las medidas del impulsor



Figura 3

Toma de medidas del impulsor



Cálculos analíticos para obtener el factor de seguridad

El análisis analítico implica la aplicación de principios y ecuaciones fundamentales como las de Bernoulli, Euler, usadas en mecánica de fluidos y turbomáquinas.

Triángulos de velocidades

El intercambio de energía en una turbomáquina se da únicamente en el impulsor o rodete de la misma, mientras que los demás elementos de la máquina por donde circula el fluido son los conductores o transformadores de la energía que posee el fluido. Este intercambio de energía se genera mediante la acción- reacción que se da en las paredes de los alabes y el fluido, así la acción resultante del impulsor sobre el fluido es una fuerza que se calcula mediante el principio de la cantidad de movimiento.

La ecuación de Euler es aquella que expresa la energía por unidad de masa que se intercambia en el impulsor, esta constituye la base analítica para el diseño del elemento principal de una turbo máquina que es el impulsor. Para obtener esta ecuación fundamental son importantes los triángulos de velocidades los cuales están formados por tres vectores de velocidad: la velocidad absoluta del fluido, la velocidad relativa del rotor respecto al fluido y la velocidad tangencial, estas velocidades se encuentran tanto a la entrada como a la salida del fluido, dando lugar a dos triángulos como se muestra en las Figura 4 y Figura 5.

Figura 4

Triángulos de velocidades

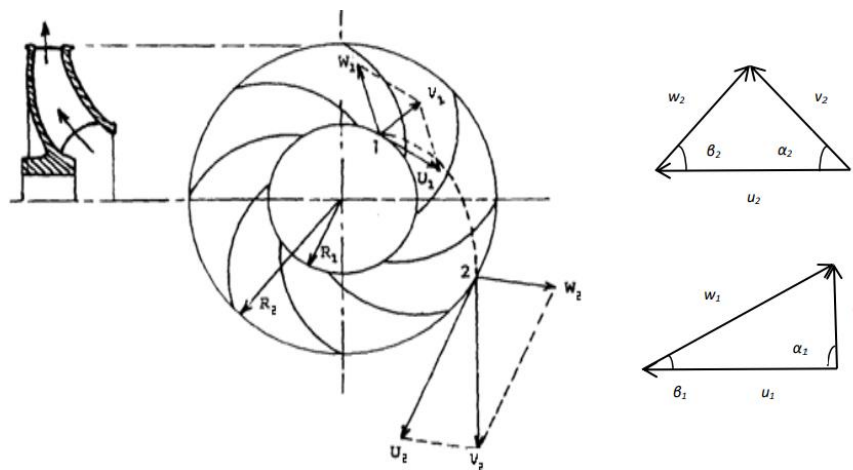
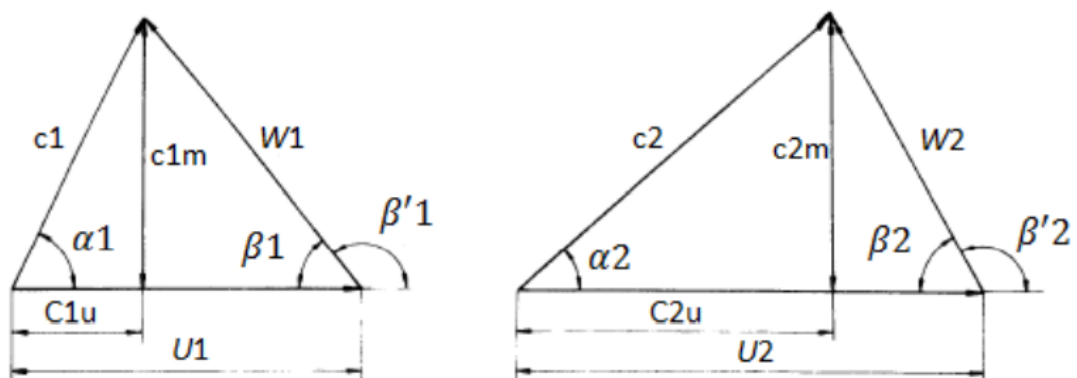


Figura 5

Detalle de triángulos de velocidades



En la Figura 5 se detallan las velocidades: C_1, C_2 son las velocidades absolutas; W_1, W_2 son las velocidades relativas; $C_m =$ Velocidad axial y $U =$ Velocidad tangencial, todas estas en m/s.

Para el cálculo de las velocidades antes mencionadas se aplicarán las ecuaciones 1,2 y 3:

Velocidad tangencial (U)

$$U = \frac{\pi \times D \times N}{60} \quad (1)$$

Donde:

D : Diámetro considerado sea este de entrada o salida

N : Velocidad de giro del impulsor en rpm

Velocidad axial (C_m)

$$C_m = \frac{0,8 \times Q_D \times 4}{\pi \times (D_e^2 - D_i^2)} \quad (2)$$

Donde:

Q_D : Caudal

D_e : Diámetro externo del impulsor

D_i : Diámetro interior del impulsor

Velocidad relativa (W)

$$W = \sqrt{U^2 + C^2} \quad (3)$$

Donde:

U : Velocidad tangencial

C : Velocidad absoluta sea esta de entrada (C_1) o salida (C_2)

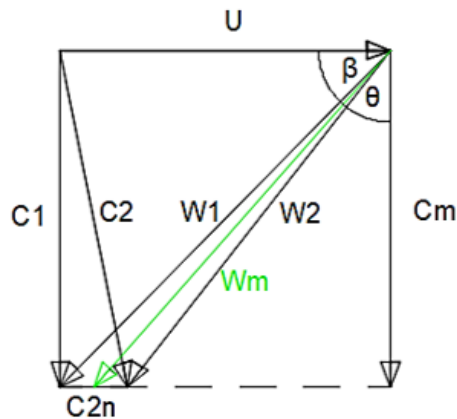
Velocidad relativa media (W_m)

Esta velocidad se halla cuando se interponen los triángulos de la entrada y salida mediante la ecuación 4 y como se muestra en la Figura 6.

$$W_m = \sqrt{C_m^2 + \left(U - \frac{C_{2n}}{2}\right)^2} \quad (4)$$

Figura 6

Interposición de los triángulos de las velocidades de entrada y salida

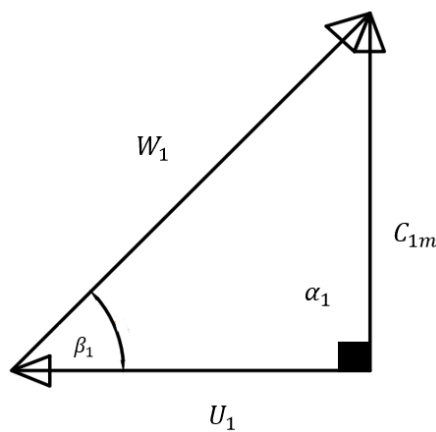


Resolución del triángulo de entrada

En nuestro caso de estudio se genera un triángulo rectángulo como indica la figura 7, considerando que la componente tangencial $C_{1u} = 0$, esta consideración se aplica dado que la entrada de flujo es axial, obteniendo un triángulo de entrada.

Figura 7

Triángulo de velocidades de entrada al impulsor



Chávez (2012), en su trabajo de investigación sobre el análisis de un motor a gasolina de un Chevrolet Sail 1.4 lt, que corresponde al modelo de nuestro caso de estudio, determina que el caudal usado por la bomba del sistema de refrigeración de este vehículo es de $1.85 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}$.

Se consideran 3500 rpm, velocidad promedio proveniente del motor del vehículo

Diámetro a la entrada: $D_1 = 0.038m$

Altura del alabe en la entrada: $b_1 = 0.0145m$

$$Q = \pi \times D_1 \times b_1 \times C_{1m} \quad (5)$$

$$1.85 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s} = \pi(0.038m)(0.0145m)C_{1m}$$

$$C_{1m} = \frac{1.85 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}}{\pi(0.038m)(0.0145m)}$$

$$C_{1m} = 1.06 \frac{m}{s}$$

$$C_1 = \sqrt{(C_{1u})^2 + (C_{1m})^2}$$

$$C_1 = 1.06 \frac{m}{s}$$

$$U_1 = \frac{\pi \times D_1 \times N}{60}$$

$$U_1 = \frac{\pi \times (0.038) \times (3500rpm)}{60}$$

$$U_1 = 6.96 \frac{m}{s}$$

$$W_1 = \sqrt{(W_{1u})^2 + (W_{1m})^2}$$

$$W_1 = \sqrt{(U)^2 + (C_{1m})^2}$$

$$W_1 = \sqrt{(6.96 \frac{m}{s})^2 + (1.068 \frac{m}{s})^2}$$

$$W_1 = 7.04 \frac{m}{s}$$

$$\tan \beta_1 = \frac{C_{1m}}{U_1}$$

$$\beta_1 = \tan^{-1} \frac{1.06}{6.96}$$

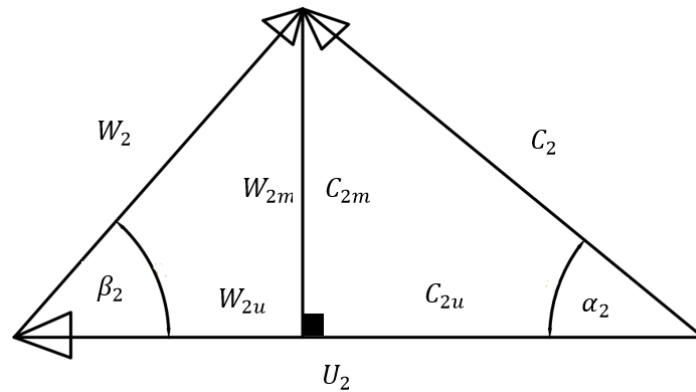
$$\beta_1 = 8.66^\circ$$

Resolución del triángulo de salida

En nuestro caso de estudio se genera un triángulo isósceles, formado por las tres velocidades como se identifica en la Figura 8, este triángulo se resuelve aplicando los postulados y reglas de trigonometría para obtener el valor de las velocidades.

Figura 8

Triángulo de velocidades de salida del impulsor



Diámetro a la salida: $D_2 = 0.051m$

Altura del alabe en la salida: $b_2 = 0.0125m$

$$Q = \pi \times D_2 \times b_2 \times C_{2m}$$

$$C_{2m} = \frac{Q}{\pi \times D_2 \times b_2}$$

$$C_{2m} = \frac{1.84 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s}}{\pi(0.051m)(0.0125)}$$

$$C_{2m} = 0.92 \frac{m}{s}$$

$$U_2 = \frac{\pi \times D_2 \times N}{60}$$

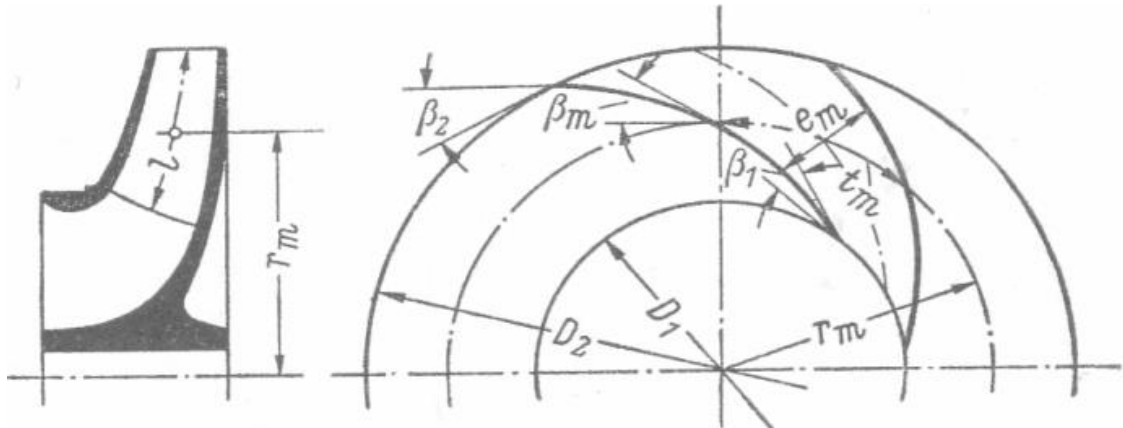
$$U_2 = \frac{\pi(0.051m)(3500rpm)}{60}$$

$$U_2 = 9.35 \frac{m}{s}$$

Gomez & Pernet (2004) afirma que en los impulsores se supone un ángulo β , el cual varia linealmente a lo largo del alabe desde β_1 hasta β_2 de tal manera que el alabe en el circulo medio de radio r_m estara inclinado con un angulo β_m , como se identifica en la Figura 9.

Figura 9

Formación de los canales del impulsor



Según estas definiciones Gómez & Pernet (2004), deduce las ecuaciones 6 y 7 para determinar un ángulo medio β_m y el número de alabes.

$$\beta_m = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \tag{6}$$

$$z = 2\pi \frac{D_1 + D_2}{D_2 - D_1} \text{sen}\beta_m \tag{7}$$

En el presente caso de estudio se conoce que el impulsor tiene 6 alabes, con lo cual se puede obtener el ángulo medio β_m despejando la ecuación 7 y por consiguiente el valor del ángulo β_2 con la ecuación 6.

$$\text{sen}\beta_m = \frac{z}{2\pi \frac{D_1 + D_2}{D_2 - D_1}}$$

$$\text{sen}\beta_m = \frac{6}{2\pi \frac{0.038m + 0.051m}{0.051m - 0.038m}}$$

$$\text{sen}\beta_m = \frac{6}{2\pi(6.846)}$$

$$\beta_m = \text{sen}^{-1}\left(\frac{6}{2\pi(6.846)}\right)$$

$$\beta_m = 8.02^\circ$$

$$\beta_2 = 2\beta_m - \beta_1$$

$$\beta_2 = 2(8.02^\circ) - 8.65^\circ$$

$$\beta_2 = 7.39^\circ$$

Una vez determinado el ángulo formado por la velocidad absoluta U_2 y la velocidad relativa C_2 , se determinarán los valores de estas aplicando resoluciones de triángulos rectángulos y la ley de cosenos.

$$\tan\beta_2 = \frac{C_{2m}}{W_{2u}}$$

$$W_{2u} = \frac{0.92 \frac{m}{s}}{\tan 7.39^\circ}$$

$$W_{2u} = 7.09 \frac{m}{s}$$

$$U_2 = W_{2u} + C_{2u}$$

$$C_{2u} = U_2 - W_{2u}$$

$$C_{2u} = 9.35 \frac{m}{s} - 7.09 \frac{m}{s}$$

$$C_{2u} = 2.26 \frac{m}{s}$$

$$C_2 = \sqrt{(C_{2u})^2 + (C_{2m})^2}$$

$$C_2 = \sqrt{\left(0.92 \frac{m}{s}\right)^2 + \left(2.26 \frac{m}{s}\right)^2}$$

$$C_2 = 2.44 \frac{m}{s}$$

$$\tan\alpha_2 = \frac{C_{2m}}{C_{2u}}$$

$$\alpha_2 = \tan^{-1}\left(\frac{0.92 \frac{m}{s}}{2.26 \frac{m}{s}}\right)$$

$$\alpha_2 = 22.15^\circ$$

$$(W_2)^2 = (C_2)^2 + (U_2)^2 - 2(C_2)(U_2)\cos\alpha_2$$

$$(W_2)^2 = \left(2.44 \frac{m}{s}\right)^2 + \left(9.35 \frac{m}{s}\right)^2 - 2 \left(2.44 \frac{m}{s}\right) \left(9.35 \frac{m}{s}\right) \cos 22.15^\circ$$

$$(W_2)^2 = 51.115 \frac{m^2}{s^2}$$

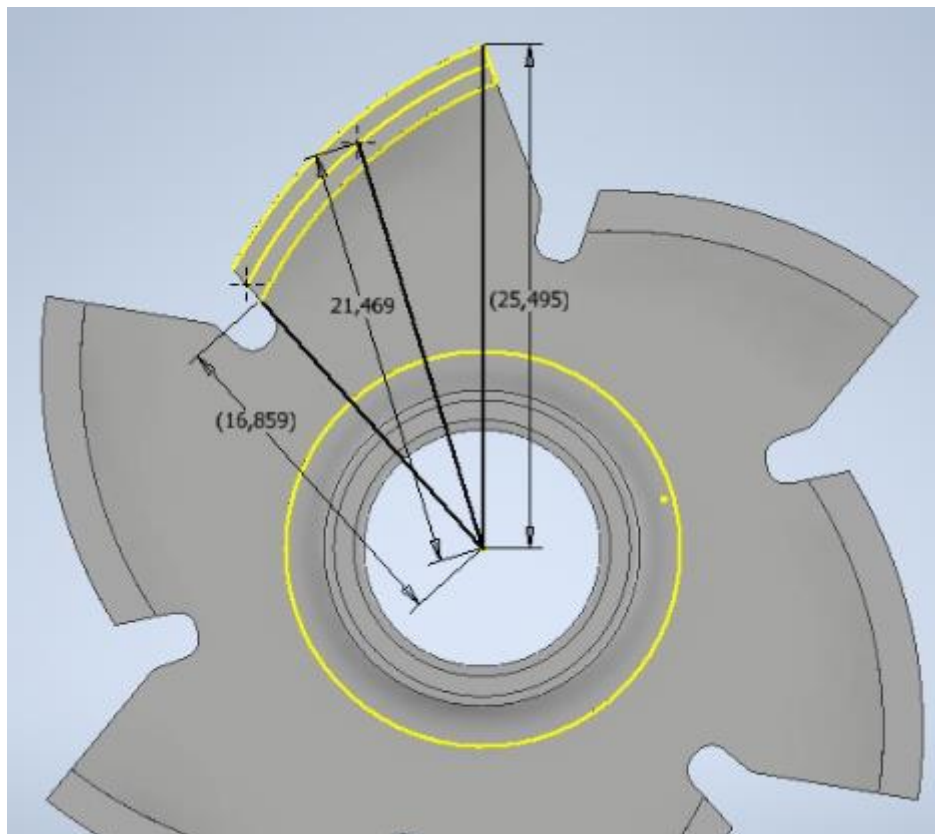
$$W_2 = 7.15 \frac{m}{s}$$

Fuerzas en los alabes

Para calcular las fuerzas en los alabes se considera un diferencial de integración para el cual se consideran radios (r), que son distancias al centro de giro del impulsor como se muestra en la figura 10, siendo $r_e=25.495\text{mm}$, $r_i=21.469\text{mm}$, $r=16,859\text{mm}$.

Figura 10

Formación de los canales del impulsor

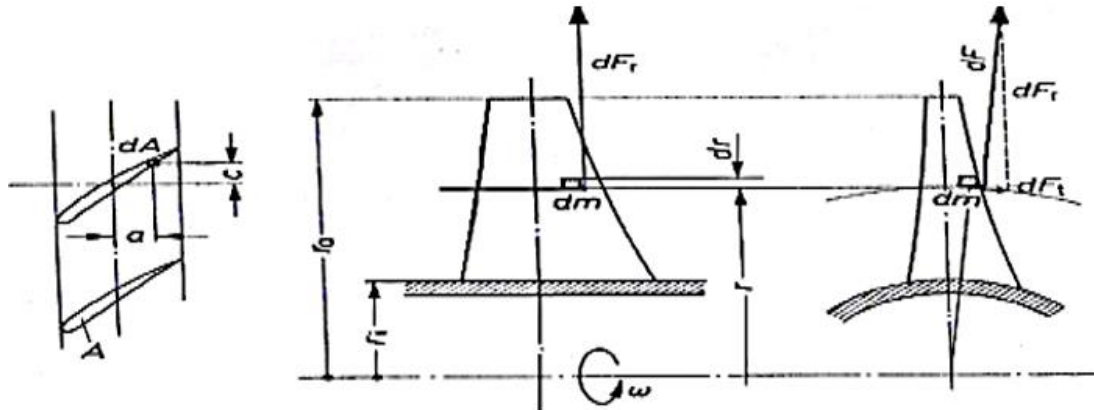


Fuerza radial (F_r)

Para calcular la fuerza radial en el alabe se toma un elemento diferencial de masa, que estará ubicado a una r distancia desde el centro de giro del impulsor como se muestra en la Figura 11 y se aplica la ecuación 9.

Figura 11

Elemento diferencial usado para el cálculo de la fuerza radial



$$F_r = \rho_m \omega^2 \int_r^{re} A \times r \times dr \tag{9}$$

Donde:

ρ_m : Densidad del material ($\frac{Kg}{m^3}$)

ω : Velocidad angular del rodete ($\frac{rad}{s}$)

A: Área de la sección transversal (m^2)

r: Radio (m)

Material 1: Acero AISI 1018

$$F_r = (7870 \frac{Kg}{m^3}) \left(366.52 \frac{rad}{s} \right)^2 (3.40 \times 10^{-5} m^2) \left(\frac{(0.0254m)^2}{2} - \frac{(0,0214)^2}{2} \right)$$

$$F_r = 3.44 N$$

Material 2: CF20 (Copolíéster reforzado con fibra de carbono)

$$F_r = (1350 \frac{Kg}{m^3}) \left(366.52 \frac{rad}{s} \right)^2 (3.40 \times 10^{-5} m^2) \left(\frac{(0.0254m)^2}{2} - \frac{(0,0214)^2}{2} \right)$$

$$F_r = 0.59 N$$

Esfuerzo de tracción (σ_n)

El esfuerzo de tracción se produce por la acción de la fuerza radial sobre los alabes del impulsor y se calcula aplicando la ecuación 10.

$$\sigma_n = \frac{\rho_m \times \omega^2}{A} \int_r^{re} A \times r dr \quad (10)$$

Material 1: Acero AISI 1018

$$\sigma_n = (7870 \frac{Kg}{m^3}) \left(366.52 \frac{rad}{s} \right)^2 \left(\frac{(0.0254m)^2}{2} - \frac{(0,0214)^2}{2} \right)$$

$$\sigma_n = 101.38 KPa$$

Esfuerzo de torsión (ζ_T)

El esfuerzo de torsión es el resultado del producto del momento de torsión considerada a una distancia que es un radio considerado desde el centro de giro del impulsor.

$$\zeta_T = \frac{\rho_m \times \omega^2 \times S}{J_o} \int_r^{re} I_{xy} dr \quad (11)$$

Donde:

S : Distancia del centro de giro a la base del álabe (m)

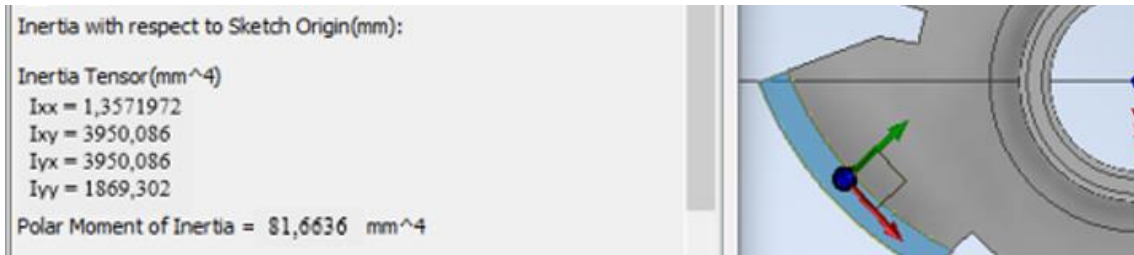
J_o : Momento polar de inercia (m^4)

I_{xy} : Momento de inercia

Los momentos de inercia se obtuvieron del software de diseño Inventor, datos que se muestran en la figura 12.

Figura 12

Momentos de inercia



Material 1: Acero AISI 1018

$$\zeta_T = \frac{\left(7870 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(366.52 \frac{rad}{s}\right)^2 (0.0168m)}{8.16 \times 10^{-9} m^4} (3.95 \times 10^{-8} m^4) (0.0254m - 0,0214m)$$

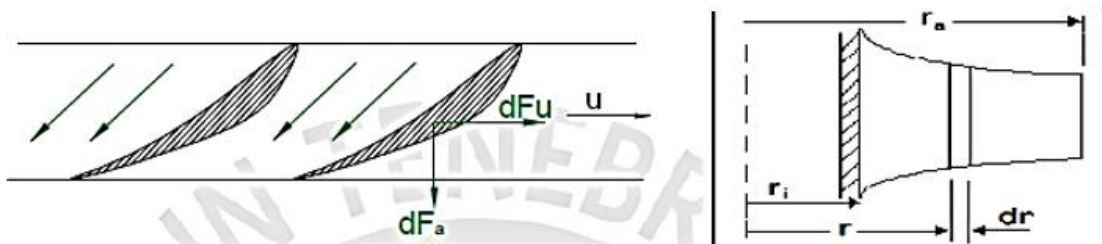
$$\zeta_T = 4.83 MPa$$

Componentes de la fuerza de empuje

Según Abid R (2007), el alabe se puede considerar como una viga en voladizo de un área de sección transversal variable sobre la cual se ejerce una fuerza de empuje o fuerza aerodinámica, cuyas componentes son la fuerza axial y tangencial como se detalla en la figura 13.

Figura 13

Fuerza axial y fuerza tangencial



Fuerza axial (F_a)

Componente de la fuerza de empuje, se calcula aplicando la ecuación 12.

$$F_a = \frac{2\pi \times \rho \times g \times H}{z} \int_r^{re} R \times r dr \tag{12}$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido ($\frac{Kg}{m^3}$)

z : Número de álabes

R : Grado de reacción a una distancia r

H : Altura real

Calculo del grado de reacción aplicando la ecuación 13.

$$R = \frac{(w_1 - w_2)^2 + (u_1 - u_2)^2}{(c_1 - c_2)^2 + (w_1 - w_2)^2 + (u_1 - u_2)^2} \quad (13)$$

$$R = \frac{(7.01 - 7.15)^2 + (9.35 - 6.96)^2}{(2.44 - 1.06)^2 + (9.35 - 6.96)^2 + (7.01 - 7.15)^2}$$

$$R = 0.75$$

Cálculo del grado de reacción aplicando la ecuación 13.

$$H = \frac{u_1 c_{1u} - u_2 c_{2u}}{g} \quad (14)$$

$$H = \frac{0 - (9.35 \frac{m}{s})(2.26 \frac{m}{s})}{9.8 \frac{m}{s^2}}$$

$$H = 2.1 m$$

$$F_a = \frac{2\pi \left(1000 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(9.8 \frac{m}{s^2}\right) (2.1m)}{6} (0.75) \left(\frac{(0.0254m)^2}{2} - \frac{(0.0214)^2}{2}\right)$$

$$F_a = 1.51N$$

Fuerza tangencial (F_u)

Componente de la fuerza de empuje, se calcula aplicando la ecuación 15.

$$F_u = \frac{2\pi \times \rho_a \times c_m}{z} \int_r^{r_e} \Delta C_u \times r dr \quad (15)$$

Donde:

c_m : Componente axial del fluido ($\frac{m}{s}$)

ΔC_u : Variación de la velocidad tangencial a una distancia r ($\frac{m}{s}$)

$$\Delta C_u = C_{2u} - C_{1u} \quad (16)$$

$$C_m = \frac{0.8(1.84 \times 10^{-3} \frac{m^3}{s})4}{\pi \times ((0.051m)^2 - (0.038m)^2)}$$

$$C_m = 1.06 \frac{m}{s}$$

$$F_u = \frac{2\pi \left(1000 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(1.06 \frac{m}{s}\right)}{6} \left(2.26 \frac{m}{s}\right) \left(\frac{(0.0254m)^2}{2} - \frac{(0.0214)^2}{2}\right)$$

$$F_a = 0.23 N$$

Momento flector de la fuerza axial (M_{Fa})

Esfuerzo producido por la fuerza axial antes detallada, se calcula aplicando la ecuación 17.

$$M_{Fa} = \frac{2\pi \times \rho_a \times g \times H}{z} \int_r^{re} R \times r \times (r - ri) dr \quad (17)$$

Donde:

H : Salto hidráulico (m)

R : Grado de reacción a una distancia r

$$M_{Fa} = \frac{2\pi \left(1000 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(9.8 \frac{m}{s^2}\right) (2.1m)}{6} (0.75) \left[\left(\frac{(0.0254m)^3}{3} - (0.0168m) \frac{(0.0254m)^2}{2} \right) - \left(\frac{(0.0214m)^3}{3} - (0.0168m) \frac{(0.0214m)^2}{2} \right) \right]$$

$$M_{Fa} = 0.011 Pa$$

Momento flector de la fuerza tangencial (M_{Fu})

Esfuerzo producido por la fuerza tangencial antes detallada, se calcula aplicando la ecuación 18.

$$M_{Fu} = \frac{2\pi \times \rho_a \times c_m}{z} \int_r^{re} \Delta C_u \times r \times (r - ri) dr \quad (18)$$

$$M_{Fu} = \frac{2\pi \left(1000 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(9.8 \frac{m}{s^2}\right) \left(1.06 \frac{m}{s}\right)}{6} \left(2.26 \frac{m}{s}\right) \left[\frac{(0.0254m)^3}{3} - (0.0168m) \frac{(0.0254m)^2}{2} - \left(\frac{(0.0214m)^3}{3} - (0.0168m) \frac{(0.0214m)^2}{2} \right) \right]$$

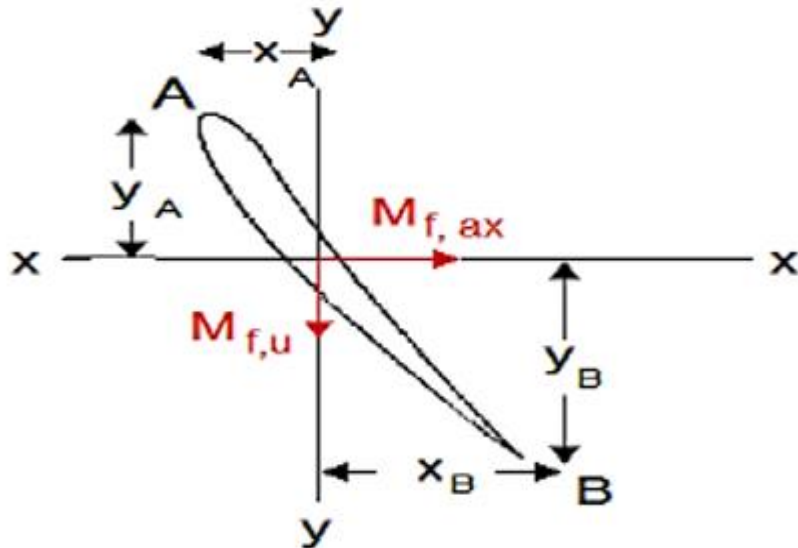
$$M_{Fu} = 0.0026 Pa$$

Esfuerzo de flexión (σ_f)

Según Abid R. (2007) el esfuerzo de flexión máximo se genera en la base del alabe, este esfuerzo es producido por los momentos flectores generados por la fuerza de empuje, considerando un punto máximo de flexión de coordenadas (X_A, Y_A) como se indica en la figura 14.

Figura 14

Esfuerzo de flexión en el alabe



$$\sigma_f = \frac{Y_A}{I_{xx}} \times M_{Fa} + \frac{X_A}{I_{yy}} \times M_{Fu} \quad (19)$$

Donde:

I_{xx} : Momento de inercia del perfil en el eje x a una distancia r del centro de giro (m^4)

I_{yy} : Momento de inercia del perfil en el eje y a una distancia r del centro de giro (m^4)

El centroide y momentos de inercia se obtuvieron del software Inventor, mostrados en la figura 11 y 14.

$$\sigma_f = \frac{0.0545m}{(1.36 \times 10^{-12} m^4)} (0.01 \text{ Pa}) + \frac{0.0027m}{(1.87 \times 10^{-9} m^4)} (0.0016 \text{ Pa})$$

$$\sigma_f = 21.96 \text{ MPa}$$

Esfuerzo equivalente (σ_{eq})

El esfuerzo equivalente o máximo se obtiene mediante la teoría de esfuerzos de Von Misses, con lo cual se verifica la resistencia del alabe.

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_n + \sigma_f)^2 + 3 * \zeta_T^2} \quad (19)$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(101.38 \times 10^3 \text{ Pa} + 21.96 \times 10^6 \text{ Pa})^2 + 3(4.83 \times 10^6 \text{ Pa})^2}$$

$$\sigma_{eq} = 23.59 \text{ MPa}$$

Factor de seguridad con el ACERO AISI 1018 (FS)

El factor de seguridad que garantizara el correcto funcionamiento de los alabes se calcula conociendo el esfuerzo equivalente y considerando el del material.

$$FS = \frac{\sigma_F}{\sigma_{eq}} \quad (20)$$

$$FS = \frac{410 \text{ MPa}}{23.59 \text{ MPa}}$$

$$FS = 17.37$$

Aplicación del método multicriterio MCDM

Para seleccionar el material alternativo del impulsor se seleccionarán 4 alternativas de materiales de fabricación Aditiva, con 3 métodos: evaluación compleja proporcional

(COPRAS), técnica para el orden de preferencia por similitud a solución real (TOPSIS) y optimización multidisciplinar y solución de compromiso (VIKOR).

Antes de la aplicación de los métodos multicriterio se aplica la ponderación de pesos mediante el método de entropía para esto se utilizará la calculadora de prioridad AHP.

Método Entropía

Este método consiste en medir la incertidumbre en la información formulada aplicando la teoría de la probabilidad, siendo así que una distribución amplia indica más incertidumbre que una distribución con picos pronunciados. Para este método se aplican los siguientes pasos:

1. Construcción de la matriz de decisión

$$[r_{11} \ r_{12} \ \dots \ r_{1n} \ r_{21} \ r_{22} \ \dots \ r_{2n} \ \dots \ \dots \ \dots \ \vdots \ r_{m1} \ r_{m2} \ \dots \ r_{mn}]$$

2. Cálculo de la matriz de decisión normalizada P_{ij} , con el objetivo de obtener valores adimensionales de todos los criterios y así realizar comparaciones entre ellos, mediante la siguiente ecuación 21.

$$P_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}} \quad (21)$$

3. Cálculo de la entropía, aplicando la siguiente ecuación 22.

$$E_j = -k \left(\sum_{i=1}^m P_{ij} \ln (P_{ij}) \right) \quad (22)$$

Donde $k = \frac{1}{\ln \ln m}$, esta constante garantiza $0 \leq E_j \leq 1$, siendo m el número de alternativas.

4. Cálculo de la diversidad de criterios D_j , mediante la siguiente ecuación 23.

$$D_j = 1 - E_j \quad (23)$$

5. Cálculo del peso normalizado W_j para cada criterio, aplicando la siguiente ecuación 24.

$$W_j = \frac{D_j}{\sum_{i=1}^m D_j} \quad (24)$$

Método VIKOR

Este método consiste en clasificar y seleccionar de un grupo de alternativas en presencia de criterios contradictorios, esto se realiza mediante la comparación de la medida de proximidad con las alternativas ideal.

1. Identificación de alternativas

$$f_j^{max} = f_{ij}$$

$$f_j^{min} = \min f_{ij}$$

De donde f_j^{max} es el mejor valor de todos los criterios, mientras que f_j^{min} es el peor valor de todos los criterios.

2. Cálculo de la matriz resultante de la sumatoria (S_i) y la matriz de valores correspondiente a los rangos (R_i) por las relaciones, aplicando las ecuaciones 25 y 26.

$$S_i = \sum_{j=1}^n \frac{W_f(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \quad (25)$$

$$R_i = \max_j \left[\frac{W_f(f_j^{max} - f_{ij})}{(f_j^{max} - f_j^{min})} \right] \quad (26)$$

Donde W_f son los valores resultantes de los pesos.

3. Aplicando la ecuación 27, se calcula Q_i que es el valor final de cada criterio por relación.

$$Q_i = \frac{v(S_i - S_{min})}{(S_{max} - S_{min})} + \frac{(1 - v)(R_i - R_{min})}{(R_{max} - R_{min})} \quad (27)$$

Donde v es una constante cuyo valor es 0.50

4. Calcular el valor P_i , para determinar el ranking.
5. Determinar el ranking de los materiales en función del valor de P_i de menor a mayor.

Método TOPSIS

En este método se evalúan las alternativas aplicando el concepto de maximizar la distancia de soluciones negativas y minimizar la distancia de las soluciones ideales positivas, con el objetivo de obtener soluciones aceptables aplicando la discretización de variables. Según Cevallos, B., et al (2013) los pasos a seguir en este método son los siguientes:

1. Cálculo de la matriz de decisión normalizada

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n a_{ij}^2}} \tag{28}$$

$$R_{ij} = [r_{11} \ r_{12} \ \dots \ r_{1n} \ r_{21} \ r_{22} \ \dots \ r_{2n} \ \dots \ \dots \ \dots \ \vdots \ r_{m1} \ r_{m2} \ \dots \ r_{mn}]$$

En donde, a_{ij} corresponde a los valores de la matriz de decisión y r_{ij} son los valores pertenecientes a la matriz normalizada.

2. Cálculo de matriz normalizada de pesos V_{ij} .

$$V_{ij} = r_{ij} \times W_j$$

$$V_{ij} = [w_1 r_{11} \ w_2 r_{12} \ \dots \ w_n r_{1n} \ w_1 r_{21} \ w_2 r_{22} \ \dots \ w_n r_{2n} \ \vdots \ \vdots \ \vdots \ w_1 r_{m1} \ w_2 r_{m2} \ \dots \ w_n r_{mn}]$$

En donde w_j es el valor del peso de cada criterio y v_{ij} son los valores normalizados de cada elemento individual.

3. Cálculo de la mejor idea y la peor alternativa evaluada, empleando las siguientes matrices:

$$A^+ = \{max_i v_{ij} | j \in J\}, (min_i v_{ij} | j \in J')\} = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}$$

$$A^- = \{max_i v_{ij} | j \in J\}, (min_i v_{ij} | j \in J')\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$$

Donde, A^+ y A^- son los valores positivos y negativos ideales.

4. Cálculo de la distancia Euclídeana de la mejor idea aplicando la ecuación 29.

$$S_i^+ = \left[\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^+)^2 \right]^{0.5} \tag{29}$$

5. Cálculo de la distancia Euclídeana de la peor idea con la ecuación 30.

$$S_i^- = \left[\sum_{j=1}^m (V_{ij} - V_j^-)^2 \right]^{0.5} \quad (30)$$

6. Cálculo del coeficiente de proximidad relativo P_i , el cual engloba un conjunto de soluciones, estas se ordenan de menor a mayor. Para obtener este valor se aplica la ecuación 31.

$$P_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (31)$$

Método COPRAS

Este método consiste en evaluar y considerar el rendimiento de las alternativas en referencia a distintos criterios, además de las ponderaciones de estos. El método selecciona la mejor opción considerando tanto la solución ideal como la solución antiideal, aplicando los siguientes pasos para su desarrollo:

1. Cálculo de la matriz normalizada, mediante la ecuación 32.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (32)$$

En donde, r_{ij} son los valores de la matriz normalizada y a_{ij} representa los valores de la matriz de decisión

2. Construcción de la matriz estandarizada de pesos, este es un paso similar al que aplica el método TOPSIS aplicando la ecuación 33.

$$V_{ij} = r_{ij} \times W_j \quad (33)$$

$$V_{ij} = [w_1 r_{11} \ w_2 r_{12} \ \cdots \ w_n r_{1n} \ w_1 r_{21} \ w_2 r_{22} \ \cdots \ w_n r_{2n} \ \vdots \ \vdots \ \vdots \ w_1 r_{m1} \ w_2 r_{m2} \ \cdots \ w_n r_{mn}]$$

3. Determinación de valores de los pesos normalizados ponderados, estos se calculan tanto para los criterios beneficiosos como para los que no son beneficiosos, aplicando las ecuaciones 34 y 35.

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^m y_{+ij} \quad (34)$$

En donde S_{+i} corresponde a la suma de los valores de y_{+ij} que son un valor correspondiente a un criterio beneficioso.

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^m y_{-ij} \quad (35)$$

En donde S_{-i} corresponde a la suma de los valores de y_{-ij} que son un valor correspondiente a un criterio no beneficioso.

4. Determinación de Q_i que corresponde a la importancia relativa de las alternativas, esta muestra el grado de satisfacción alcanzada por cada alternativa planteada y se calcula aplicando la ecuación 36.

$$Q_i = S_{+i} + \frac{\sum_{j=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{j=1}^m \frac{1}{S_{-i}}} \quad (36)$$

5. Cálculo del índice de rendimiento U_i aplicando la ecuación 37.

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} \times 100 \quad (37)$$

Donde Q_{max} corresponde al valor mayor, calculado del grupo de importancia relativa de cada alternativa.

6. Establecer el ranking de materiales de acuerdo con el valor de U_i , siendo el numero 1 el que corresponda al valor de $U_i = 100$, seguido de los que correspondan a los valores menores.

Cálculo del factor de seguridad con el material CF20 (Copolíéster reforzado con fibra de carbono)

Según Budynas R. y Keith J. (2009), el factor de seguridad representa la resistencia que interpone un material ante las cargas a las que va a estar sometido. Cuan mayor sea el valor del factor de seguridad más segura será la estructura o elemento mecánico, así cuando el valor de este factor sea 1 indica que el elemento presentará fallas inmediatamente cuando este alcance la carga máxima de diseño y no soportara ninguna

carga adicional, por lo que los factores de seguridad menores a 1 no son aceptables en un diseño.

La determinación del factor de seguridad en este estudio se calcula para demostrar el correcto funcionamiento del impulsor con el material seleccionado mediante el método multicriterio.

Se calculan el esfuerzo de tracción (σ_n), el esfuerzo torsional (ζ_T) y el esfuerzo equivalente aplicando las ecuaciones 10, 11 y 19, para obtener el factor de seguridad aplicando la ecuación 20.

$$\sigma_n = \left(1350 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(366.52 \frac{rad}{s}\right)^2 \left(\frac{(0.0254m)^2}{2} - \frac{(0,0214)^2}{2}\right)$$

$$\sigma_n = 18.93 \text{ KPa}$$

$$\zeta_T = \frac{\left(1350 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(366.52 \frac{rad}{s}\right)^2 (0.0168m)}{1.24 \times 10^{-8} m^4} (1.24 \times 10^{-8} m^4) (0.0254m - 0,0214m)$$

$$\zeta_T = 827.77 \text{ KPa}$$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(18.93 \times 10^3 Pa + 21.96 \times 10^6 Pa)^2 + 3(827 \times 10^3 Pa)^2}$$

$$\sigma_{eq} = 22.02 \text{ MPa}$$

$$FS = \frac{76 \text{ MPa}}{22.02 \text{ MPa}}$$

$$FS = 3.5$$

Fabricación aditiva del prototipo

Para la fabricación del prototipo del material previamente seleccionado mediante la aplicación del método multicriterio MCDM se realizará mediante fabricación aditiva, utilizando una impresora 3D marca PRUSA, cuya ficha técnica se detalla en la tabla 3.

Tabla 3*Ficha técnica de la impresora 3D marca PRUSA*

Superficie de impresión	Chapas de acero magnéticas extraíbles con diferentes acabados superficiales, base calefactable con compensación de rincones fríos
Dimensiones de la impresora (sin carrete)	7 kg, 50×55×40 cm; 19.6×21.6×15.7 in (X×Y×Z)
El consumo de energía	PLA settings: 80W / ABS settings: 120W
Volumen de construcción	25×21×21 cm (9.84"×8.3"×8.3")
Altura de la capa	0.05 - 0.35 mm
Boquilla	Predeterminado de 0,4 mm, admite una amplia gama de otros diámetros/boquillas
Diámetro del filamento	1.75 mm
Materiales compatibles	Amplia gama de termoplásticos, incluidos PLA, PETG, ASA, ABS, PC (policarbonato), CPE, PVA/BVOH, PVB, HIPS, PP (polipropileno), Flex, nGen, Naylon, Relleno de carbono, relleno de madera y otros materiales rellenos.
Velocidad de impresión	200+ mm/s
Temperatura máxima de la boquilla	300 °C / 572 °F
Temperatura máxima de la base calefactable	120 °C / 248 °F
Extrusor	Accionamiento directo, engranajes Bondtech, hotend E3D V6

Nota. Los datos especificados provienen del fabricante de la impresora, tomado de PRUSA (2019).

Los parámetros de impresión se configurarán en el software Ultimaker Cura, este permitirá visualizar el tiempo del proceso de impresión y el material necesario.

Ensayos de corrosión

Ensayos de corrosión del prototipo y el elemento actual del impulsor aplicando la Norma ASTM B117-11 “Standard *Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus*”. Este ensayo permite exponer un material a un ambiente altamente corrosivo, con lo cual

se comparará la corrosión entre los dos materiales del impulsor, el actual vs el material alternativo.

De acuerdo con las recomendaciones de la Norma ASTM B117-11 se realizará el ensayo de corrosión al 5% de NaCl (Cloruro de sodio) y una temperatura de 35°C , con una duración de 48h.

La duración del ensayo se ha establecido de acuerdo con la normativa donde recomienda que los ensayos se realicen con duraciones de múltiplos de 24h, además en uno de los ensayos de prueba redactados en la norma sobre un acero de denominación UNS G10080 se realizan ensayos durante 48h, donde se evidencia pérdida de material evidenciando la afección del material debido a la corrosión.

Uno de los métodos de evaluación del grado de corrosión es el método de pérdida de peso, el cual es un método sencillo que consiste en pesar la muestra antes y después de ser sometida al proceso de corrosión en la cámara de niebla, con lo cual se determina la cantidad de material perdido a causa de la corrosión.

Los ensayos se realizarán en los laboratorios del CIAP (Centro de investigación aplicada a polímeros) de la Escuela Politécnica Nacional, de acuerdo con las especificaciones de este, se prepararon las probetas como se muestra en la figura 15.

Figura 15

Preparación de probetas para el ensayo de corrosión



Resultados

Material actual del impulsor

En el análisis de microestructura como se observa en la figura 16, se puede identificar incrustaciones de carbono formando martensita retenida, además con los resultados obtenidos tanto en fotomicrografías, porcentaje de carbono, dureza y resistencia a la tracción se asemejan los mismos a un material de acero AISI 1018, según la comparación realizada en ASTM Metals Handbook.

Figura 16

Microestructura del material a 500X.



Nota. La figura se obtuvo del informe que puede ser verificado en el ANEXO A

Figura 17

Análisis del porcentaje de perlita y ferrita en el material.



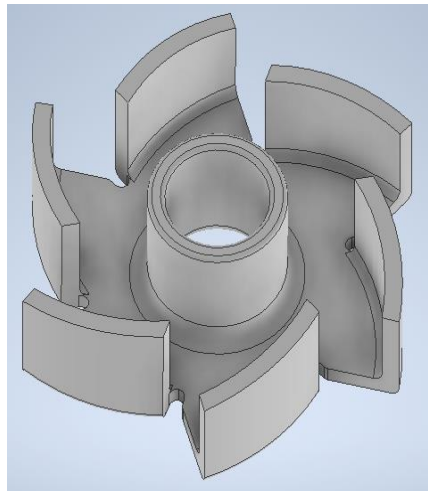
Nota. Utilizando el software facilitado por el fabricante del microscopio se analiza los porcentajes de perlita y ferrita presentes en el material para determinar el tipo de acero al que pertenece.

Diseño CAD

El diseño CAD se ha realizado en el software Inventor, en base a las medidas obtenidas con el uso del calibrador pie de rey, como se identifica en la figura 18.

Figura 18

Diseño CAD del impulsor en estudio



Resultados de triángulos de velocidades

En la Tabla 4, se describen las velocidades resultantes de la resolución de los triángulos de velocidad tanto a la entrada como a la salida del impulsor.

Tabla 4

Componentes de velocidades

ENTRADA			
Ángulos	Velocidad tangencial	Velocidad absoluta	Velocidad relativa
$\beta_1 = 8.66^\circ$ $\alpha_1 = 0^\circ$	$U_1 = 6.96 \frac{m}{s}$	$C_1 = 1.06 \frac{m}{s}$ $C_{1m} = 1.06 \frac{m}{s}$ $C_{1u} = 0 \frac{m}{s}$	$W_1 = 7.04 \frac{m}{s}$
SALIDA			
Ángulos	Velocidad tangencial	Velocidad absoluta	Velocidad relativa
$\beta_2 = 7.39^\circ$ $\alpha_1 = 22.15^\circ$	$U_2 = 9.35 \frac{m}{s}$	$C_2 = 2.44 \frac{m}{s}$ $C_{2m} = 0.92 \frac{m}{s}$ $C_{2u} = 2.26 \frac{m}{s}$	$W_2 = 7.15 \frac{m}{s}$

Resultados de esfuerzos y factor de seguridad con el acero AISI 1018

En la Tabla 5, se describen los esfuerzos y el factor de seguridad del material actual del impulsor.

Tabla 5

Resultados de esfuerzos y factor de seguridad con el MI: Acero AISI 1018

Esfuerzo de tracción (σ_n)	0.101 MPa
Esfuerzo de torsión (ζ_T)	4.83 MPa
Esfuerzo de flexión (σ_f)	21.96 MPa
Esfuerzo equivalente (σ_{eq})	23.59 MPa
Factor de seguridad (FS)	17.4

Prioridades de los criterios de evaluación de los materiales propuestos

En la calculadora de prioridades AHP disponible en línea, se seleccionaron 6 criterios que en este caso pertenecen a las propiedades mecánicas de los materiales siendo estas: módulo de flexión, resistencia a la flexión, resistencia a la tracción, estiramiento, densidad y costo. Posteriormente se realiza una comparación por pares de criterios para determinar prioridades usando el proceso de jerarquía analítica como se observa en la figura 19 y se obtiene el orden jerárquico de los criterios y la matriz de decisiones que será utilizada para los métodos de multicriterio.

Figura 19

Comparaciones de los criterios de evaluación en la Calculadora AHP.

Cuál prefiere A - AHP priorities - o B?		Igual	¿Cuánto más?
1 <input checked="" type="radio"/> Módulo de flexión	<input type="radio"/> Resistencia a la flexión	<input type="radio"/> 1	<input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
2 <input checked="" type="radio"/> Módulo de flexión	<input type="radio"/> Resistencia a la tracción	<input type="radio"/> 1	<input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
3 <input checked="" type="radio"/> Módulo de flexión	<input type="radio"/> Estiramiento	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
4 <input checked="" type="radio"/> Módulo de flexión	<input type="radio"/> Densidad	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
5 <input checked="" type="radio"/> Módulo de flexión	<input type="radio"/> Costo	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
6 <input checked="" type="radio"/> Resistencia a la flexión	<input type="radio"/> Resistencia a la tracción	<input type="radio"/> 1	<input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
7 <input checked="" type="radio"/> Resistencia a la flexión	<input type="radio"/> Estiramiento	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
8 <input checked="" type="radio"/> Resistencia a la flexión	<input type="radio"/> Densidad	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
9 <input checked="" type="radio"/> Resistencia a la flexión	<input type="radio"/> Costo	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input checked="" type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
10 <input checked="" type="radio"/> Resistencia a la tracción	<input type="radio"/> Estiramiento	<input type="radio"/> 1	<input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
11 <input checked="" type="radio"/> Resistencia a la tracción	<input type="radio"/> Densidad	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
12 <input checked="" type="radio"/> Resistencia a la tracción	<input type="radio"/> Costo	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
13 <input checked="" type="radio"/> Estiramiento	<input type="radio"/> Densidad	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input checked="" type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
14 <input checked="" type="radio"/> Estiramiento	<input type="radio"/> Costo	<input type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input checked="" type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9
15 <input checked="" type="radio"/> Densidad	<input type="radio"/> Costo	<input type="radio"/> 1	<input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 <input type="radio"/> 6 <input type="radio"/> 7 <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 9

Nota. Utilizando la calculadora AHP Priorities, se comparan los criterios definiendo la importancia de uno referente al otro en una escala del 1 al 9.

Figura 20

Prioridades de los criterios obtenidos.

Cat		Prioridad	Rank	(+)	(-)
1	Modulo de flexión	34.2%	1	9.2%	9.2%
2	Resistencia a la flexión	24.6%	2	11.8%	11.8%
3	Resistencia a la tracción	20.3%	3	6.1%	6.1%
4	Estiramiento	14.4%	4	6.6%	6.6%
5	Densidad	3.6%	5	1.3%	1.3%
6	Costo	2.8%	6	1.2%	1.2%

Nota. La figura muestra el orden jerárquico de los criterios en base a los pesos resultantes para los criterios basados en sus comparaciones por pares.

Figura 21

Matriz de decisión.

	1	2	3	4	5	6
1	1	2.00	2.00	3.00	8.00	8.00
2	0.50	1	2.00	3.00	5.00	5.00
3	0.50	0.50	1	2.00	8.00	8.00
4	0.33	0.33	0.50	1	7.00	8.00
5	0.12	0.20	0.12	0.14	1	2.00
6	0.12	0.20	0.12	0.12	0.50	1

Nota. Los pesos resultantes se basan en el vector propio principal de la matriz de decisión.

Aplicación de los métodos multicriterio

Los métodos multicriterio se aplicaron con 4 materiales de impresión 3D, evaluados en 6 criterios como se muestra en la tabla 6.

Tabla 6*Materiales usados como alternativas*

Material	Módulo de flexión. (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Resistencia a la tracción. (MPa)	Estiramiento. (%)	Densidad (gr/cm ³)	Precio (USD/g r)
ABS-KEVLAR	1509	44,7	31,1	4,9	1,037	0,22
CF20	6200	110	76	7,5	1,35	0,16
GF30 -PA6	6100	170	102	2,1	1,17	0,94
GF30 -PP	4300	78	60	1,6	0,94	1,17

Nota. Cada material presenta sus características mecánicas y el costo del mismo

Resultados de método TOPSIS

Los métodos multicriterio se aplicaron con 4 materiales de impresión 3D,

Tabla 7*Cálculo de matriz normalizada*

	1	2	3	4	5	6
ABS-KEVLAR	0,15367819	0,201765078	0,21591387	0,524642107	0,456940428	0,144235164
CF20	0,63141472	0,496513614	0,52763518	0,803023634	0,594859766	0,104898301
GF30 -PA6	0,62123061	0,767339222	0,70814195	0,224846617	0,51554513	0,616277518
GF30 -PP	0,43791666	0,35207329	0,41655409	0,171311709	0,414198652	0,767068826

Tabla 8*Cálculo de matriz normalizada ponderada*

	1	2	3	4	5	6
ABS KEVLAR	0,05264787	0,048057308	0,0440515	0,077717541	0,017241653	0,004231811
CF20	0,2163133	0,118261832	0,10764998	0,118955419	0,022445739	0,003077681
GF30 -PA6	0,21282438	0,182768285	0,1444776	0,033307517	0,019452974	0,018081374
GF30 -PP	0,15002374	0,08385839	0,08498682	0,025377156	0,015628885	0,02250554

Tabla 9*Cálculo de máximos y mínimos de la matriz normalizada ponderada*

V+	0,2163133	0,182768285	0,1444776	0,118955419	0,022445739	0,02250554
V-	0,05264787	0,048057308	0,0440515	0,025377156	0,015628885	0,003077681

Tabla 10

Cálculo de la distancia euclidiana desde la mejor idea (Si+) y desde la peor idea (Si-)

	Si+	SI-
ABS KEVLAR	0,23891504	0,05237794
CF20	0,07677759	0,21109992
GF30 -PA6	0,08588519	0,23279087
GF30 -PP	0,16284958	0,11321184

Tabla 11

Cálculo de la puntuación de rendimiento (Pi) y determinación del ranking de los materiales

Material	Pi	Rank
ABS KEVLAR	0,17981189	4
CF20	0,73329772	1
GF30 -PA6	0,73049375	2
GF30 -PP	0,41009656	3

Resultados de método VIKOR

Tabla 12

Cálculo de valores para matriz normalizada

		Módulo de flexión. (MPa)	Resistencia a la flexión. (MPa)	Resistencia a la tracción. (MPa)	Estiramiento. (%)	Densidad (gr/cm ³)	Precio (USD/gr)
suma xi ²	ABS KEVLAR	96417081,0	49082,1	20747,2	87,2	5,2	2,3
raíz(suma xi ²)	CF20	9819,2	221,5	144,0	9,3	2,3	1,5
MAXIMO	GF30 -PA6	6200	170	102	7,5	1,35	1,17
MINIMO	GF30 -PP	1509	44,7	31,1	1,6	0,94	0,16

Tabla 13

Cálculo de valores para matriz normalizada ponderada

	Módulo de flexión. (MPa)	Resistencia a la flexión (MPa)	Resistencia a la tracción. (MPa)	Estiramiento. (%)	Densidad (gr/cm ³)	Precio (USD/gr)
ABS KEVLAR	0,342585146	0,238184469	0,20402351	0,06527956	0,02880579	0,02759671
CF20	0	0,114054814	0,07481821	0	0	0,02933966
GF30 -PA6	0,00730303	0	0	0,13558063	0,01656563	0,00668131
GF30 -PP	0,138757574	0,174884047	0,12086019	0,14813439	0,03773283	0

Tabla 14

Cálculo de la puntuación de rendimiento (Pi) y determinación del ranking de los materiales

Material	Pi	Rank
ABS KEVLAR	0,7961695	4
CF20	0,02083506	1
GF30 -PA6	0,0470962	2
GF30 -PP	0,31480267	3

Resultados de método COPRAS

Tabla 15

Cálculo de matriz normalizada

x11	0,1620	0,0215	0,0492	0,4136	0,2301	0,0021	0,0063	0,4870	0,0011	0,6259	0,0021	0,4529
x12	0,6657	0,0193	0,1210	0,4088	0,5624	0,0020	0,0097	0,7810	0,0014	0,5825	0,0015	0,4509
x13	0,6550	0,0074	0,1870	0,1298	0,7548	0,0024	0,0027	0,1412	0,0012	0,2044	0,0091	1,0599
x14	0,4617	0,0074	0,0858	0,6049	0,4440	0,0023	0,0021	0,5699	0,0010	0,5825	0,0113	0,0123

Tabla 16

Cálculo de valores para matriz normalizada ponderada

X11	0,0555	0,0074	0,0117	0,0985	0,0470	0,0004	0,0009	0,0721	0,0000	0,0236	0,0001	0,0133
X12	0,2281	0,0066	0,0288	0,0974	0,1147	0,0004	0,0014	0,1157	0,0001	0,0220	0,0000	0,0132
X13	0,2244	0,0025	0,0445	0,0309	0,1540	0,0005	0,0004	0,0209	0,0000	0,0077	0,0003	0,0311
X14	0,1582	0,0025	0,0204	0,1441	0,0906	0,0005	0,0003	0,0844	0,0000	0,0220	0,0003	0,0004

Tabla 17

Cálculo de la puntuación de rendimiento (Pi) y determinación del ranking de los materiales

Material	Pi	Ri	Qi	Ui	Rank
ABS KEVLAR	0,1652	0,0000	0,1653	52,5950	4
CF20	0,3142	0,0000	0,3142	100,0000	1
GF30 -PA6	0,2586	0,0000	0,2586	82,3088	2
GF30 -PP	0,2618	0,0000	0,2619	83,3316	3

Comparación de resultados de los métodos multicriterio

Tabla 18

Cálculo de la puntuación de rendimiento (Pi) y determinación del ranking de los materiales

Material	TOPSIS	VIKOR	COPRAS
CF20	1	1	1
ABS KEVLAR	4	4	4
GF30 -PP	3	3	3
GF30 -PA6	2	2	2

De acuerdo con los resultados obtenidos de la aplicación de los métodos multicriterio se identifica que el material alternativo para la fabricación del impulsor de la bomba de agua es el CF20 el cual es un filamento de fibra de carbono, es importante mencionar que este resultado será corroborado con el cálculo del factor de seguridad, las propiedades de este material se especifican en la tabla 19.

Tabla 19

Propiedades del material seleccionado CF20

MATERIAL CF20			
Propiedades Físicas	Unidad	Valor	Método
Densidad	g/cm ³	1,35	ISO 1183
Absorción de humedad	%	-----	
Resistencia a la tracción	MPA	76	ISO 527
Alargamiento a la tracción @ rotura	%	7,5	ISO 527
Fuerza flexible	MPA	110	ISO 178
Módulo de flexión	GPA	6,2	ISO 178
Resistencia al impacto con muescas	kJ/m ²	6	ISO 180
Módulo de Young	GPA	220	ISO 178
Resistencia al impacto sin muescas	kJ/m ²	60	ISO 180
Coefficiente de Poisson		0,25	
Temperatura de impresión 3D recomendada	°C	240-260	----
Temperatura recomendada de la cama	°C	60-70	----
Superficie de la cama	---	modificación Plato de vidrio	----
Ventilador de refrigeración activo	%	50	----
Velocidad de impresión 3D recomendada	mm/s	40 – 70	----

Resultado de los esfuerzos y factor de seguridad del material CF20

A continuación, en la tabla 20 se describen los esfuerzos y el factor de seguridad resultante con el material alternativo CF20.

Tabla 20*Resultados del factor de seguridad y esfuerzos del material CF20*

Esfuerzo de tracción (σ_n)	0.019 MPa
Esfuerzo de torsión (ζ_T)	0.83 MPa
Esfuerzo de flexión (σ_f)	21.96 MPa
Esfuerzo equivalente (σ_{eq})	22.02 MPa
Factor de seguridad (FS)	3.5

Resultado de la fabricación

Los parámetros de impresión como temperaturas y velocidades fueron establecidos de acuerdo con los parámetros recomendados por el fabricante del material CF20 (Anexo B).

La altura de capa establecida es de 0.2 mm, se aplica este valor dado que es una resolución de uso general y se usa en piezas de baja escala como este caso de estudio, con el fin de obtener un tiempo moderado de impresión, dado que en base a este parámetro el tiempo de impresión aumenta mientras la altura de impresión disminuya.

El patrón de relleno usado es tipo rejilla, dado que esta ofrece resistencia mecánica del material al imprimir el material a manera de una cuadrícula (Balda, 2021, p. 16). Además, se considera una densidad de relleno del 100% para obtener una pieza completamente sólida como es el impulsor.

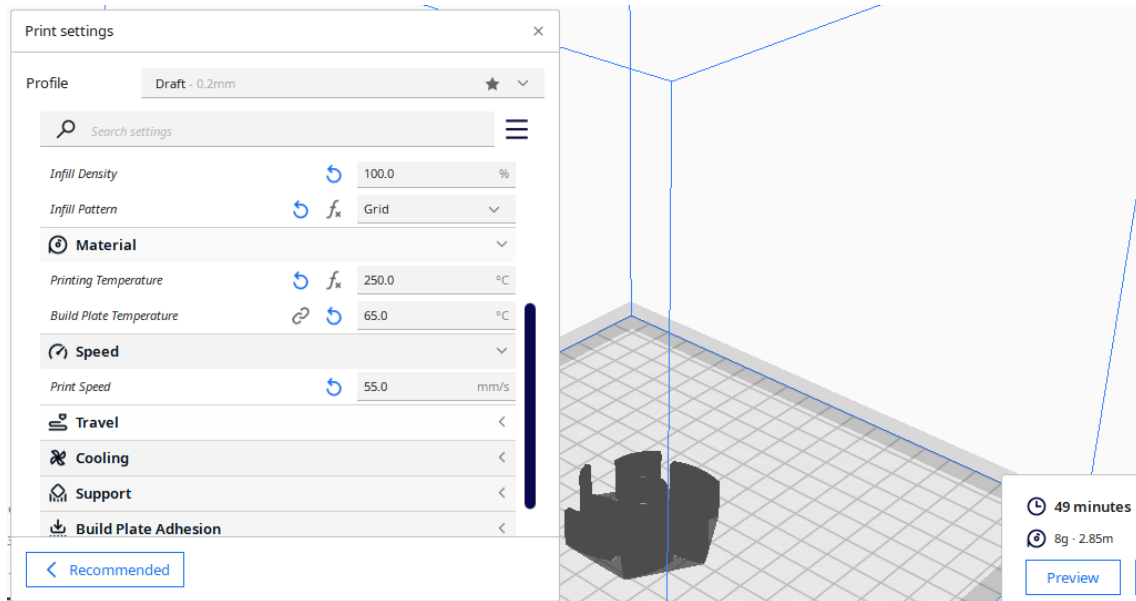
Tabla 21*Resultados del factor de seguridad y esfuerzos del material CF20*

Parámetro	Valor
Temperatura de impresión	250°C
Temperatura de cama	65°C
Velocidad de impresión	55 mm/s
Altura de capa	0.2mm
Patrón de relleno	Rejilla
Densidad del relleno	100%
Ventilador de refrigeración activo	50%
Tiempo de impresión	49min
Material empleado	8gr.

En el software Ultimaker Cura se simuló la impresión del impulsor con los parámetros detallados en la tabla 21, con lo cual se obtiene el tiempo de impresión y la cantidad de material utilizado como se muestra en la figura 22.

Figura 22

Configuración del proceso de impresión 3D en el software Ultimaker Cura



Una vez establecido el tiempo de impresión, cantidad de material se obtienen también los costos del proceso de fabricación del prototipo, información detallada en la tabla 22.

Tabla 22

Configuración del proceso de impresión 3D en el software Ultimaker Cura

Parámetro	Valor
Tiempo de impresión	49min
Material empleado	8gr.
Costo del proceso de impresión	\$4.00
Costo del material empleado	\$2.00
Costo total del prototipo	\$6.00

A continuación, en las figuras 23 y 24 se muestra el proceso de impresión y la pieza final obtenida, la cual no presenta defectos.

Figura 23

Proceso de impresión del material compuesto CF20 (Copoliéster reforzada con fibra de vidrio)

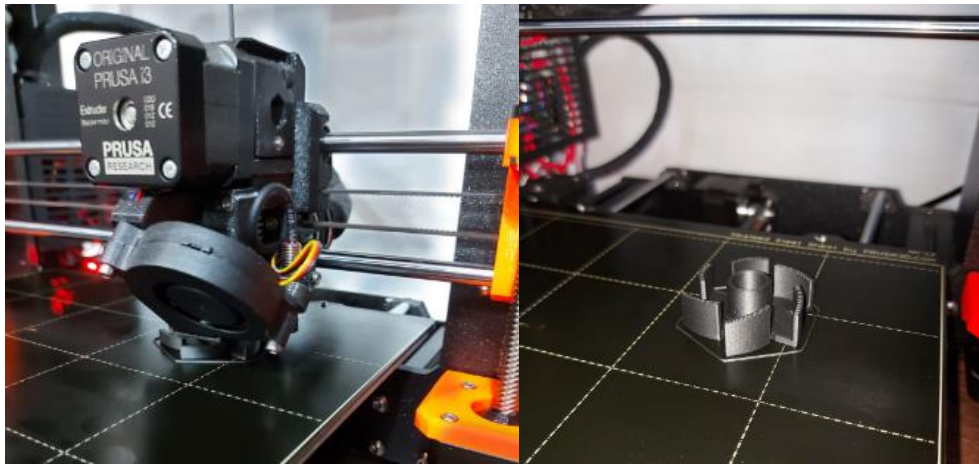


Figura 24

Impulsor fabricado con el material compuesto CF20 (Copoliéster reforzada con fibra de vidrio)







Resultado del ensayo de corrosión

Transcurridas las 48 h de exposición en la cámara salina, se obtuvieron los resultados descritos en la Tabla 23, esta información se obtiene del informe del Anexo 7.

Tabla 23

Resultados del ensayo de corrosión

Ensayos de corrosión	
Material 1: Acero AISI 1018	Material 2: CF20
Condiciones iniciales	Condiciones iniciales
	
	
Observación: Presencia de corrosión (zonas con herrumbre)	Observación: Sin presencia de corrosión, ni cambios aparentes.
Pérdida de masa de las muestras	
Debido a las afecciones presentes en el material se presenta una pérdida de masa de 0.32 gr.	No presenta pérdida de masa

Discusión de resultados

De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente estudio, se han analizado materiales de fabricación 3D óptimos para la fabricación del impulsor de la bomba de agua, siendo el material compuesto CF20 el cual da como resultado un factor de seguridad de 3.5 con lo cual se garantiza el correcto funcionamiento de este elemento mecánico.

Carvill J. (1994), en su libro MECHANICAL ENGINEER`S DATA HANDBOOK especifica factores de seguridad recomendados para algunos componentes mecánicos, como se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24

Factores de seguridad (FS) recomendados para componentes mecánicos

Componente	FS
Calderas	4.5-6
Ejes para volantes, inducidos, etc.	7-9
Husillos del torno	12
Puentes	6
Ruedas de hierro fundido	20
Soldaduras no sujetas a fatiga	3-6
Alabes de turbinas y rotores	3-5

Nota. La tabla se obtuvo del capítulo 8 del libro Mechanical Engineer`s Data Handbook (1994).

Como se indica en la figura 25, el factor de seguridad recomendado para turbinas, alabes y rotores está en un rango de 3-5, el cual comparado con el valor obtenido en este estudio que es un FS=3.5 corresponde al rango recomendado para este tipo de elemento mecánico.

El material alternativo CF20 presenta resistencia a la corrosión, esto en base a los resultados obtenidos en los ensayos de corrosión realizados durante 48h, tiempo en el cual los dos materiales estuvieron expuestos en una cámara de niebla salina. El acero AISI 1018 presentó corrosión y perdido de 0.32 gramos del material, obteniendo resultados

similares a los del estudio de Schmidl & Audelo (2017), quienes en su estudio expusieron en la cámara de niebla salina un Acero 1015 que es un acero dulce similar al del presente estudio.

Con los resultados obtenidos se comprueba la hipótesis planteada al inicio del estudio, demostrando que los materiales compuestos o poliméricos presentan resistencia a la corrosión, con lo cual se puede disminuir el problema presente en el impulsor de la bomba que es el desgaste del mismo a causa de la corrosión.

CONCLUSIONES

- Se propusieron cuatro materiales poliméricos alternativos ABS KEVLAR, CF20, GF30 -PA6, GF30 -PP, los cuales se analizaron mediante la aplicación de los métodos multicriterio (MCM) aplicando el método COPRAS, TOPSIS y VIKOR, en los cuales el ranking de materiales de los tres métodos coincidió que la mejor alternativa era el uso de material CF20.
- El cálculo de esfuerzos en el impulsor permitió obtener el factor de seguridad para los dos materiales en estudio, así el acero AISI 1018 presenta un factor de seguridad de 17.4, mientras que el material compuesto CF20 un factor de seguridad de 3.5 que garantiza el uso de este material es viable.
- El material actual AISI 1018 y el material compuesto CF20 (Copolíéster reforzado con fibra de carbono) se expusieron 48h en una cámara de niebla salina de acuerdo con la Norma ASTM B117-11, al término de esta exposición se evidencian zonas de herrumbres y una pérdida de 0.32 gramos en el acero AISI 1018, mientras que en el material CF20 no presentó afecciones.
- El proceso de manufactura del impulsor para el material CF20 se realizó mediante impresión 3D, obteniendo una pieza de 8gramos en 49 min, siendo este un proceso más accesible, versátil y menos costoso en comparación a la fabricación de la pieza con acero AISI 1018 que se fabrica mediante los procesos de manufactura convencionales como fundición y mecanizado.
- El material compuesto CF20 presenta propiedades mecánicas que garantizan el correcto funcionamiento del impulsor garantizado con un factor de seguridad de 3.5, facilidad de manufactura y además presenta resistencia a la corrosión, lo cual lo hace un material idóneo para la fabricación de esta autoparte.

RECOMENDACIONES

- Considerar las indicaciones de temperaturas y parámetros de impresión sugeridos por el fabricante de los filamentos, dado que de estos parámetros depende la adherencia de las capas del material y por tanto la calidad de impresión de los elementos.
- Exponer a más horas de exposición en la cámara de niebla salina los materiales para tener mejores resultados, las horas de exposición deben ser siempre múltiplos de 24h de acuerdo con las especificaciones de la norma ASTM B117-11.
- Considerar los costos de los materiales y procesos de fabricación, de tal manera que se pueda tener una comparación de viabilidad de fabricación del elemento mecánico con el costo de adquisición actual.

Referencias bibliográficas

- Farfán, J. C., & Sarmiento, P. P. (2015). *Estudio para la desagregación tecnológica en un vehículo automotor tipo Sedán Chevrolet Sail*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7896>
- Tan, L. J., Zhu, W., & Zhou, K. (2020). Recent Progress on Polymer Materials for Additive Manufacturing. *Advanced Functional Materials*, 30(43), 1–54. <https://doi.org/10.1002/adfm.202003062>
- Molina, R. (2019). Universidad Internacional SEK. *Panorama*, 5–20.
- Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 20, 44–67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
- Brioso, C. (2016). *Fabricación y caracterización de piezas de material compuesto realizadas en impresora 3D*. 97.
- Wang, X., Jiang, M., Zhou, Z., Gou, J., & Hui, D. (2017). 3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective. *Composites Part B: Engineering*, 110, 442–458. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.11.034>
- Romero Piedrahita, C., & Carranza Sánchez, Y. (2007). Elementos de diseño de sistemas de enfriamiento de motores de combustión interna. *Scientia Et Technica*, XIII (34), 261–266. <https://doi.org/10.22517/23447214.5605>
- Yang, Y., Li, W., Shi, W., Zhou, L., & Zhang, W. (2020). Experimental Study on the Unsteady Characteristics and the Impact Performance of a High-Pressure Submerged Cavitation Jet. *Shock and Vibration*, 2020. <https://doi.org/10.1155/2020/1701843>
- Li, W., Ji, L., Ma, L., Yang, Y., Zhou, L., & Agarwal, R. K. (2020). Numerical and experimental study of variable speed automobile engine cooling water pump. *Science Progress*, 103(2), 1–27. <https://doi.org/10.1177/0036850420925227>
- Li, W., Li, E., Shi, W., Li, W., & Xu, X. (2020). Numerical simulation of cavitation performance in engine cooling water pump based on a corrected cavitation model. *Processes*, 8(3), 1–19. <https://doi.org/10.3390/pr8030278>
- Romero, C. A., Torregrosa, A., Olmeda, P., & Martin, J. (2014). Energy balance during the warm-up of a diesel engine. *SAE Technical Papers*, 1. <https://doi.org/10.4271/2014-01-0676>
- Schmiedl, E., & Audelo F. (2017). *Diseño y construcción de una cámara de niebla salina mediante la norma ASTM B-117 para ensayos de corrosión para la carrera de ingeniería química de la ESPOCH*. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO, Facultad de Ciencias, Carrera Ingeniería química.
- Montalvo, L. (2019). *Análisis y optimización en el diseño mediante CFD de la bomba centrífuga del sistema de refrigeración del motor kubota V3307, para fabricación nacional del elemento*. UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, Facultad de Arquitectura e Ingeniería, Maestría en Diseño Mecánico.

Adiaconitei, A., Vintila, I. S., Mihalache, R., Paraschiv, A., Frigioescu, T., Vladut, M., & Pambaguian, L. (2021). A study on using the additive manufacturing process for the development of a closed pump impeller for mechanically pumped fluid loop systems. *Materials*, *14*(4), 1–17. <https://doi.org/10.3390/ma14040967>

Pavlovic, A., Sljivic, M., Kraisnik, M., Ilic, J., & Anic, J. (2017). Polymers in additive manufacturing: The case of a water pump impeller. *FME Transactions*, *45*(3), 354–359. <https://doi.org/10.5937/fmet1703354P>

Fernandez, S., Jimenez, M., Porras, J., Romero, L., Espinosa, M. M., & Dominguez, M. (2016). Additive manufacturing and performance of functional hydraulic pump impellers in fused deposition modeling technology. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, *138*(2). <https://doi.org/10.1115/1.4032089>

Zhou, H., & Zhao, G. (2021). Error analysis and process parameter optimization of impeller model manufactured by FDM process. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *693*(1), 0–6. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/693/1/012069>

Carvill, J. (1994). *Mechanical Engineer`s Data Handbook*. ScienceDirect. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-24207-3>

Balda, R. (2021, febrero 28). *Tipos de infill:Cuál es el mejor relleno para tus impresiones*. <https://www.radlab.com.ec/blog/tipos-de-infill-cual-es-el-mejor-relleno-para-tus/>

ANEXOS

ANEXO 1

Ensayo metalográfico del impulsor



CENTRO DE TRANSFERENCIA Y TECNOLOGÍA FACULTAD INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA - UEA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA

INGENIERÍA MECÁNICA

ENSAYO METALGRÁFICO

Febrero 2022

AMBATO – ECUADOR



		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA Laboratorio - Ingeniería Mecánica			
ENSAYO METALOGRAFÍA					
DATOS INFORMATIVOS					
Tipo de estudio:		De laboratorio		Orden No: 025	
Identificación del componente de estudio:		IMPULSOR DE BOMBA DE VEHÍCULO			
Solicitado por:		ERIKA SILVA		Fecha: 26/02/2022	
Centro de Estudio y Análisis:		Laboratorio de Metalografía - FICM			
PARÁMETROS					
Equipo:		Microscopio Metalográfico	Marca:	RADICAL®	Modelo: RMM-1
		Temperatura Ambiente:	Magnificación:	Filtro:	Iluminación:
		18.00 °C	50-500X	4 colores	Luz fluorescente
PARÁMETROS DEL ENSAYO METALOGRAFICO					
Acondicionamiento de la superficie:			Pulido Mecánico		
Temperatura durante el pulido:		19 °C	Superficie preparada en:	Lijas: 240, 320, 400, 600, 1000, 1500, 2000	
Ataque Químico de la superficie		Nital 4	Durante:	3 segundos	
FOTOGRAFÍAS DE LA MUESTRA RECIBIDA					



CENTRO DE TRANSFERENCIA Y TECNOLOGÍA FICM (M. INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA - UTA)



IMPULSOR DE BOMBA DE VEHÍCULO

Resultados metalografía por probeta:



100X

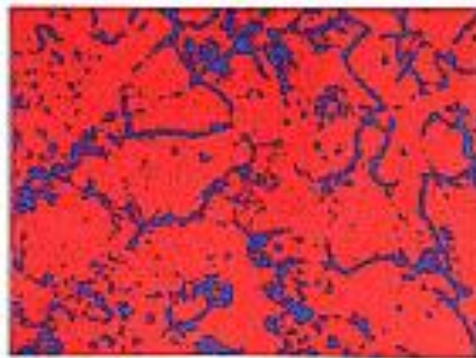


200X

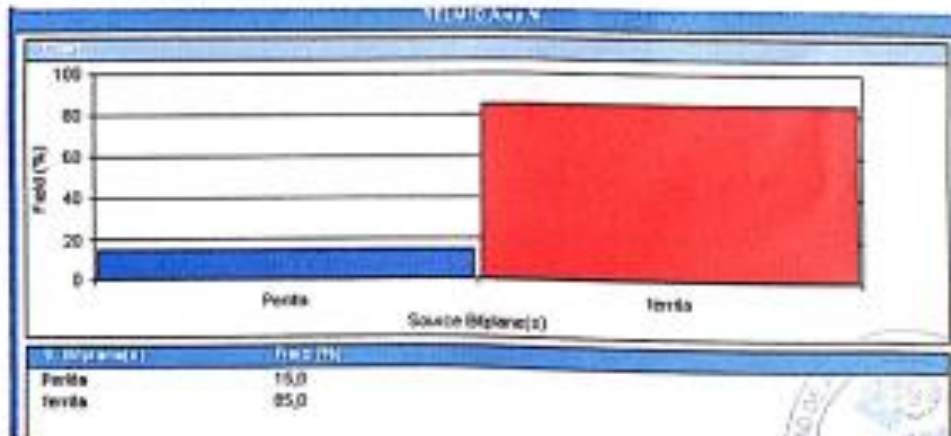


500X

- Análisis mediante Software



- Porcentaje de las fases presentes en la microestructura



- Porcentaje de carbono





CENTRO DE TRANSFERENCIA Y TECNOLOGÍA FACULTAD INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA - U.T.A.



$$\%C = \frac{\%P}{130}$$

$$\%C = \frac{15}{130}$$

$$\%C = 0,12$$

- Dureza

$$HB = \%P(HB \text{ Perlita}) + \%F(HB \text{ Ferrita})$$

$$HB = (0,15)(240) + (0,85)(90)$$

$$HB = 112,50 \text{ HB}$$

- Resistencia a la Tracción

$$\sigma_u = 500 \text{ HB (psi)}$$

$$\sigma_u = 500 (112,50) \text{ (psi)}$$

$$\sigma_u = 56,25 \text{ kpsi}$$

Resultados:

En el análisis microestructural se puede identificar incrustaciones de carbono formando martensita retenida; además con los resultados obtenidos tanto en fotomicrografías, porcentaje de carbono, dureza y resistencia a la tracción se asemejan los mismos a un material de acero AISI 1018, según la comparación realizada en ASTM Metals Handbook.

- Acero AISI 1018 tomada de Metals Handbook.



Ing. Sebastián Villegas S.
Técnico de laboratorio U.T.A.



Egdo. Daniel Coquinche A.
Auxiliar de laboratorio U.T.A.



ANEXO 2*Datos técnicos del material Acero AISI 1018*

ACERO AISI-SAE 1018 (UNS G10180)

1. Descripción: este acero de bajo - medio carbono tiene buena soldabilidad y ligeramente mejor maquinabilidad que los aceros con grados menores de carbono. Se presenta en condición de calibrado (acabado en frío). Debido a su alta tenacidad y baja resistencia mecánica es adecuado para componentes de maquinaria.

2. Normas involucradas: ASTM A 108

3. Propiedades mecánicas: Dureza 126 HB (71 HRb)
 Esfuerzo de fluencia 370 MPa (53700 PSI)
 Esfuerzo máximo 440 MPa (63800 PSI)
 Elongación máxima 15% (en 50 mm)
 Reducción de área 40%
 Modulo de elasticidad 205 GPa (29700 KSI)
 Maquinabilidad 76% (AISI 1212 = 100%)

4. Propiedades físicas: Densidad 7.87 g/cm³ (0.284 lb/in³)

5. Propiedades químicas: 0.15 – 0.20 % C
 0.60 – 0.90 % Mn
 0.04 % P máx
 0.05 % S máx

6. Usos: se utiliza en operaciones de deformación plástica como remachado y extrusión. Se utiliza también en componentes de maquinaria debido a su facilidad para conformarlo y soldarlo. Piezas típicas son los pines, cuñas, remaches, rodillos, piñones, pasadores, tornillos y aplicaciones de lámina

ANEXO 3*Datos técnicos del material CF-20 (Copolíéster reforzada con fibra de carbono)***Technical datasheet****colorFabb XT-CF20**Date of issue: August 17, 2017
Version: v1.0

ColorFabb XT-CF20 is a high quality Amphora copolyester based 3D printing filament, loaded with 20% carbon fibers, perfect for parts needing high stiffness. ColorFabb XT-CF20 has a beautiful matte surface finish when printed.

TYPICAL MATERIAL PROPERTIES

Physical properties	Unit	Value	Method
Density	g/cm ³	1,35	ISO 1183
Humidity absorption (23°C, 50%RH)	%	---	
Tensile Strength	MPa	76	ISO 527
Tensile Elongation@break	%	7,5	ISO 527
Flexural Strength	MPa	110	ISO 178
Flexural Modulus	GPa	6,2	ISO 178
Izod impact strength, notched	kJ/m ²	6	ISO 180
Izod impact strength, unnotched	kJ/m ²	60	ISO 180

FILAMENT SPECIFICATION

Nominal diameter:	Diameter tolerance	Ovality
1,75 mm	± 0,05	≥ 95%
2,85 mm	± 0,05	≥ 95%

Netto filament weight 750 grams / 2200 grams

GUIDELINE FOR PRINT SETTINGS

Advised 3D printing temperature	240 – 260 °C
Advised bed temperature	60 – 70 °C
Bed surface / modification	Glass plate
Active cooling fan	50%
Advised 3D printing speed	40 – 70 mm/sec

ADDITIONAL INFORMATION

A special point of attention is the abrasive nature of the carbon fibers. In general these fibers will accelerate the nozzle-wear of brass nozzles, much faster than unfilled filaments. Therefore colorFabb recommends to use nozzle's from Stainless steel or hardened copper alloys

ANEXO 4

Datos técnicos del material GF30-PP (Propileno reforzado con fibra de vidrio)

Propiedades Físicas	SISTEMA MÉTRICO	SISTEMA IMPERIAL	ESTÁNDAR
Densidad	0.94 g/cm ³	7.85 lbs/gal	ISO 1183-A
Absorción de Humedad	Muy Bajo (<0.1%)	Muy Bajo (<0.1%)	ISO 62 23°C/50% RH
Absorción de Agua	Muy Bajo (<0.1%)	Muy Bajo (<0.1%)	ISO 62 23°C/Sat
Color	Negro		

Propiedades Mecánicas	SISTEMA MÉTRICO	SISTEMA IMPERIAL	ESTÁNDAR
Módulo de Elasticidad	6,500 MPa	943 ksi	ISO 527 1mm/min (0.04 inch/min)
Resistencia a la Tracción (rendimiento)	60 MPa	8,700 psi	ISO 527 1mm/min (0.04 inch/min)
Resistencia a la Tracción (rotura)	60 MPa	8,700 psi	ISO 527 1mm/min (0.04 inch/min)
Estramiento (rotura)	1.6%	1.6%	ISO 527 1mm/min (0.04 inch/min)
Módulo de Flexión	4,300 MPa	624 ksi	ISO 178 2 mm/min (0.08 inch/min)
Resistencia a la Flexión (rendimiento)	83 MPa	12,000 psi	ISO 178 2 mm/min (0.08 inch/min)
Resistencia a la Flexión (rotura)	78 MPa	11,300 psi	ISO 178 2 mm/min (0.08 inch/min)

Propiedades Térmicas	SISTEMA MÉTRICO	SISTEMA IMPERIAL	ESTÁNDAR
Temperatura de Deformación Térmica	120°C	248°F	ISO 75 Metodo A (1.8 MPa)
Punto de Fusión	187°C	333°F	ISO 11357
Temperatura de Transición Vítrea	-20°C	-4°F	DSC ISO 11357

Ajustes de la Impresora	SISTEMA MÉTRICO	SISTEMA IMPERIAL
Temperatura de la Boquilla	220°C - 280°C	428°F - 536°C
Temperatura de la Placa de Impresión	80°C - 110°C	176°F - 230°C
Velocidad de Impresión	30-60mm/s	-
Diámetro de la Boquilla	>0.4mm	-
Tipo de Placa Recomendada	Placa perforada – hoja HDPE – adhesivo PP – pegamento PP (Wolfbite®, Magigoo®, ...)	

ANEXO 5

Datos técnicos del material GF30-PA6 (Poliamida 6 reforzado con fibra de vidrio)

MATERIAL DATASHEET

Physical Properties	Metric	Imperial	Standard
Density	1,17 g/cm ³	9,76 lbs/gal	ISO 1183-A
Moisture Absorption	0,58 %	0,58 %	ISO 62 23 °C / 50% RH
Water Absorption	9,62 %	9,62 %	ISO 62 23 °C / Sat

Mechanical Properties	Metric	Imperial	Standard
Tensile Modulus	7 400 MPa	1,074 ksi	ISO 527 1 mm/min (0.04 inch/min)
Tensile Strength (Yield)	102 MPa	14,800 psi	ISO 527 1 mm/min (0.04 inch/min)
Tensile Strength (Break)	102 MPa	14,800 psi	ISO 527 1 mm/min (0.04 inch/min)
Elongation (Break)	2.1 %	2.1 %	ISO 527 1 mm/min (0.04 inch/min)
Flexural Modulus	6 100 MPa	880 ksi	ISO 178 2 mm/min (0.08 inch/min)
Flexural Strength (Yield)	170 MPa	24,600 psi	ISO 178 2 mm/min (0.08 inch/min)
Flexural Strength (Break)	166 MPa	24,100 psi	ISO 178 2 mm/min (0.08 inch/min)

Thermal Properties	Metric	Imperial	Standard
Heat Deflection Temperature	124 °C	255 °F	ISO 75 Method A (1.8 MPa)
Melting Temperature	206 °C	403 °F	ISO 11357

Copyright © 2018 Owens Corning. All Rights Reserved.

Printer Settings	Nozzle	Bed	Recommended Bed Type
Temperature	220 °C - 280 °C	80 °C - 110 °C	1) Perforated bed 2) PEI flat plate
Printing speed	30-100 mm/s	-	3) PI (Kapton) adhesive
Nozzle diameter	> 0.4 mm	-	

PACKAGING

Thermal Properties	Metric	Imperial	Standard
Filament diameter	1,75 mm / 2,85 mm	0,069 inch / 0,112 inch	+/- 0,05 mm
Material weight	500 g / 2200 g	1.1 lbs / 4.85 lbs	Net weight
Spool (500g / 1.1lbs)	200 / 52 / 55 mm	7.9 / 2.0 / 2.2 inch	Øext / Øint / width
Spool (2200g / 4.85 lbs)	300 / 52 / 102 mm	11.8 / 2.0 / 4.0 inch	Øext / Øint / width

DESCRIPTION

Developed by Owens Corning, a world leader in composite solutions, XSTRAND™ GF30-PA6 filament for 3D printing is a reinforced material designed to be compatible with any standard Fused Filament Fabrication 3D printer (1.75 and 2.85 mm diameters available).

BENEFITS

- Very high stiffness and strength (up to +250% compare to ABS)
- Large operational temperature range (-20°C to 120°C)
- Good chemical and UV resistance
- High wear resistance
- Excellent layer adhesion
- Reduced warping effect compared to neat PA6

POTENTIAL APPLICATIONS

XSTRAND™ GF30-PA6 is designed for functional prototyping and demanding applications such as industrial tooling, transportation, electronics, small appliances, sports & leisure...

ANEXO 6

Datos técnicos del material ABS- Kevlar (ABS reforzado con fibra de kevlar)

ABS KEVLAR has been designed for 3D printing by a precise formulation of aramid fibers into ABS materials

**| NO SHRINKAGE | LOW WARPING
| SMOOTH SURFACE | LIGHT WEIGHT OBJECTS**

FILAMENT PROPERTIES

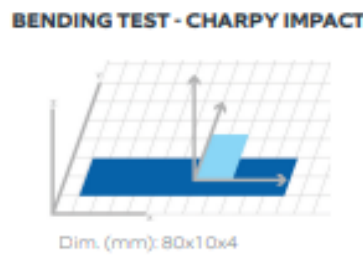
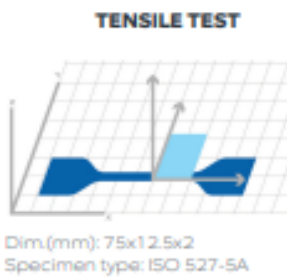
DESCRIPTION	TEST METHODS	UNITS	VALUES
Diameter	INS-6712	mm	1.75 ± 0.1 2.85 ± 0.1
Density	ISO 1183	g/cm3	1.037
Humidity rate	INS-6711	ppm	< 10,000
MFI	ISO 1133	g/10min	14.8
Glass temperature tg	ISO 11357 DSC (10°C/min - 20 à 220°C)	°C	100
Melting temperature tf	ISO 11357 DSC (10°C/min - 20 à 220°C)	°C	n/a



PRINT PARAMETERS AND SPECIMENS DIMENSIONS

PRINT AXIS	XY
PRINT SPEED	50 mm/s
INFILL	100% - rectilinear
INFILL ANGLE	45°/-45°
EXTRUSION TEMPERATURE	260°C
PLATFORM TEMPERATURE	100°C

RESULTS



PRINTED SPECIMENS PROPERTIES

	PROPERTIES	TEST METHODS	UNITS	VALUES
TENSILE TEST	Tensile modulus	ISO 527	MPa	1,775
	Tensile strength	ISO 527	MPa	31.1
	Elongation @tensile strength	ISO 527	%	2.3
	Tensile stress @break	ISO 527	MPa	27.7
	Tensile elongation @break	ISO 527	%	4.9
BENDING TEST	Flexural modulus	ISO 178	MPa	1,509
	Flexural stress @3.5%	ISO 178	MPa	44.7
	Deformation @flexural strength	ISO 178	%	>5*
CHARPY IMPACT	Charpy impact strength (notched type A)	ISO 179	kJ/m ²	8.86
HARDNESS	Hardness	ISO 868	Shore D	65.2

*According to ISO 178 and if the test at 50% deformation even if there is no maximum force

ANEXO 7*Informe de ensayos de corrosión*

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
 DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA
 CENTRO DE INVESTIGACIONES APLICADAS A POLÍMEROS

**INFORME DE RESULTADOS**

DC-OT0055-2022

DATOS GENERALES**Tabla 1. Identificación y descripción de los ítems de ensayo**

No.	ID MUESTRA	MUESTRA	DESCRIPCIÓN	SERVICIO
1	DC-MU7894	MI ACERO AISI 1018	PIEZA METÁLICA SIN RECURRIMIENTO	• 48 HORAS DE EXPOSICIÓN EN CÁMARA SALINA
2	DC-MU7895	POLIESTER MÁS FIBRA DE CARBONO	PIEZA PLÁSTICA COLOR NEGRO	
OBSERVACIONES:			N/A	

SERVICIO: 48 HORAS DE EXPOSICIÓN EN CÁMARA SALINA**1. EQUIPAMIENTO**

- Cámara de niebla salina, Marca: Q-LAB, Modelo: QFOG-CCT600

2. PARÁMETROS DEL ENSAYO**Tabla 2. Condiciones y parámetros de ensayo de exposición en cámara salina para las muestras DC-MU7894 y DC-MU7895**

FECHA DE INICIO DE ENSAYO:	11-07-2022
FECHA DE FIN DE ENSAYO:	15-07-2022
CONDICIONES DE ENSAYO:	<ul style="list-style-type: none"> • 24 horas de niebla salina. • Solución salina: 5% (p/p) de NaCl.
CONDICIONES ESPECIALES:	N/A



3. RESULTADOS

Tabla 3. Resultados del ensayo de exposición en cámara salina para las muestras DC-MU7894 y DC-MU7895

ID MUESTRA	PATRÓN	48 HORAS DE EXPOSICIÓN EN CÁMARA SALINA
DC-MU7894		
	OBSERVACIONES	
	COLOR	Presencia de corrosión (zonas con herrumbre)
	COMENTARIOS	
La muestra DC-MU7894, en términos macroscópicos generales, ha cambiado su aspecto.		
DC-MU7895		
	OBSERVACIONES	
	COLOR	Sin cambio aparente
	COMENTARIOS	
La muestra DC-MU7895, en términos macroscópicos generales, no ha cambiado su aspecto.		



ALCANCE A INFORME DE RESULTADOS
DC-OT0055-2022

DATOS GENERALES

Tabla 1. Identificación y descripción de los ítems de ensayo

OBSERVACIONES:	<ul style="list-style-type: none"> • A petición del cliente las muestras DC-MU7894 y DC-MU7895 identificadas inicialmente como "MI ACERO AISI 1018" y "POLIESTER MÁS FIBRA DE CARBONO", respectivamente, fueron renombradas de la siguiente manera: <ul style="list-style-type: none"> ○ Muestra DC-MU7894 - ACERO AISI 1018 ○ Muestra DC-MU7895 - COPOLIESTER MÁS FIBRA DE CARBONO
-----------------------	---

SERVICIO: 48 HORAS DE EXPOSICIÓN EN CÁMARA SALINA

1. PARÁMETROS DEL ENSAYO

Tabla 2. Condiciones y parámetros de ensayo de exposición en cámara salina para las muestras DC-MU7894 y DC-MU7895

CONDICIONES DE ENSAYO:	<ul style="list-style-type: none"> • Ciclos de 24 horas de inmersión salina. • Solución salina: 5% (p/p) de NaCl.
-------------------------------	---

2. RESULTADOS

Tabla 3. Resultados del ensayo de exposición en cámara salina para las muestras DC-MU7894 y DC-MU7895

ID MUESTRA	COMENTARIOS
DC-MU7894	Se registró pérdida de masa en la muestra de 21,71 a 21,39 gramos.
DC-MU7895	No se registró pérdida de masa en la muestra.



ALEX DARRIO
AGUILAR
ASIMBATA

Ing. Alex Aguilar
PROFESIONAL RESPONSABLE DEL
ANÁLISIS



LADINO
VLADIMIR
VALLE ALVAREZ

Ing. Vladimir Valle M.Sc.
AUTORIDAD AUTENTICADORA