



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE HIDALGO

ESCUELA SUPERIOR DE CIUDAD SAHAGÚN

**MAESTRÍA EN GESTIÓN Y DESARROLLO DE NUEVAS
TECNOLOGÍAS**

TESIS

**DISEÑO Y MANUFACTURA DE UN SOPLADOR
CENTRÍFUGO PARA HORNOS DE COMBUSTIÓN AIRE-GAS**

Para obtener el título de Maestro en Gestión y Desarrollo de Nuevas Tecnologías

PRESENTA

Ing. Rodrigo Cruz Trejo

Director

Dr. Carlos Ernesto Borja Soto

Codirector

Dr. Jorge Zuno Silva

Comité tutorial

Dra. Francisca Santana Robles

Dr. Justo Fabián Montiel Hernández

Dr. Rafael Granillo Macías

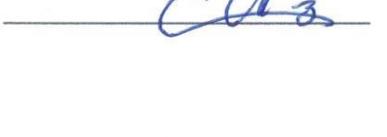
Cd. Sahagún, Hgo., a 22 de abril 2024.



MTRA. OJUKY DEL ROCÍO ISLAS MALDONADO
 DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
 PRESENTE

Por medio de la presente, le informo que en virtud de haber cumplido las modificaciones y correcciones que el grupo de sinodales realizó a la tesis **“Diseño y manufactura de un soplador centrífugo para hornos de combustión aire-gas”**, presentada por el Ing. Rodrigo Cruz Trejo, con matrícula 268385, de la Maestría en Gestión y Desarrollo de Nuevas Tecnologías, se ha decidido en reunión de sinodales autorizar la impresión de dicha tesis.

A continuación, se anotan las firmas de conformidad de los integrantes del jurado:

PRESIDENTE	Dr. Rafael Granillo Macías	
PRIMER VOCAL	Dr. Carlos Ernesto Borja Soto	
SEGUNDO VOCAL	Dr. Jorge Zuno Silva	
TERCER VOCAL	Dr. Justo Fabián Montiel Hernández	
SECRETARIA	Dra. Francisca Santana Robles	
PRIMER SUPLENTE	Dr. Isidro Jesús González Hernández	

Sin más por el momento, reitero a usted mi atenta consideración.

ATENTAMENTE
 “AMOR, ORDEN Y PROGRESO”
 Cd. Sahagún, Hgo., a 22 de abril de 2024.

DRA. SULY SENDY PÉREZ CASTAÑEDA
 COORDINADORA
 MAestría EN GESTIÓN Y DESARROLLO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS

c.c.p.- Archivo.

Carretera Otumba-Cd. Sahagún, No. 7,
 Colonia Legaspi, Zona Industrial, Cd. Sahagún,
 Hidalgo, C.P. 43998.
 Teléfono: 771 71 720 00 Ext. 5300
 essahagun@uaeh.edu.mx



DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mi familia, a quien expreso mi más profundo amor y agradecimiento por el apoyo que me han brindado. Gracias a ustedes, he podido cumplir mis sueños profesionales y personales, también he adquirido nuevos conocimientos y habilidades que me ayudarán a crecer en mi vida profesional. Sé que no ha sido fácil para ninguno de nosotros, que hemos tenido que hacer sacrificios y adaptarnos a las circunstancias, pero también sé que siempre han estado ahí para mí, animándome, consolándome, orientándome y celebrando conmigo cada logro. Sin su amor, sin su confianza y sin su comprensión, nada de esto hubiera sido posible.

Hoy me siento muy orgulloso de haber terminado esta etapa tan importante de mi vida, pero más aún de tener una familia tan maravillosa como ustedes.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a los directores de tesis: Dr. Carlos Ernesto Borja Soto y Dr. Jorge Zuno Silva, quienes realizaron las observaciones y recomendaciones para el mejoramiento del presente trabajo de tesis de la Maestría en Gestión y Desarrollo de Nuevas Tecnologías. Su orientación, conocimiento y experiencia fueron fundamentales para la realización de este trabajo académico, que representa un logro importante en mi formación profesional. Gracias a su paciencia, dedicación y compromiso, pude superar los retos y dificultades que se presentaron en el proceso de investigación. Asimismo, le agradezco por compartir conmigo sus conocimientos y perspectivas sobre el campo de las nuevas tecnologías, que enriquecieron mi visión y motivación. Ha sido un honor y un privilegio trabajar con ustedes. Espero poder seguir colaborando en futuros proyectos. Les envío un cordial saludo y reitero mi gratitud y respeto.

Gracias a la coordinadora de la Maestría en Gestión y Desarrollo de Nuevas Tecnologías, de la Escuela Superior de Ciudad Sahagún, Dra. Suly Sedy Pérez Castañeda, por el apoyo que me otorgó respecto a temas académicos y trámites administrativos.

Agradezco al Lic. Edmundo Espinoza Bravo por la revisión y observaciones realizadas a la sección del resumen en los idiomas español e inglés.

Agradezco a todos mis amigos por el apoyo que me han brindado durante esta etapa formativa. Ha sido un camino lleno de desafíos, aprendizajes y satisfacciones, que no hubiera podido recorrer sin su compañía y sin su aliento. Gracias por estar siempre presentes, por escucharme, por aconsejarme, por

celebrar mis logros y por consolarme en los momentos difíciles. Gracias por ser mi familia elegida, por compartir conmigo sus experiencias, sus conocimientos y sus sueños. Gracias por creer en mí y en mi proyecto de vida.

Se culmina una etapa muy importante de mi formación académica y profesional, pero también de mi crecimiento personal. Sé que ustedes han sido parte fundamental de este proceso, por eso, les dedico este título con mucho cariño y orgullo, porque es también el resultado de su amistad y su generosidad.

Gracias a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por la oportunidad que me brindó para cursar la Maestría en Gestión e Innovación de Nuevas Tecnologías. Esta experiencia ha sido muy enriquecedora para mi formación académica y profesional, así como para mi desarrollo personal. Por medio de la enseñanza de los profesores, los compañeros y el personal administrativo que me han acompañado a lo largo de este proceso. He adquirido conocimientos, habilidades y competencias que me permitirán afrontar los retos y las oportunidades que se presenten en el ámbito laboral y social. Me siento muy orgulloso de formar parte de esta prestigiosa institución que se distingue por su calidad educativa, su compromiso social y su visión de futuro.

Finalmente, agradezco al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (Conahcyt) por brindarme su apoyo mediante la beca de postgrado 820379, la cual ha sido de gran ayuda para que pudiese cursar y concluir con éxito la Maestría en la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Espero contribuir y seguir contribuyendo en la generación de conocimiento y desarrollo del país, mediante la aplicación de la ciencia y la tecnología.

INDICE GENERAL

	Pág.
Resumen	10
Abstract	11
CAPÍTULO 1. CONSTRUCCIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO	12
1.1 Introducción	12
1.2 Antecedentes del problema.....	12
1.3 Planteamiento del problema.....	13
1.4 Justificación	13
1.5 Objetivos de investigación	14
1.6 Preguntas de investigación	14
1.7 Hipótesis	15
1.8 Delimitación y alcance	15
1.9 Plan metodológico	16
1.10 Variables de investigación	17
1.11 Tipo de investigación	17
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	18
2.1. Definición del soplador	18
2.2. Fundamentos de mecánica de fluidos	28
2.3. Proceso de manufactura	40
2.4. Clasificación de procesos de manufactura.....	41
2.5. Tipos de materiales	43
2.6. Aluminio y sus aleaciones.....	45
2.7. Procesos de fundición de metales y aleaciones	47
2.8. Procesos de remoción de material	54
2.9. Herramientas computacionales para la simulación numérica de procesos de manufactura	59
2.10. Manufactura aditiva	61
CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN	66
CAPÍTULO 4. RESULTADOS	70
4.1. Diseño mecánico del soplador.....	70
4.2. Simulación numérica del proceso de colada	72
4.3. Manufactura de los rotores del soplador	73
4.4. Elaboración de los moldes de fundición	74
4.5. Fundición del molde de arena	78
4.6. Maquinado de las piezas fundidas	84
4.7. Medición de flujos volumétricos	87
4.8. Comparativo de resultados	106
CONCLUSIONES	110
Referencias	112

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1 Soplador de desplazamiento positivo	19
Figura 2.2 Soplador regenerativo	20
Figura 2.3 Soplador centrifugo	21
Figura 2.4 Esquema del proceso de transporte neumático	22
Figura 2.5 Esquema del proceso de desgasificación	23
Figura 2.6 Esquema del proceso de fluidización	24
Figura 2.7 Tipos de izaje. a) izaje horizontal, b) izaje vertical	25
Figura 2.8 Sistema de distribución de fluidos con variaciones de área y velocidad	34
Figura 2.9 Flujo de diseño y simulación CFD tradicional	38
Figura 2.10 Flujo de diseño y simulación CFD mejorado con carga frontal	38
Figura 2.11 Clasificación de los procesos de manufactura	42
Figura 2.12 Clasificación de los materiales	44
Figura 2.13 Procedimiento de elaboración	52
Figura 2.14 Clasificación de las arenas naturales	54
Figura 3.1 Diagrama de flujo	66
Figura 4.1 Consideraciones elementales para el diseño de un soplador	70
Figura 4.2 Curvaturas de las paletas en los rotores del soplador	71
Figura 4.3 Diseño de piezas y ensamble del soplador	71
Figura 4.4 Llenado del molde por aluminio líquido	72
Figura 4.5 Simulación numérica del proceso de solidificación	73
Figura 4.6 Impresión del modelo 3D	74
Figura 4.7 Modelos impresos	74
Figura 4.8 Preparación de la primera parte del molde	75
Figura 4.9 Preparación de la segunda parte del molde	76
Figura 4.10 Acabado de la segunda parte del molde	77
Figura 4.11 Obtención del negativo de la primera parte del molde	77
Figura 4.12 Horno de fundición	78
Figura 4.13 Gradientes de temperatura obtenidos mediante cámara termográfica.....	79
Figura 4.14 Empalme de los moles previo a la fundición	80
Figura 4.15 Extracción de la escoria del material líquido	80
Figura 4.16 Alistado la colada	81
Figura 4.17 Colada del material	82
Figura 4.18 Solidificación del metal	82
Figura 4.19 Desmoldeo	82
Figura 4.20 Limpieza de la pieza fundida	83
Figura 4.21 Obtención de los modelos de la fundición	84
Figura 4.22 Montaje de la pieza al torno	85
Figura 4.23 Careado del centro del soplador	86
Figura 4.24 Careado de la base de un rotor	86
Figura 4.25 Rotores	86
Figura 4.26 Soplador centrifugo	87
Figura 4.27 Gráfica de velocidad tercera condición: apertura al 100% con tubo	93
Figura 4.28 Gráfica de flujo volumétrico tercera condición: apertura al 100% con tubo	93

Figura 4.29 Gráfica de rapidez del flujo de peso tercera condición: apertura al 100% con tubo	94
Figura 4.30 Gráfica de velocidad sexta condición: apertura de la tapa de la carcasa con la conexión del tubo	95
Figura 4.31 Gráfica de flujo volumétrico sexta condición apertura de la tapa de la carcasa con la conexión del tubo	96
Figura 4.32 Gráfica de rapidez del flujo de peso sexta condición: posición de apertura de la tapa de la carcasa con la conexión del tubo	96
Figura 4.33 Gráfica de flujo volumétrico primera condición apertura al 100% sin tubo	97
Figura 4.34 Gráfica de velocidad primera condición apertura al 100% sin tubo	98
Figura 4.35 Gráfica de rapidez del flujo de peso primera condición: apertura al 100% sin tubo	98
Figura 4.36 Gráfica de flujo volumétrico cuarta condición: apertura al 50% con tubo	99
Figura 4.37 Gráfica de velocidad cuarta condición: apertura al 50% con tubo	100
Figura 4.38 Gráfica de rapidez del flujo de peso cuarta condición: apertura al 50% con tubo	101
Figura 4.39 Gráfica de flujo volumétrico segunda condición: apertura al 50% sin tubo.....	102
Figura 4.40 Gráfica de velocidad cuarta condición: apertura al 50% con tubo	102
Figura 4.41 Gráfica de rapidez del flujo de peso segunda condición: con apertura al 50% sin tubo	103
Figura 4.42 Gráfica de flujo volumétrico quinta condición: apertura de la tapa de la carcasa sin la conexión del tubo	104
Figura 4.43 Gráfica de velocidad quinta condición: apertura de la tapa de la carcasa sin la conexión del tubo	105
Figura 4.44 Gráfica de rapidez del flujo de peso quinta condición: apertura de la tapa de la carcasa sin la conexión del tubo	106
Figura 4.45 Dimensiones del impulsor de soplador centrifugo	107

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Rapidez del flujo y sus unidades	33
Tabla 2.2 Unidades estandarizadas para el cálculo del número de Reynolds.....	36
Tabla 2.3 Sistemas de designación de aleaciones de aluminio	46
Tabla 2.4 Hornos utilizados en la fundición	48
Tabla 3.1 Valores de velocidad registrados en cada una de las aletas y condiciones de posición	69
Tabla 4.1 Desempeño del soplador con impulsor de aletas planas	89
Tabla 4.2 Datos registrados del soplador de aletas curvas con radio de 10.5 cm.	90
Tabla 4.3. Datos experimentales obtenidos del soplador con impulsor de aletas curvas con radio de 6.5 cm	91
Tabla 4.4. Datos registrados del soplador de aletas curvas con radio de 4.5 cm	92
Tabla 4.5 Valores obtenidos del soplador de aletas planas a 1700 rpm	108
Tabla 4.6 Valores obtenidos del soplador de aletas planas a 3400 rpm	108

RESUMEN

El presente trabajo muestra el diseño, manufactura y desempeño de un soplador centrífugo para hornos de combustión aire-gas, donde se encuentra la función de la geometría y curvatura de las paletas de rotores. Una vez identificadas las variables, se elaboró un rotor con paletas planas y tres rotores con paletas curvadas, estas últimas con radios de 10.5, 6.5 y 4.5 cm. Se toma en cuenta que cada uno de los rotores son elaborados de ocho paletas, con un diámetro de 18.5 cm. y una altura de 7 cm.

La elaboración de los modelos de fundición se hizo mediante la impresión 3D, una vez con las impresiones de los modelos se realiza la técnica de fundición en molde de arena, donde los modelos impresos son depositados en un molde con arena, dando así el molde para la fundición. El proceso de fundición de aire-gas es una técnica de fabricación donde implica el uso de gas LP, combinado con el oxígeno, para crear una llama de alta temperatura. Esta llama es utilizada para fundir metales en un estado líquido, como es el aluminio, este permite el moldeo adecuado de los rotores que se necesitan. Posteriormente se realiza la simulación del proceso de colada para garantizar el llenado de los moldes.

Una vez obtenidas las piezas fundidas, se realiza el maquinado requerido, mediante los diferentes procesos de remoción de material; estos modelos también fueron balanceados para que no le perjudicara alguna vibración al momento de su operación. Se realizan las pruebas de operación en cada uno de los modelos, donde se analizan los valores de flujo volumétrico a través de un anemómetro, además de realizar la variación de los rotores y el área de succión del soplador.

Los valores obtenidos de cada uno de los rotores de curvatura muestran una mejora significativa en comparación del rotor de aspas planas, donde se resalta que el rotor de curvatura de 4.5 cm de radio generó el mayor flujo volumétrico a la salida del soplador $Q = 0.2929 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Por otra parte, el fluido tuvo un comportamiento turbulento de acuerdo a los valores calculados del número de Reynolds $Re > 2300$. La información generada podría ser usada para el diseño de sopladores centrífugos de acuerdo a los requerimientos de los hornos de fundición, cuyo aporte térmico está basado en la quema de gas licuado de petróleo.

ABSTRACT

This work shows the design, manufacturing and performance of a centrifugal blower for air-gas combustion furnaces, where the function of the geometry and curvature of the rotor blades is found. Once the variables have been identified, a rotor with flat blades and three rotors with curved blades are made; the latter with radii of 10.5, 6.5 and 4.5 cm. It is taken into account that each of the rotors are made of eight blades, with a diameter of 18.5 cm. and a height of 7 cm.

To create the casting models, it is through 3D printing. Once the impressions of the models have been made, the sand mold casting technique is carried out, where the printed models are placed in a mold with sand, thus creating the mold for casting. The air-gas casting process is a manufacturing technique where it involves the use of gas L.P. combined with oxygen to create a high temperature flame. This flame is used to melt metals in a liquid state, such as aluminum, this allows the proper molding of the rotors that are needed. Subsequently, the simulation of the casting process is carried out to guarantee the filling of the molds.

Once the cast parts are obtained, the required machining is carried out, through the different material removal processes. These models were also balanced, so that they would not be harmed by any vibration at the time of their operation. Operation tests are carried out on each of the models where the volumetric flow values are analyzed through an anemometer, in addition to the variation of the rotors and the suction area of the blower.

The values obtained from each of the curvature rotors show a significant improvement compared to the flat blade rotor where it is highlighted that the curvature rotor with a radius of 4.5 cm generated the highest volumetric flow at the outlet of the blower $Q = 0.2929 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. On the other hand, the fluid had a turbulent behavior according to the calculated values of the Reynolds number $Re > 2300$. The information generated could be used for the design of centrifugal blowers according to the requirements of smelting furnaces whose thermal input is based on the burning of liquefied petroleum gas.

CAPÍTULO 1. CONSTRUCCIÓN DEL OBJETO DE ESTUDIO

1.1. Introducción

Los sopladores centrífugos son equipos electromecánicos que han sido ampliamente usados en el área de ingeniería para suministrar aire a diversos equipos, tales como los hornos de fundición de metales cuyo calor es generado a partir de la combustión de hidrocarburos. El desempeño de los sopladores depende de su tamaño, geometría y los materiales usados en su manufactura. A diferencia de los ventiladores axiales que desplazan el aire en una dirección paralela al eje del ventilador, los sopladores centrífugos emplean la fuerza centrífuga generada por un impulsor giratorio para dirigir el aire hacia afuera perpendicularmente al eje de rotación (Juvinal, 2023). Así mismo, los procesos de manufactura para su obtención son usados en función de las propiedades físicas y químicas de los materiales usados.

Por otra parte, la cantidad de calor generado por el fenómeno de combustión de los hidrocarburos depende de la composición química del mismo, la relación entre oxígeno y el combustible. De acuerdo a dicha relación es posible generar una combustión completa o parcial, de acuerdo a las necesidades que requiera el proceso en donde sea implementado.

1.1 Antecedentes del problema

El presente proyecto trata sobre la mejora del desempeño de un soplador centrífugo para ser usado en un horno de fundición para aluminio, el cual usa gas licuado del petróleo para su combustión, donde se tiene la finalidad de incrementar la temperatura de la carga metálica. Por lo tanto, resulta necesario establecer una metodología basada en nuevas tecnologías para diseñar, manufacturar y poner en marcha el soplador, además de determinar y aplicar la instrumentación necesaria para la medición de flujo volumétrico a la salida del soplador.

1.2 Planteamiento del problema

El presente trabajo plantea el problema relacionado a la obtención de un soplador centrífugo para ser implementado en un horno de combustión aire – gas para la fundición de aleaciones no ferrosas para procesar 1.5 kg de aluminio, Al.

Por lo tanto, es necesario diseñar y manufacturar el soplador mediante la aplicación de fundamentos teóricos y prácticos de la ingeniería mecánica. El problema del diseño incluye el uso de nuevas tecnologías y procesos de manufactura convencionales.

1.3 Justificación

Es necesario implementar mejoras en el desempeño de un soplador centrífugo para ser usado en un horno de fundición de aluminio, esto es debido a que en el momento de no realizar correctamente la mezcla de aire-gas, la combustión no se aprovecha al máximo, generando así un desperdicio del gas L.P. La mejora en el desempeño del soplador implica la relación de flujo volumétrico a la salida del soplador en relación al consumo de energía del motor que impulsa las aspas. Entre las variables principales que afectan el flujo volumétrico a la salida del soplador es la geometría y tamaño de las aspas, ya que estas pueden ser planas o curvas.

Por lo tanto, resulta necesario realizar un estudio que muestre el efecto de dichas variables sobre el flujo volumétrico. La importancia del presente trabajo también está relacionado al ahorro de energía, el cual es un tema relevante en la actualidad y en el campo de estudio de la ingeniería.

Por lo antes señalado, es necesario contar con un proceso de diseño versátil y de fácil aplicación para la fundición de aleaciones de aluminio y que pueda ser utilizado por las medianas y pequeñas empresas.

1.4 Objetivos de la investigación

Objetivo general

Elaborar tres modelos curvos de sopladores centrífugos mediante el uso de herramientas tecnológicas como SolidWorks, Procast e impresión en 3-D y de los procesos convencionales como la fundición, torneado, taladrado y balanceo usadas en el campo de ingeniería para evaluar su desempeño y pueda ser integrado a un horno de combustión aire – gas (gas licuado del petróleo).

Objetivos específicos

- Diseñar un soplador centrífugo mediante el uso del programa de diseño asistido por computadora CAD (por sus siglas en inglés), incluyendo la carcasa y las aspas.
- Manufacturar las aspas mediante la fundición en molde de arena, torneado y taladrado. En el proceso de fundición serán diseñados y obtenidos los modelos de fundición mediante la técnica de impresión tridimensional con el uso de filamento polimérico.
- Determinar el flujo volumétrico a la salida del soplador en función de la curvatura de las aspas del mismo.
- Determinar el comportamiento del aire en función del flujo a la salida del soplador en función del número de Reynolds.

1.5 Preguntas de investigación

Las siguientes preguntas de investigación han sido planteadas como guía en el desarrollo de la presente tesis, ya que son necesarias para identificar los fundamentos de la problemática que deben ser resueltos y comprendidos para una interpretación de los resultados a obtener

- Cuáles son flujos volumétricos a obtener en un soplador centrífugo al modificar la curvatura y el tamaño de las aspas?

- ¿Cuáles son los materiales que pueden ser considerados en el diseño y manufactura de un soplador centrífugo?
- ¿Qué instrumentos pueden ser usados para medir el flujo volumétrico de aire?
- ¿Cuáles ventajas se tendrían al obtener mayor flujo volumétrico en la puesta enmarcha del soplador?
- ¿Cuáles son las ventajas de usar modelos de fundición obtenidos a través de la impresión tridimensional?
- ¿Cuáles son los factores que determinan la obtención exitosa de piezas mediante fundición en molde de arena?
- ¿Cuáles son las características del fenómeno de combustión?

1.6 Hipótesis

Será posible el diseño del soplador centrífugo mediante el uso de programas informáticos de diseño mecánico, el cual incluirá el diseño de la carcasa y las aspas. También será posible la manufactura del mismo mediante el proceso de fundición y procesos de remoción de material. El flujo volumétrico será mayor cuando la curvatura de las paletas del aspa sea más pronunciada, esto debido al incremento del área superficial de las aspas en contacto con el aire.

1.7 Delimitación y alcance

El presente trabajo incluye el diseño tridimensional de un soplador centrífugo mediante el programa informático SolidWorks versión 2020. Además, se realiza la elaboración del soplador, mediante el uso de la técnica de fundición en molde de arena con el uso de modelos de fundición obtenidos mediante la impresión 3D de material polimérico y procesos de remoción de material. El desempeño del soplador fue estimado a partir del efecto de la curvatura de las paletas del rotor, respecto a los valores de flujo volumétrico medido con un anemómetro.

La discusión y análisis de resultados está basada en los resultados experimentales. El presente trabajo de tesis no incluye la simulación del comportamiento del fluido al ingresar y salir del soplador centrífugo, ya que dicho tema será abordado en trabajos futuros. Sin embargo, incluye la simulación del comportamiento del metal líquido dentro del molde de arena en el colado del material para la manufactura de las aspas. El efecto del tamaño de los rotores, número de paletas y velocidad de rotación; queda como trabajo futuro para próximos proyectos.

1.8 Plan metodológico

Será diseñado un soplador centrífugo en el programa SolidWorks versión 2020. La carcasa será manufacturada a partir del procesamiento de chapa de acero al carbono mediante corte en cizalla y la realización de ensambles mediante la aplicación de la técnica de soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido. Las aspas podrán ser manufacturadas mediante la técnica de fundición en molde de arena con el uso de modelos de fundición.

Será realizada la simulación del proceso de colada del metal al molde de arena mediante el uso del programa especializado Procast, para determinar las mejores condiciones para la elaboración de dicho molde. Los modelos obtenidos mediante diseño mecánico serán manufacturados en una impresora 3D mediante la adición de filamento polimérico, esto con la finalidad de que los modelos sean precisos; estos corresponderán con las diferentes curvaturas en las paletas de acuerdo al diseño establecido en el modelo realizado por computadora.

Por otra parte, las piezas fundidas serán mecanizadas y balanceadas en un torno paralelo. Las perforaciones para su ensamble en el eje del motor serán realizadas mediante operaciones de taladrado. El roscado de dichos barrenos será realizado de forma manual. Posteriormente, las aspas podrán ser ensambladas en el eje y su efecto en el flujo volumétrico podrá ser determinado con un anemómetro.

1.9 Variables de investigación

Las variables del presente proyecto son la geometría y radio de curvatura de las paletas en rotores para un ventilador centrífugo respecto al flujo volumétrico a la salida. También incluye las variaciones del área de succión a la entrada de aire en el soplador que modifican los flujos volumétricos, rapidez del flujo de peso, rapidez del flujo de masa a la salida y el comportamiento del fluido, este último caracterizado a partir de la estimación del número de Reynolds, Re .

Tomando en cuenta los valores mencionados, las variables en el desarrollo de los cálculos son el flujo volumétrico, la rapidez del flujo de peso y la rapidez del flujo de masa, que son de tipo cuantitativo, debido a que los datos obtenidos son numéricos.

1.10 Tipo de investigación

El presente trabajo de investigación está relacionado a los tipos de investigación experimental, ya que incluye resultados obtenidos de la construcción de un prototipo físico y la medición del flujo volumétrico a la salida del soplador en función de las curvaturas establecidas en las paletas de los rotores.

También es de tipo correlacional y cuantitativa debido a los valores necesarios, como son el flujo volumétrico, la rapidez del flujo de peso, la rapidez del flujo de masa y del número de Reynolds, al establecer la relación entre variables en términos numéricos.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Definición de soplador

Los sopladores son dispositivos que tienen la finalidad de generar el movimiento de un extremo a otro de algún gas o de aire, principalmente. Sin embargo, existen algunas diferencias de diseño, geometría y de materiales que permiten tener variantes de suministro de aire ininterrumpidamente, obteniendo un beneficio en volumen de aire (Peña Mera, 2019).

Para la elección adecuada de los sopladores es necesario tener en cuenta su tamaño y la aplicación, con la finalidad de generar ahorros importantes en consumo de energía eléctrica, además de aumentar la eficiencia en relación al peso y al diseño de los impulsores. El funcionamiento principal se basa en la absorción lateral de aire generando una succión, donde el rotor y el impulsor, a través de su giro, presuriza y libera el aire por un nuevo sentido controlado (Atlas, 2018).

2.1.1 Tipos de sopladores

Dentro de la industria se han clasificado tres tipos de sopladores, todo esto debido a las diferentes necesidades o aplicaciones, los cuales son el desplazamiento positivo, regenerativos y centrífugos.

Soplador de desplazamiento positivo.

Este tipo de soplador tiene principalmente dos rotadores, donde captura una cantidad de aire que descarga o, en su defecto, lo presiona contra un sistema mecánico o de reacción que necesita. Tiene la capacidad de manejar cargas continuas, sus rotadores están compuestos con acero de aleación para ayudar a asegurar la sincronización antideslizante.

Su mantenimiento suele ser complejo debido a la fabricación de los rotadores y de las aleaciones que maneja, además de lo difícil que es el desarmado de sus piezas. Este dispositivo, como se visualiza en la figura 2.1. genera calor debido a que los dos rotadores se encuentran muy cerca uno del otro, además de que los cojinetes también aportan un calentamiento durante la operación, en su diseño se tiene contemplado en la carcasa de aletas de disipación, también contribuyen a reducir el ruido y las vibraciones generadas durante su funcionamiento (Grainger, 2018).

Figura 2.1.

Soplador de desplazamiento positivo



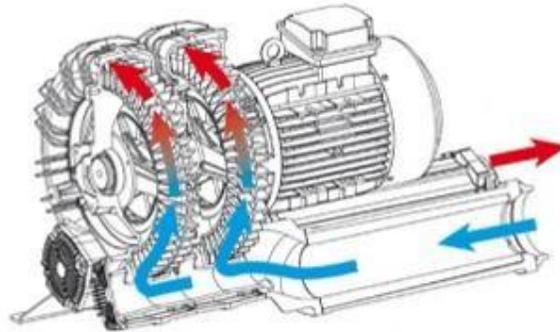
Nota. Damián, 2020.

Soplador regenerativo.

Consiste en un medio alternativo para poder comprimir o en su defecto, evacuar bajos volúmenes de aire a presiones negativas. Principalmente permiten circular una cantidad de aire a través de una cuchilla, donde posteriormente se desplaza hacia adelante utilizando otra cuchilla.

En la figura 2.2 se logran visualizar los dispositivos que solo usan de cuchillas y de un espacio cerrado para su funcionamiento; el aire fluye hacia el soplador por medio de un puerto y hacia afuera a través de un puerto totalmente diferente, este soplador requiere de un motor eléctrico que le permita realizar su funcionamiento.

Figura 2.2
Soplador regenerativo



Nota. Damián, 2020.

Tienen una capacidad de operar con un nivel de eficiencia alto, debido a que sus dimensiones geométricas suelen ser más compactas; como resultado, son relativamente silenciosos y con menos vibraciones (BossTech, 2020).

Soplador centrífugo.

Este dispositivo, como se ilustra en la figura 2.3, está compuesto principalmente de una carcasa de acero donde cubre al rotor; tiene una geometría de tipo caracol, donde en la parte interna se sitúa un rotor de alabes rectos radiales, fabricados principalmente de aluminio. El rotor es impulsado a través de un motor eléctrico. Estos dispositivos tienen la opción de rediseñar la geometría de su carcasa, de su rotor (la geometría de los alabes) y de la capacidad de su impulsor (motor eléctrico).

Figura 2.3*Soplador centrifugo*

Nota. Chinablownerfan, 2013.

Este tipo de soplador el aire entra generando una succión por el centro de un impulso giratorio donde se va dividiendo entre sus aletas; conforme el impulsor se encuentra girando, se acelera el flujo de aire hacia afuera mediante una fuerza centrífuga que genera. El aire se encuentra a alta velocidad donde se difunde de una forma dosificada en su carcasa (Manufacturera Century, 2013).

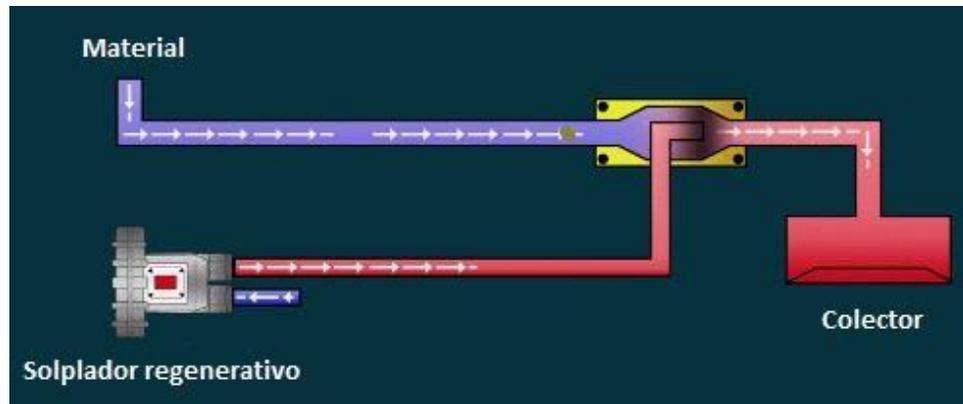
2.1.2 Aplicaciones

Los sopladores son generalmente diseñados de acuerdo a las necesidades que el dispositivo o el proceso requiera, debido a que tienen la función de generar flujos constantes de aire, teniendo en cuenta que son utilizados con presiones que oscilan de entre los 0.3 y 3 bar. A continuación, se van mencionando sus aplicaciones que tienen principalmente en la industria y sus diferentes variantes (Espinoza, 2021).

Sector industrial: son usados para el transporte de materiales (la mayoría de bajo peso) de un proceso a otro, conocido como transporte neumático. En la figura 2.4 se visualiza donde los materiales son guiados a través de un conducto y por otro extremo una línea inyecta una presión de aire, generando un fenómeno de succión, donde este redirecciona con mayor fuerza el desplazamiento de estos materiales y siendo así puestos en un depósito.

Figura 2.4

Esquema del proceso de transporte neumático

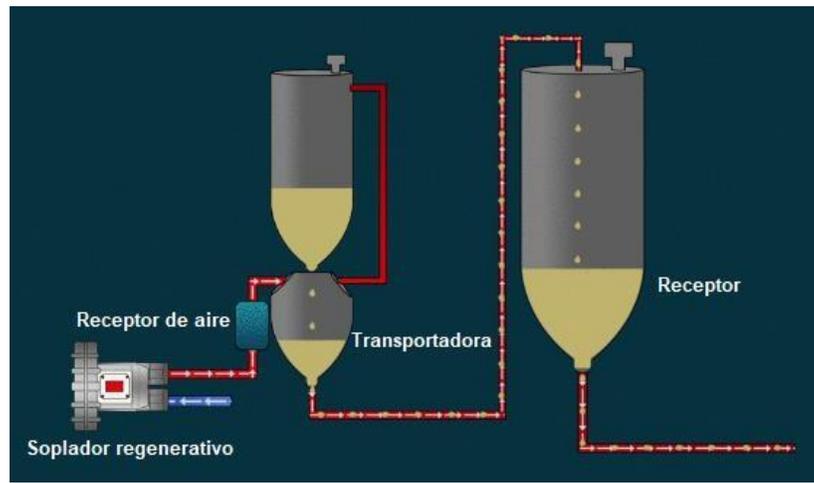


Nota. Ingeniería SAE, 2019.

Además de los procesos neumáticos, se encuentran los desgasificadores, estos son equipos que ayudan a eliminar el oxígeno y algunos gases contenidos en agua de alimentación, cuya finalidad es evitar la corrosión de elementos o circuitos agua – vapor.

Debido que estos equipos necesitan purificar los residuos de hidróxido ferrítico (capas de color rojizo), estas con el transcurso del tiempo van siendo más gruesas provocando averías con son los agrietamientos y pérdidas de presión (Gómez, 2004).

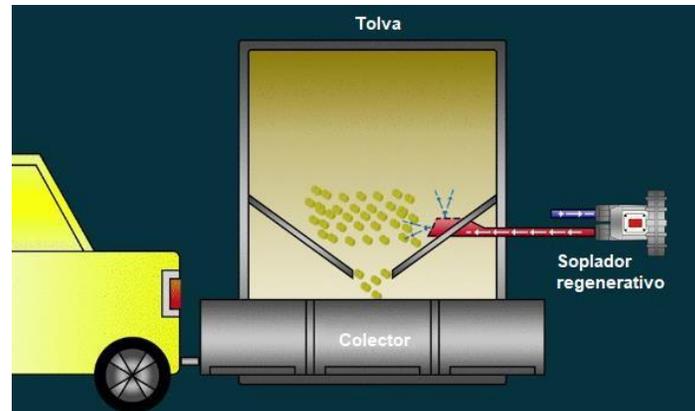
Un desgasificador, como se visualiza en la figura 2.5, también tiene la función de impulsar materiales o soluciones dejando libre obstrucción a los sistemas de tuberías, estos en un principio son depositados en un tanque, donde a través de la inyección de aire por un soplador regenerativo transportan el material por unas tuberías a otro extremo, dando como beneficio el transporte y purificación de las líneas de las tuberías.

Figura 2.5*Esquema del proceso de desgasificación*

Nota. Ingeniería SAE, 2019.

Existe otro proceso donde se utiliza un soplador y es a través de la fluidización, donde se aplica en el secado con aire caliente en productos como la arena, polímeros, minerales molidos, materiales cristalinos, entre otros. Tiene la característica de remover las partículas de humedad de algunos de los materiales mencionados anteriormente, debido a que no es posible utilizar algún solvente orgánico, ya que existe la posibilidad de generar una explosión (Nava, 2004).

El proceso de fluidización, como se ilustra en la figura 2.6, consiste básicamente en el depósito del material en una tolva, donde este con la caída por gravedad, se va poniendo en un colector, pero antes de ser depositado circula por una turbulencia caliente generada por el soplador, donde esta quita la humedad de los materiales sin verse afectado por algún solvente y termina almacenado en el colector.

Figura 2.6*Esquema del proceso de fluidización*

Nota. Ingeniería SAE, 2019.

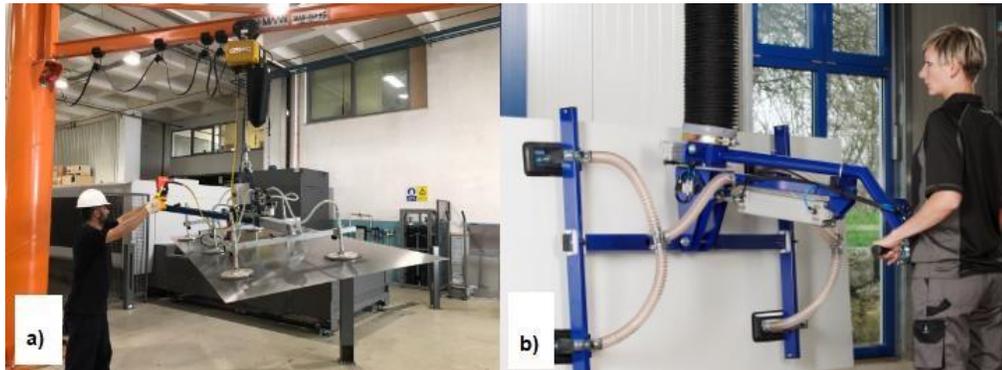
Este proceso es utilizado principalmente en la aplicación de los secadores, tostadores, calcinadores, reactores dentro del sector metalúrgico y en el de los gases. En cuestiones de diseño se deben tener en cuenta los requisitos del proceso de los sistemas mecánicos, de la manera de operar los dispositivos y consideraciones de seguridad. Si no se cumplen, se generan problemas de producción, calidad y de mantenimiento.

Otro proceso donde se utiliza un soplador es en el izado de productos por vacío, donde a través de una tubería flexible se succiona el material a cargar de un punto a otro. Es un sistema de fácil uso, ya que se puede utilizar por un operador o en su defecto se puede automatizar. Se puede utilizar en las industrias maquiladoras, automotriz, alimenticia, médica, entre otras, debido a que tienen diferentes capacidades de carga, que oscilan de 1 kilogramo a 2 toneladas.

Estos se encuentran en un sistema de izaje horizontal y vertical, como se observa en la figura 2.7, donde se compone de una bomba neumática que genera el vacío a través de unas ventosas puestas en las superficies solicitadas; este arreglo tiene una gran capacidad de carga, debido a su diseño y de las ventosas que tienen un gran poder de succión (Industrial COM, 2020).

Figura 2.7

Tipos de izaje. a) izaje horizontal, b) izaje vertical



Nota. Industrial COM, 2020.

La posición depende de los procesos que necesite el operador, ya sea para transporte de un producto de un punto a otro, o en su defecto para el auxilio del ensamble de alguna pieza que no tenga que tener elementos de sujeción como son los tornillos.

Para las aplicaciones de fundición de materiales se utilizan diferentes tipos de sopladores, como los siguientes:

1. El soplador centrífugo: son utilizados para condiciones de baja presión, entregan aire por la acción centrífuga de uno o más impulsores de velocidad.
2. El soplador lobular: entrega un volumen de aire en cada revolución de sus paletas, estas se pueden utilizar a cualquier presión requerida.
3. Soplador de deslizamiento positivo: estos impulsores giran a velocidades moderadas donde oscilan de las 200 a 500 revoluciones por minuto para sopladores grandes y de 800 revoluciones por minuto para sopladores más pequeños.
4. Soplador de un solo paso: consiste en un solo impulsor simple, donde puede ser del tipo semicerrado, o cerrado totalmente; el impulsor por lo general es este compuesto por una sola pieza fundida de aluminio, este impulsor va encerrado dentro de una caja en forma de caracol. Esta caja es compuesta por placas de acero o de fierrocolado, este soplador es impulsado generalmente por un motor eléctrico de alta velocidad por lo general a 1800 revoluciones por minuto (Sosa Caballero, 2014).

Estos sopladores son utilizados en procesos de fundición convencionales, es decir para cubrir procesos de fundición en pequeñas cantidades.

2.1.2.1 Fenómeno de combustión

La combustión se considera como un proceso químico que consiste en la oxidación rápida de una sustancia como lo es un combustible en presencia de un agente oxidante, donde generalmente es el oxígeno del aire. Esta combustión genera una energía en forma de calor y de luz, donde también genera otros compuestos, como el dióxido de carbono, agua y monóxido de carbono, todo depende del tipo y de la cantidad de los reactivos (Significados, 2019).

La combustión es un fenómeno que contiene diferentes aplicaciones prácticas, como en la generación de electricidad, en el sector del transporte, la calefacción, la industria y en la cocina, esto también implica riesgos ambientales y en la seguridad de este proceso químico. Como antecedente, se considera que el ser humano ha utilizado el fuego desde los tiempos prehistóricos para obtener calor, preparar sus alimentos y como protección de sus depredadores. El fuego es visto como el resultado de la combustión de los materiales orgánicos como son la madera, el carbón y el petróleo.

Con la evolución del hombre dentro de la naturaleza y de las condiciones de la combustión, se fue desarrollando durante el paso de la historia, esto a través de la observación y de la experimentación. En este desarrollo tecnológico de la combustión se fueron documentando algunos científicos, los cuales fueron contribuyendo, como fueron Lavoisier, Dalton, Gay-Lussac y Berthelot (Concepto, 2023).

Este fenómeno tiene diferentes implicaciones ambientales, sociales y económicas, debido a que es responsable de una gran parte de las emisiones de los gases de efecto invernadero, donde contribuyen al calentamiento global y al cambio climático. La combustión también

llega a afectar la salud humana y los ecosistemas, además de la dependencia que ha generado este combustible al ser humano, también ha generado problemas geopolíticos y de seguridad energética. La reacción de combustión se define como un proceso químico donde una sustancia se combina con el oxígeno y este libera energía en forma de calor y de luz; esta sustancia donde se quema se llama combustible y el oxígeno que reacciona con él, se llama comburente. Esta reacción de combustión es una de las fuentes de energía más importantes de la humanidad.

Para que la reacción de combustión se llegue a producir es necesario tres condiciones: primero, es necesario contar con una fuente de ignición; segunda, una porción adecuada entre el combustible y el comburente, y por último, de una temperatura suficiente para mantener esta reacción. Las condiciones mencionadas anteriormente se conocen comúnmente como el triángulo de fuego, ya que si se llega a eliminar alguno, se extingue dicha reacción.

La capacidad calorífica de un combustible se establece como la cantidad de calor que libera cuando se quema una unidad de masa de algún combustible. Esta propiedad se considera importante para determinar la eficiencia energética de los procesos de combustión y en el impacto ambiental de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Los combustibles fósiles son originarios a partir de la transformación de los restos orgánicos durante millones de años, como son el petróleo, carbón y gas natural; como consecuencia, tienen una alta capacidad calorífica, dando así una liberación alta de energía al quemarse. Los combustibles renovables se establecen como los que se obtienen a partir de fuentes naturales inagotables, como son la biomasa, el hidrógeno, el biogás, y el bioetanol, estos combustibles tienden a tener una menor capacidad calorífica que el de los fósiles.

La combustión se clasifica en diferentes tipos de acuerdo a las características de los reactivos y de los productos, los cuales se mencionan a continuación. La combustión completa sucede cuando el combustible se oxida totalmente y este produce dióxido de carbono y agua como productos principales; para lograr esta combustión se necesita de una gran cantidad de oxígeno, dando así una mayor cantidad de energía posible.

La combustión incompleta ocurre cuando el combustible no se llega a oxidar completamente y este produce otros compuestos, como el monóxido de carbono, el carbono y el agua, como productos secundarios, esta combustión necesita de una cantidad limitada de oxígeno, que genera menos energía a comparación de la combustión completa.

En una combustión neutra ocurre en el momento en que se usa la cantidad exacta de oxígeno para oxidar completamente el combustible. Con la condición de no dejar algún exceso de oxígeno en los productos, esta combustión se considera como la más ideal; sin embargo, durante la práctica llega a presentar alguna imperfección y no es posible obtenerla (Zumdahl, 2014).

2.2 Fundamentos de mecánica de fluidos

2.2.1 Antecedentes históricos

Se debe tener en cuenta como antecedente que la mecánica de fluidos ha pasado por diferentes etapas durante el paso de la historia de la humanidad, donde se tienen registros antiguos antes del año 5000 antes de Cristo, donde hay evidencias arqueológicas del manejo del agua de un pueblo del pacífico y muy talentoso que descendió desde Asia Central hacia Mesopotamia – Babilonia y Egipto.

Posteriormente, se conoce que la mecánica de fluidos nace fielmente al comienzo de la civilización de Grecia, con las contribuciones de Teles de Miletos, Aristóteles y Herón de Alejandría, ellos no fueron como tales científicos, pero dejaron bases fundamentales para el desarrollo de la mecánica de fluidos. Sin embargo, estos avances se fueron deteniendo cuando históricamente aconteció la caída del imperio gregoriano. Posteriormente, en la época del renacimiento volvieron a surgir por medio de Leonardo da Vinci, en aportaciones tales como la hidráulica.

Más adelante tuvo seguimiento Simón Stevin con sus contribuciones hidráulicas, posteriormente Galileo Galilei donde realiza la experimentación en forma sistemática para comprobar las teorías. Después Evangelista Torricelli, quien realizó la contribución de la velocidad media del chorro, otros contribuyentes son Otto von Guericke, Blás Pascal e Issac Newton.

Issac Newton fue quien contribuyó con una gran cantidad de principios a la mecánica fluidos, que fueron plasmados en su libro “Philosophice Naturalis Principa Mathematica” (Principios matemáticos filosóficamente naturales), donde hizo referencia a los conocimientos de sus antecesores como Galileo Galilei. Posteriormente, Daniel Bernoulli dio seguimiento a los fundamentos de la mecánica de fluidos.

Leonardo Euler es considerado como otro de los grandes contribuyentes de la mecánica de fluidos, donde realizó modelos matemáticos de la dinámica de fluidos para fluidos ideales; sin embargo, no consideró los efectos de la viscosidad en sus ecuaciones.

Además, se menciona a Poiseuille y Claude Navier, quienes fueron presentando sus ecuaciones donde tuvieron grandes contribuciones a la ciencia, estas ecuaciones tuvieron como base los conceptos de Newton para tratar los efectos de la viscosidad. Y Jorge Stokes fue quien realizó las hipótesis de las sustancias donde se modelan las ecuaciones de Navier – Stokes (Pasinato; Confluencia, 2008).

Todas las aportaciones definidas a través de principios, libros y ecuaciones, fueron establecidos como hidrodinámica clásica, reconocida como una de las ramas de la mecánica de fluidos, debido a que no carecían de acercamiento con los resultados prácticos, los resultados analizados. Un factor que fue complementado fue a través del nacimiento de la termodinámica.

Dentro de la mecánica de fluidos se vio la reconsideración de la importancia de la fricción interna de los fluidos en movimiento, ya que se debe considerar la viscosidad aún en los gases como el aire. Esos factores se consideraban como el origen de los coeficientes para los

cálculos, donde surgen las nuevas alianzas en los fluidos, tales contribuciones fueron realizadas por Prandtl y Reynolds, este último realizó el estudio de la importancia de las fuerzas viscosas en comparación de la inercia en las tuberías.

En esta nueva alianza que surge a través del nacimiento de la termodinámica, se tiene en cuenta que se debe considerar la problemática que existe con la turbulencia en cualquier medio de transporte de un punto a otro; como consecuencia, surgen nuevos factores que hoy en día se consideran, como las pérdidas de eficiencia, de potencia en los elementos generadores, desgaste de los materiales en los sistemas de transporte, entre otros.

2.2.2 Mecánica de fluidos

La mecánica de fluidos estudia todo lo relacionado a un fluido que se encuentra en movimiento, este fenómeno debe ser estudiado desde un punto de vista microscópico, debido a la complejidad que tienen las sustancias, como las variantes, además de la presión y la densidad, que tienen diferentes comportamientos de acuerdo a su estado de la materia.

Existen otras variables que han sido establecidas por los autores, las cuales son las variables dependientes, donde se describe el vector velocidad “ v ”, la aceleración “ a ”, la vorticidad “ ω ”, estas son usadas en los campos cuando son función de las variables espaciales (x , y , z) y el factor del tiempo t , es considerado como variable independiente.

Ahora, la descripción de la cinemática y dinámica de un fluido se encuentran sintetizadas con ecuaciones, donde se representan los principios fundamentales de la naturaleza; los siguientes principios son elementales en mecánica de fluidos, donde se menciona la importancia de la conservación de la masa, como segundo la conservación de la cantidad de movimiento lineal y rotacional, el tercero la conservación de la energía y el cuarto, la ley de variación de la entropía.

Estos cuatro principios cumplen sin importar la sustancia o el material a estudiar, para poder formularlos es necesario expresar las fuerzas de reacción del fluido a las deformaciones que van a surgir, esto a través de una ecuación propia para la sustancia. Esas ecuaciones son funciones lineales, denominadas fluidos Newtonianos, como son el agua y el aire, debido a que tienen una relación lineal entre las tensiones y las deformaciones; sin embargo, para las sustancias como el petróleo, la sangre, sustancias de la industria alimenticia, es decir, fluidos donde estén relacionados con composiciones químicas, se les denomina fluidos no Newtonianos, esto debido a la complejidad que tienen en el momento de analizar su comportamiento.

Dentro de la mecánica de fluidos se va analizando su comportamiento, debido a que se encuentran en un estado de reposo y en movimiento. Cabe recordar que los fluidos se encuentran en estado líquido o gaseoso; para realizar su análisis cuantitativo se deben tener en cuenta los términos de unidades empleados.

Un fluido en estado de reposo se debe analizar con las fuerzas ejercidas en las superficies, esto debido a la presión del fluido, su flotabilidad y estabilidad, estos también dependen de la configuración geométrica de sus superficies. Además, se debe considerar que un fluido actualmente es transportado a través de tuberías con geometría circular, con esto se debe considerar la energía que conserva y esta contiene una elevación, presión e inclusive velocidad.

Cuando un fluido se encuentra en movimiento también este pierde energía debido a la fricción que genera cuando este se desplaza por un conducto o por algún obstáculo. Para estos sistemas es necesario agregar fuentes de energía, como son las bombas impulsoras, con estos factores son medibles la presión, la temperatura y la velocidad del flujo del fluido. Con base en lo mencionado se debe tener en cuenta la conservación y la pérdida de energía en el momento de transportar un fluido (Mott, Untener, Murrieta y Cárdenas, 2006).

2.2.3 Flujo másico y flujo volumétrico

Dentro de la mecánica de fluidos también se tiene la posibilidad de estudiar los fluidos en movimiento, donde se analizan los efectos de la presión, la velocidad y la elevación del fluido conforme a su comportamiento establecido en un sistema de flujo de fluidos.

Para esto se usará el principio de Bernoulli, que tiene una aplicación muy amplia como en los diseños de chimeneas, el flujo de fluidos en las tuberías y el comportamiento de vuelo de un avión.

Para abordar este principio hay que tener en cuenta en qué consisten las medidas de rapidez del flujo de un fluido, esto debido a que existen tres tipos. La primera medida se conoce como rapidez del flujo de volumen “Q”, se conoce como el volumen de fluido que fluye por medio de una sección establecida por una unidad de tiempo. La segunda medida tiene nombre de rapidez de flujo de peso “W”, es el peso de fluido que fluye por una sección dada por una unidad de tiempo. Y la tercera medida se conoce como la rapidez del flujo de masa “M”, se establece como la masa de fluido que fluye por medio de una sección por una unidad de tiempo (Mott, Untener, Murrieta y Cárdenas, 2006).

Además de las tres medidas mencionadas, se deben contemplar tres tipos de energía que posee un fluido en un sistema de flujo de fluidos, como primero la energía cinética, que está establecida por el movimiento del fluido. En la segunda se contempla la energía potencial por motivo de la elevación del fluido. Y en la tercera se tiene en cuenta la energía del flujo, donde es contenida la energía debido a la presión que hay en el fluido y con el peso específico.

Ahora se analiza la rapidez del flujo de fluido, definiendo sus ecuaciones de cada una de las tres medidas de rapidez del flujo. En la ecuación 2.1 se establece la rapidez del flujo de volumen.

$$Q = A v \quad \text{Ec. 2.1}$$

Donde “A” es el área de la sección a analizar y “v” representa la velocidad promedio del

flujo. En la tabla 2.1 se indican las unidades establecidas de “Q”, esto debido a que se analizan en el Sistema Internacional “SI” y en el Sistema Inglés.

Tabla 2.1

Rapidez del flujo y sus unidades

Símbolo	Nombre	Unidades en el Sistema Internacional	Unidades en el Sistema Inglés
Q	Rapidez del flujo de volumen	$\frac{m^3}{s}$	$\frac{ft^3}{s}$
W	Rapidez del flujo de peso	$\frac{N}{s}$	$\frac{Lb_f}{s}$
M	Rapidez del flujo de masa	$\frac{kg}{s}$	$\frac{slugs}{s}$

Nota. Mott, Untener, Murrieta y Cárdenas, 2006.

A continuación, en la ecuación 2.2 se define la ecuación de rapidez del flujo de peso:

$$W = \gamma Q \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde “ γ ” indica el peso específico del fluido y “Q” la rapidez del flujo de volumen, unidad de la rapidez del flujo de peso “W” que está establecida, se encuentra en la tabla 2.1.

Por último, en la ecuación 2.3 se define la rapidez del flujo de masa, que también se ve relacionado con la rapidez del flujo de volumen:

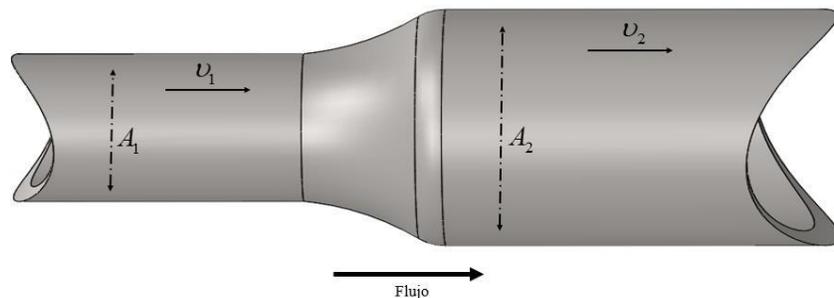
$$M = \rho Q \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde “ ρ ” indica la densidad del fluido. En la tabla 2.1 se establecen las unidades de la rapidez del flujo de masa “ M ”.

A partir de las ecuaciones anteriores se puede deducir el principio de continuidad, por medio de un sistema de tuberías cerrado, como se visualiza en la figura 2.8, donde un fluido va fluyendo del segmento 1 al segmento 2, a una velocidad que es constante (se le considera como flujo constante), pero si no se le añade, almacena o elimina el fluido entre los segmentos la masa del fluido en un determinado tiempo, se considera la misma que fluye.

Figura 2.8

Sistema de distribución de fluidos con variaciones de área y velocidad.



En la ecuación 2.4 se expresa que en términos de rapidez del flujo de masa se consideran como lo mismo, es decir, que se igualan del segmento 1 y del segmento 2,

$$M_1 = M_2 \quad \text{Ec. 2.4}$$

Una vez igualados los valores de la rapidez del flujo de masa se pueden sustituir las equivalencias de la rapidez del flujo de la masa de la ecuación 2.3, como son la densidad del fluido y la rapidez del flujo de volumen, dando nuevos valores, como se muestra en la ecuación 2.5

$$\rho_1 Q_1 = \rho_2 Q_2 \quad \text{Ec. 2.5}$$

Para la rapidez del flujo de volumen, se consideran los valores de la ecuación 2.1, los cuales son el área del segmento y la velocidad promedio del flujo, dando así la ecuación de continuidad para cualquier tipo de fluido, como se muestra en la ecuación 2.6.

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad \text{Ec. 2.6}$$

Esta ecuación es utilizada para relacionar la densidad del fluido, el área del flujo y la velocidad del flujo a través de dos segmentos, donde el segmento es estable, ya sea para gases o líquidos.

2.2.4 Número de Reynolds

Para el comportamiento del flujo de un fluido va en relación con las pérdidas de energía, donde depende del flujo laminar, que se define como el conjunto de láminas paralelas que mantienen su forma en el tiempo, debido a que es un flujo estacionario, donde en cada punto del espacio su velocidad se mantiene constante en el tiempo. Y en su defecto, para un flujo turbulento, las láminas se mezclan continuamente entre sí, donde estos se forman remolinos y el flujo deja de ser estacionario (Cros Stotter, 2013).

Lamentablemente no es posible observar de manera directa si es un flujo laminar o turbulento, para esto se debe de tener en cuenta la ecuación 2.7 para calcular los números de Reynolds, además de considerar las siguientes variables, como es la densidad “ ρ ”, su viscosidad dinámica “ η ”, el diámetro de la tubería “ D ”, y la velocidad promedio del flujo “ v ”.

$$N_R = \frac{v D \rho}{\eta} \quad \text{Ec. 2.7}$$

El número de Reynolds se establece como una unidad adimensional, para esto se deben establecer las siguientes unidades de cada una de las variables ya mencionadas, como se muestra en la tabla 2.2, enunciadas por el Sistema Internacional y el Sistema Inglés.

Tabla 2.2

Unidades estandarizadas para el cálculo del número de Reynolds

Símbolo	Nombre	Unidades en el Sistema Internacional	Unidades en el Sistema Inglés
v	Velocidad promedio	$\frac{m}{s}$	$\frac{ft}{s}$
D	Diámetro	m	ft
ρ	Densidad	$\frac{kg}{m^3} \rightarrow \frac{N \cdot s^2}{m^4}$	$\frac{slugs}{ft^3} \rightarrow \frac{lb \cdot s^2}{ft^4}$
η	Viscosidad dinámica	$\frac{N \cdot s}{m^2} \rightarrow Pa \cdot s \rightarrow \frac{kg}{m \cdot s}$	$\frac{lb \cdot s}{ft^2} \rightarrow \frac{slugs}{ft \cdot s}$

Nota. Mott, Untener, Murrieta y Cárdenas, 2006.

Cuando se obtiene un valor muy grande en el cálculo de los números de Reynolds, es debido a su alta velocidad o en su defecto, por tener una baja viscosidad y como consecuencia tiene un comportamiento turbulento; por el contrario, si el fluido tiene una alta viscosidad o baja velocidad, es decir, que tiene números bajos de Reynolds, se consideran como laminares.

Para cuestiones de tuberías, se debe tener en cuenta que si el número de Reynolds es menor de 2000, se establece como un flujo laminar. En cambio, si el número de Reynolds es mayor a

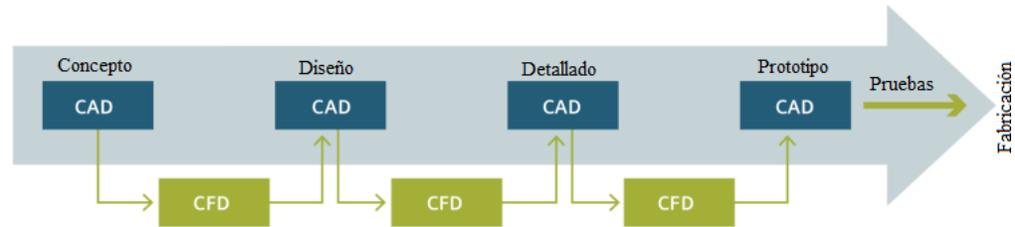
4000, se considera como un flujo turbulento. Sin embargo, si los valores llegan a ser extremadamente altos es necesario realizar cambios de diseño, como cambiar el diámetro del tubo o, en su defecto, de la velocidad del flujo (Mott, Untener, Murrieta y Cárdenas, 2006).

2.2.5 Herramientas computacionales para simulación numérica de fluidos

En la actualidad, para el uso de las ecuaciones establecidas para el estudio de los fluidos se necesita del apoyo de un software de simulación, conocido como “Computational Fluid Dynamics”, por sus siglas en inglés CFD, los cuales se encargan de utilizar e interpretar los datos a analizar para realizar los cálculos necesarios de acuerdo a la problemática a resolver, ya sea para gases o líquidos, considerando su composición química, densidad y velocidad (Pathak, 2021).

El utilizar un programa CFD permite ejecutar una evaluación más rápida y eficiente, debido a que se pueden realizar cambios en el diseño y así reducir costes de producción. El procedimiento para la fabricación y la simulación del CFD convencional, como se ilustra en la figura 2.9, se hace a través de la creación previa o el concepto de la geometría de una pieza conocida como “Computational Aided Design”, conocida por sus siglas en inglés como CAD o en español, como diseño asistido por computadora. Una vez hecho eso dentro del programa, se debe de exportar un mayado, realizar la configuración y la ejecución de un solucionador del CFD, más adelante procesar los resultados obtenidos; si los resultados obtenidos necesitan de alguna mejora, es necesario volver al CAD para modificar su geometría.

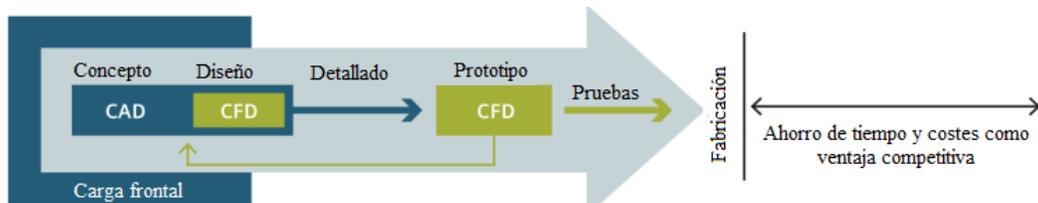
Una vez detalladas las geometrías, se vuelve a simular en el CFD, cuando se obtienen los objetivos analizados, se crea el prototipo de forma física, para que así se hagan pruebas, aún en esta etapa existe la posibilidad de regresar al CAD y al CFD para obtener mejoras. Una vez aprobadas las pruebas, se da el último paso de fabricación del producto, así da la garantía de producir un producto que cumpla con su objetivo (Pathak, 2021).

Figura 2.9*Flujo de diseño y simulación CFD tradicional*

Nota. Morlacchi, 2021.

Existe otro procedimiento de diseño, simulación y fabricación de productos CFD como se observa en la figura 2.10, el concepto y el producto del diseño están enfrascados en el mismo programa, teniendo así la ventaja de modelar y simular el producto, dando así una mejora más productiva en el detallado del producto directamente en el CAD.

Una vez hechas las mejoras en el CAD y con una eficiencia de los resultados en el CFD, se abre paso a la elaboración del prototipo, donde se dan pequeños detalles en el diseño y simulación. Por último, hechas las pruebas, se da paso a la fabricación del producto, este procedimiento es aún más eficiente, debido a que se reducen aún más los tiempos y costos de diseño y fabricación.

Figura 2.10*Flujo de diseño y simulación CFD mejorado con carga frontal*

Nota. Morlacchi, 2021.

Un software especializado conocido es el Fluent Ansys, debido a que sus resultados son confiables, sus errores son mínimos, casi nulos, esto debido a que tiene un buen manejo de variables en el entorno a analizar (Montejo, 2019). Además, ofrece buenas herramientas de simulación en CFD, como son en el modelado avanzado, para aplicaciones de turbomáquinas y sistemas complejos. El software OpenFOAM brinda la posibilidad de personalizar las limitantes (código abierto) de fluidos o gases, donde se simulan sistemas de flujo de fluidos, turbulencias, estudios de fluidos en reposo, donde se verifican diferentes pruebas (código abierto) en el software para su evaluación, validación y verificación.

El software CFD Module establece y resuelve modelos para sistemas con flujo de fluidos, como flujos compresibles e incompresibles, turbulentos y laminares, para superficies libres o porosas y áreas abiertas. Además, tiene la opción de combinarlo con fenómenos físicos, como transferencias de calor o en su defecto, en cuestiones estructurales.

Siemens maneja un software de simulación de fluidos llamado Simcenter CFD, que tiene la posibilidad de analizar sistemas complejos de fluidos de la industria, brindando una gran eficiencia en su simulación; también da solución a problemas estructurales relacionados con los fluidos. Además, tiene la capacidad de simular flujos turbulentos con flujos de reacción.

El software ParaView sirve para el análisis y visualización de datos y códigos abiertos, además estudia la elevación, su arrastre y el flujo de aire, entre otras. Tiene la capacidad de analizar datos masivos, que son usados principalmente en las industrias, laboratorios y universidades especializadas.

Un software para estudiar efectos térmicos o en fluidos con relación al diseño es Altair. Tiene la capacidad de analizar estudios de transferencia de calor, flujo de fluidos, turbulencias y flujos con cargas estáticas en estructuras. Brinda una gran eficiencia en el momento de simular modelos complejos y factores como la aeroacústica para máquinas rotativas.

El caso del programa informático SolidWorks, este tiene un paquete de simulación de flujo de fluidos por medio del análisis numérico, se encuentra ligado con el sistema CAM del programa, dando así un mejor uso de sus herramientas, debido a la variedad de los gases y

líquidos que maneja el programa. Se ofrece el estudio a colectores de flujo continuo, intercambiadoras de calor, refrigeración electrónica y en cuestiones de aerodinámica en piezas.

Cabe mencionar que existe una gama amplia de programas computacionales que son herramientas poderosas en la simulación numérica de fenómenos que ocurren en los diversos procesos relacionados a la ingeniería.

2.3 Procesos de manufactura

En esta sección se definirá el proceso y manufactura, debido a que son términos esenciales para el entendimiento del proyecto. El concepto de proceso se define como el conjunto de actividades relacionadas y ordenadas, con la cual se obtiene un objetivo determinado. Es primordial esta definición, debido a que en las industrias lo necesitan para planear, integrar, organizar, dirigir y controlar sus actividades. Además, se considera como herramienta de procesos de producción, ya que ayuda a diseñar, integrar, organizar, controlar y evaluar los programas de producción.

El concepto de manufactura se define como la obra hecha a mano o en su defecto, con el apoyo de una máquina, antiguamente en los productos, en su mayoría, intervenía la mano del hombre para su elaboración, con el paso de los tiempos y de la revolución industrial a finales del siglo XVIII, estos se fueron elaborando con herramientas y máquinas e inclusive elaborados a grandes masas (Guerrero, 2008).

Con el nacimiento de la era industrial se han ido estableciendo criterios productivos donde se debe tener en cuenta que los costos de elaboración deben ser aceptables y competitivos en el mercado, estos productos deben ofrecer una rentabilidad que generen ganancias con base en su costo de elaboración y distribución. Además, estos deben ser elaborados con los estándares de calidad que requieran, ya sea de seguridad, ambiental, dimensional, entre otros.

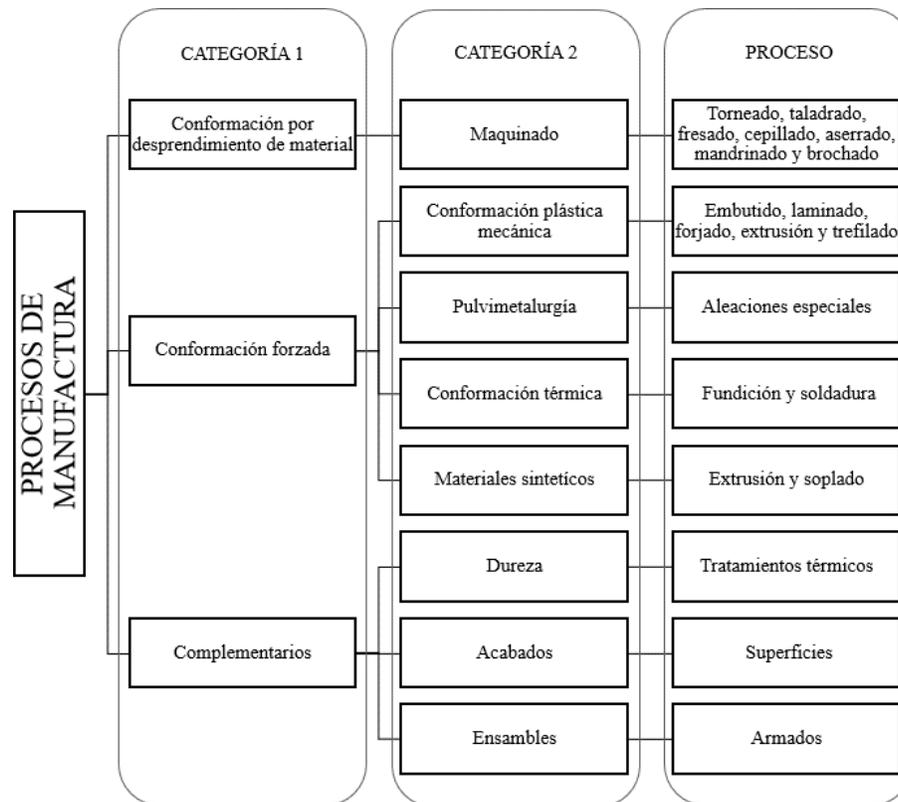
Para que este proceso exista es necesario de tres elementos, que son materia, energía e información. Para la elaboración de un producto es elemental que intervenga la materia, debido está compuesto de diferentes compuestos, contiene una geometría, un peso, dimensiones y un acabado.

En la transformación del producto es necesaria la intervención de diferentes energías, principalmente la mecánica, eléctrica, química, hidráulica, térmica, entre otras, o en su defecto, pueden ser combinadas cada una de ellas para su generación, transformación y movimiento de mecanismos.

La utilización de estas energías es aprovechada por algunas máquinas e inclusive herramientas. En cuanto a la información, esta va definiendo los parámetros y tolerancias a manejar, donde se generan registros que son utilizados para la programación de las líneas de producción, estos parámetros suelen ser como temperatura, niveles, presiones, velocidades, posiciones, entre otros.

2.4 Clasificación de procesos de manufactura

Una vez comprendidas las definiciones de proceso y de manufactura, además de la relación que tiene uno del otro, de los factores que se necesitan para la transformación de una materia prima en un producto compuesto, es elemental clasificar los procesos de manufactura que han surgido, inclusive antes de la Revolución Industrial, los cuales se clasifican en dos categorías, como se ilustra en la figura 2.11.

Figura 2.11*Clasificación de los procesos de manufactura*

Nota. Guerrero, 2008.

Para la primera categoría se da relación con la integridad de la materia prima, donde esta sufre una deformación o en su defecto, algún desprendimiento. Además, está conformado de toda la masa visto en otra subcategoría. Estos procesos complementarios van relacionados con la dureza, la calidad de superficies, presentación final del producto. La segunda categoría va relacionada con los factores externos que intervienen en la transformación de la materia prima, como es el maquinado, la deformación permanente, conformación forzada por polvos metálicos. Inclusive, con la combinación de diferentes materiales para generar un mejor material de aleación.

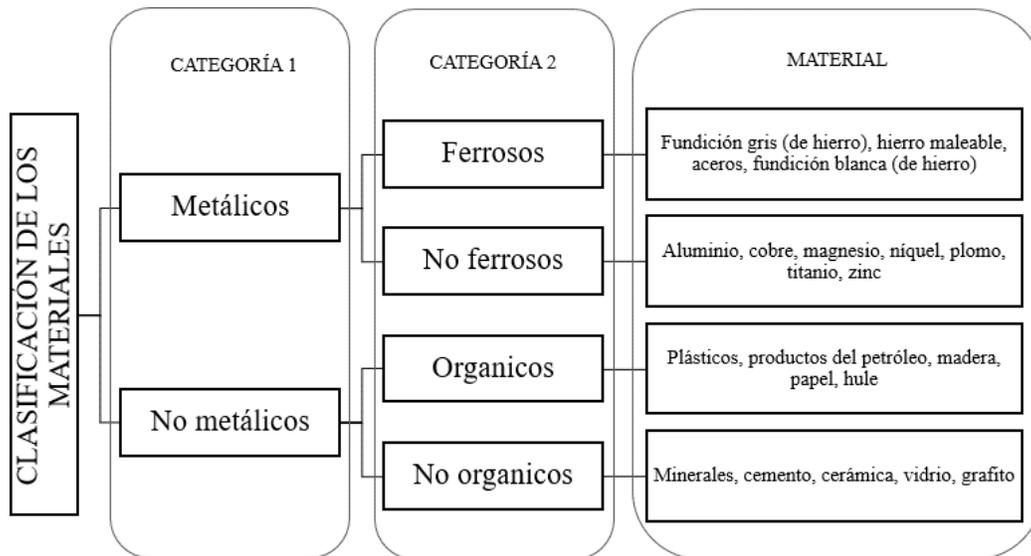
2.5 Tipos de materiales

Para el proceso de fabricación de un objeto es necesario del repositorio de un material, el cual es un conjunto de elementos que tiene una forma, geometría, volumen, peso y un lugar en el espacio. Sus propiedades están clasificadas en tres, las propiedades físicas se encargan del comportamiento del material con base en su estructura, sustancia o materia. Las propiedades químicas verifican cuál es el comportamiento del material cuando se encuentra en interacción con las sustancias químicas. Mientras tanto, las propiedades mecánicas se encargan de analizar el comportamiento del material cuando se le aplica alguna fuerza, presión, momento, momento cortante, entre otras (Ignacio-Martínez, Vázquez-Flores y Cruz-Castellanos, 2021).

Para la clasificación de los materiales existen varias versiones, que toman en cuenta diferentes factores, como el tipo de material, es decir, si es metálico o no metálico, si son conductores o no conductores, si son biomateriales o inclusive, si son materiales inteligentes, es decir, que pueden modificar sus propiedades bajo estímulos (Ignacio-Martínez, Vázquez-Flores y Cruz-Castellanos, 2021).

A continuación, se van a clasificar los materiales como metálicos y no metálicos, como se describe en la figura 2.12, ya que es la manera más apropiada de clasificar los materiales, estos se van a establecer como de primera categoría, posteriormente como de segunda categoría; dentro de los materiales metálicos, estos se clasifican como materiales ferrosos y no ferrosos. Los no metálicos también se clasifican como orgánicos y no orgánicos. Los metales ferrosos se componen principalmente de hierro, estos tienen buena resistencia a la tensión y dureza, estos materiales tienen la posibilidad de alearse con materiales como titanio, plata, estaño, vanadio y manganeso, estos materiales son propensos a la corrosión.

En cambio, para los materiales no ferrosos su resistencia a la corrosión es superior; sin embargo, tienen menor resistencia a la tensión y dureza, estos materiales en algunas ocasiones suelen ser más costosos. Además, son utilizados en la manufactura con más frecuencia, debido a que se pueden alearse con los metales ferrosos y así adquirir mejores propiedades físicas y de ingeniería (Guerrero, 2008).

Figura 2.12*Clasificación de los materiales*

Nota. Guerrero, 2008.

Los materiales no metálicos principalmente son de origen orgánico, algunos de ellos contienen células vegetales y animales, estos pasan por un proceso de disolución con líquidos orgánicos, estos materiales no llegan a tolerar altas temperaturas, algunos de ellos suelen tener demasiada flexibilidad, pero no adquieren altas resistencias mecánicas o de dureza.

Los materiales no orgánicos no proceden de células vegetales ni animales, algunos tienen la peculiaridad de disolverse en agua, algunos de ellos, como la cerámica, tienen la peculiaridad de resistir altas temperaturas.

La industria se ha encargado de modelar nuevas aleaciones de materiales debido a las aplicaciones que necesita en cada uno de sus procesos, por lo cual se han desarrollado técnicas especiales para su elaboración, esto se va realizando mediante el estudio, la experimentación y pruebas de ingeniería para su elaboración.

Así que para la innovación se tiene que considerar lo anterior, en conjunto con los costos de los materiales, económicos, de infraestructura y personal especializado.

2.6 Aluminio y sus aleaciones

El aluminio es un metal no ferroso el cual tiene la particularidad de realizar aleaciones ligeras para mejorar las cualidades del material, es de aspecto brillante, es un buen conductor eléctrico y térmico, contiene además de una resistencia alta, con una notable rigidez, resistencia al impacto y ductilidad (Alonso, 2008). Cuenta con una densidad de tan solo $2,7 \text{ gr/cm}^3$ menos que el del acero, también es más ligero, debido a que en un pie cubico de aluminio ronda en los 77 kg, su escala de dureza Brinell es de 52.

Además, tiene la facilidad de ser maleado, teniendo así la ventaja de ocupar dispositivos que no requieran generar demasiada fuerza para su transformación. Tiene la ventaja de ser fundido y colado a bajas temperaturas, cuyo punto de fusión en su estado puro es de los 660°C , a comparación del acero, que oscila entre los 1200°C y los 1600°C , dando así un ahorro de costos de producción (Maffia, 2013).

Entre los tratamientos que se hacen al aluminio se encuentra el endurecimiento, donde a través de patentes de MBW, que consta de aleaciones de aluminio sin cobre, y el EW para la obtención de menos desgaste y erosión por fricción. Otro tratamiento se define por el cromado donde se recubren con cobre y zinc, alcanzando 1400 de dureza Brinell. El niquelado consta de un acabado ligeramente amarillo, tiene una dureza Brinell de 150 y 200. Para el fosfatado solo sirve como recubrimiento superficial y evita alguna oxidación atmosférica.

Por lo general, las aleaciones del aluminio se dividen en dos categorías, las cuales son por forjado y por fundición. Esto tomando en cuenta los mecanismos para la obtención de sus propiedades mecánicas finales, es decir, en las diferentes fases como el temple, solubilizado, recocido y endurecimiento por precipitación. Para la identificación del tipo de aleación de aluminio se adopta un sistema numérico de cuatro dígitos, como se muestra en la tabla 2.3, que son usados por forjado y fundición, para el forjado en donde el primer dígito menciona el grupo de aleación, el segundo dígito indica las modificaciones realizadas sobre la aleación o en su defecto, los límites de impurezas. Por último, los últimos dos dígitos se identifican como la aleación de aluminio o su pureza.

Tabla 2.3*Sistemas de designación de aleaciones de aluminio*

Tipo de aleación	Designación de dígitos aleaciones
Aleaciones forjadas	
99.00% aluminio	1XXX
Cobre	2XXX
Manganeso	3XXX
Silicio	4XXX
Magnesio	5XXX
Magnesio y silicio	6XXX
Zinc	7XXX
Otros	8XXX
Aleaciones de fundición	
99.00% aluminio	1XX . X
Cobre	2XX . X
Silicio con cobre y/o magnesio	3XX . X
Silicio	4XX . X
Magnesio	5XX . X
Zinc	6XX . X
Estaño	7XX . X
Otros	8XX . X

Nota. Maffia, 2013.

A continuación, las aleaciones por fundición se designan de la siguiente manera, donde el primer dígito indica el grupo de aleación, después los dos dígitos auxilian el identificar la composición en particular, el cero después del punto decimal identifica el producto como una fundición.

2.7 Procesos de fundición de metales y aleaciones

El proceso de fundición de los metales es de los más antiguos que se han registrado, básicamente este proceso consiste en transformar el metal de un estado sólido a uno líquido, por medio de la aplicación de calor a altas temperaturas, de tal forma que el metal en su nuevo estado se logre verterse en un molde con la forma y tamaño deseado, para que así, por medio de la solidificación, adquiera sus propiedades mecánicas.

El molde donde es vertido el material líquido básicamente es de arena, donde adquiere su forma a través de una pieza elaborada a mano de madera o de alguna en fibra de vidrio, esta es apisonada de manera manual o en su defecto, por algún mecanismo, se deben considerar los factores para realizar una fundición, como son de la composición, temperatura de fusión y tensión superficial del metal fundido (Vázquez Padilla, 1992).

2.7.1 Tipo de hornos utilizados en la fundición

Para la obtención de este proceso es necesario un horno, que es el encargado de calentar a altas temperaturas el material a fundir; los hornos se administran por el modo de calentamiento, por el recubrimiento refractario en la cámara de fusión y por la atmósfera en la que se aplica. En la tabla 2.4 se mencionan los principales hornos, el tipo de combustible que necesita, el refractario que necesita, la atmósfera en la que es empleada y algunas de sus aplicaciones.

Tabla 2.4*Hornos utilizados en la fundición*

Tipo de horno	Combustible	Tipo de refractario	Atmósfera disponible	Aplicaciones
De aire o dereverbero	Gas natural, aceite	Acido		Hierro fundido maleable, metales noferrosos
Convertidor Bessemer	Aire			Refinado delarrabio
Alto horno	Coque			Arrabio
Cubilote	Coque	Básico		Hierro fundido, cobre
De crisol	Gas, aceite, coque	Grafito o carburo de silicio		No ferrosos
De arco directo	Electricidad	Acido o básico	Al vacío o con gasinerte	Acero
De arco indirecto	Electricidad			Hierro fundido, metales no ferrosos
De inducción	Electricidad	Ácido obásico	Al vacío o con gas inerte	Aleaciones especiales no ferrosas, hierros fundidos, metalesde gran pureza
De hogar abierto	Gas natural, coque, gas dehorno, carbón, aceite	Ácido obásico		Acero
Convertidor desoplo lateral	Aire	Ácido obásico		Colados de aceroal carbono y aleado

Nota. Vázquez Padilla, 1992.

Cada uno de los tipos hornos de los hornos va en función de las necesidades de las piezas a fundir, donde encontramos que su combustible va desde la ventilación por aire, electricidad, gas natural, carbón, aceite y coque.

Los hornos de reverbero son de los más antiguos de Europa y posteriormente trasladados a América donde se dio el uso para la producción de la plata; se compone por tres cuerpos, el primero por la cámara de fuego, el segundo la cámara de trabajo abovedada y por último su chimenea. Se basa en poner los metales en la cámara de fuego donde tienen contacto directo con la llama, la cual las cámaras del horno son elementos refractarios que ayudan a mantener su temperatura, el tiempo es muy prolongado hasta por cuarenta horas debido a que en la época solo era carbón (Cruz y Téreygeol, 2020).

El horno Convertidor Bessemer es patentado por el ingeniero Henry Bessemer, donde en 1856 descubre la forma de transformar en acero el arrabio obtenido de la reducción de mineral de hierro en el horno alto, mediante el giro de un recipiente de acero revestido de ácido. Donde se vierte el arrabio líquido en el recipiente, donde este se oxida a través del soplado de aire a presión transformándolo en acero puro. Se permitía la fabricación a grandes cantidades y bajos costos (Beldarrain-Calderón, 2017).

El alto horno consiste en la fusión para producir metales industriales como el hierro, también es utilizado para eliminar el oxígeno del mineral de hierro para obtener como producto final el arrabio. Consiste en introducir el combustible, el mineral y el fundente de forma continua por la parte superior del horno, donde una fuerte corriente de aire caliente es inyectada en la parte inferior del horno por medio de unas toberas, dando así una reacción química, debido a que el material fundente va descendiendo. Los metales fundidos y la escoria se vacían por debajo y los gases de escape son expulsados por arriba (García, 2017).

El horno cubilote es de lo más usados para la producción de fundición, su eficiencia térmica es ideal debido a que la carga metálica, el combustible y el comburente están en contacto por lo que permite un intercambio térmico directo.

Este consiste de una acoraza cilíndrica de acero revestida de materiales refractarios, además de una caja de viento y toberas para su admisión de aire, donde se encuentra fijo en una placa base sostenida por cuatro columnas de acero recubiertas por cimiento de concreto. Ya casi al llegar al fondo contiene aperturas para extraer el metal fundido y la escoria (López Ruano y Trejo Flores, 2013).

Un horno de crisol es de los más comunes de utilizar, debido a que su diseño suele ser un recipiente rectangular o cilíndrico elaborado por piezas refractarias unidas con piezas de acero del tipo estructural, por el cual se inyecta una mezcla rica de aire con gas a través de sus paredes, donde los gases son liberados por una chimenea, debe de contar con una solera que ayude a sostener el recipiente con la fundición. Estos hornos tienen la posibilidad de mejorar a través de sus aislantes térmicos, con la reconstrucción de sus paredes refractarias y la mezcla del aire con gas (Trujillo Roldán, 2005).

El horno de arco directo es alimentado principalmente de electricidad, del cual se emplean por tres electrodos (trifásico) y por dos electrodos (monofásico) que se utilizan para refundir; para el tipo monofásico es necesario un crisol que sea conductor (compuesto de grafito) para su función óptima. El electrodo actúa como el principal conductor entre la chatarra y el crisol, por el cual se genera un aumento significativo de temperatura que ocasiona que la chatarra se funda; su principal materia prima es la chatarra, cuya capacidad oscila los 500 kg hasta las 10 toneladas por trabajo.

Un horno de arco indirecto contiene principalmente los electrodos en horizontal sobre el metal por el cual es calentado por la radiación producida de los electrodos. Estos electrodos elaborados con grafito son alimentados por electricidad, el calentamiento se produce sin tener contacto con la carga, esto debido al calor generado de los electrodos (Henríquez Meneses y Aguilar Castro, 2016). Estos hornos eléctricos tienen la ventaja de manejar temperaturas controladas, debido a la precisión que manejan.

Un horno de inducción se utiliza para la producción de colados de acero aleado, esto es debido al control que mantiene en la fusión y en su composición. Es suministrado por medio de la corriente que es suministrada por la bobina, donde se refrigera por medio de agua que circula por el crisol, donde induce una alta corriente secundaria de carga.

Como consecuencia, la resistencia, con el paso de la corriente, hace que funda más rápido el metal llevándolo a la temperatura para su colado. Cuentan con hornos de inducción con capacidades de hasta cuatro toneladas, donde pueden fundir metales ferrosos y no ferrosos mencionados en la tabla 2.4.

Los hornos de hogar abierto son de los pocos que usan carbón, de los cuales queman arrabio para así producir acero, estos hornos pueden almacenar entre diez a quinientas cuarenta toneladas de metal en su interior. Debido a su fondo que es muy profundo, estos contienen chimeneas laterales para expulsar los gases y para calentar la mezcla de aire y combustible, su proceso es muy lento debido a las capacidades del horno y el tiempo para fundir el material (Duranguerrero, 2022).

Un horno de soplo es generalmente elaborado de una geometría rectangular en la base, para que este tenga una eficiencia, estos se refrigeran por agua, donde el crisol cuenta con dos filas de cajas refrigerantes, suelen tener una forma de tronco piramidal invertido, con una o dos toberas en los laterales de la base del horno. El material a fundir es vertido desde la parte superior del horno, donde pasa por el proceso de secado y precalentamiento, posteriormente atraviesa por una reducción indirecta sin fundir, más adelante, al ir bajando, alcanza su fusión donde alcanza temperaturas de hasta 1200°C, por último, se reduce de forma directa vertiéndose el colado en la base del horno (Galván Valle, 2017).

Por otra parte, los hornos de combustión a gas – aire han sido usados para el procesamiento de materia prima metálica con temperaturas de fusión inferiores a 1400°C, mediante la técnica de fundición en molde de arena, el cual es descrito en la siguiente sección.

2.7.2 Fundición en molde de arena

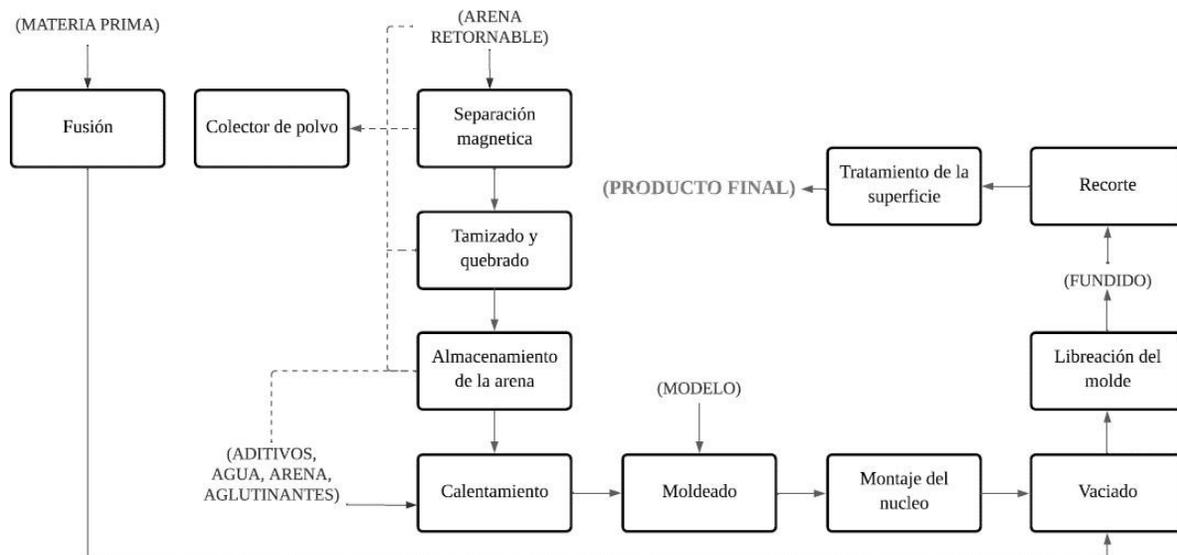
Para realizar la obtención de una buena pieza de fundición, existen diferentes variantes como se visualiza en la figura 2.13, de los cuales se debe tomar en cuenta como es la obtención de la materia prima, la selección de la arena cuya función es la obtención de la pieza a elaborar, el montaje del núcleo, el colado del material vertido en el molde, posteriormente la obtención de la pieza fundida, el recorte de la pieza con los excedentes considerados y si es necesario la aplicación de algún tratamiento superficial.

Para realizar una buena fundición es necesario tener en cuenta el diseño de la pieza, para esto se elabora el modelo, ya sea de madera, fibra de vidrio, mecanizado o en su defecto por

filamento de PLA, a través de impresión 3D. Tiene la finalidad de dar una idea de cómo dimensionar el tamaño del molde, la cantidad de arena, el grado de contracción que el metal tendrá, los núcleos y las salidas del metal a fundir.

Figura 2.13

Procedimiento de elaboración



Nota. Galván Alatorre, 2009.

Una vez teniendo el modelo, se debe elaborar el moldeo, donde se reproduce el negativo de la pieza a fundir, de manera general se consideran dos tipos de moldeos: el transitorio y el permanente. El moldeo transitorio consiste en utilizar un bastidor, colocar el modelo dentro de la caja, además de agregar los hoyos de escape para la fundición, posteriormente verter la arena de fundición alrededor del modelo e ir comprimiendo la arena, una vez realizada la compactación se retira la pieza y los escapes, quedando así el negativo de la pieza. Este moldeo, una vez utilizado, se debe destruir debido a que se debe extraer el modelo ya fundido, para elaborar una pieza nueva es necesario rehacer el molde (Galván Alatorre, 2009).

El moldeo permanente consiste en que el negativo de la pieza a fundir se procesó en una serie de maquinados, este es elaborado generalmente de hierro fundido o de acero, o en su defecto, de coquilla.

A comparación del moldeo transitorio, este tipo de moldeo tiene la ventaja de ser utilizado por más de una vez, ahorrando así tiempo y material de elaboración, es más frecuente en el sector industrial, debido a que se deben producir en grandes lotes.

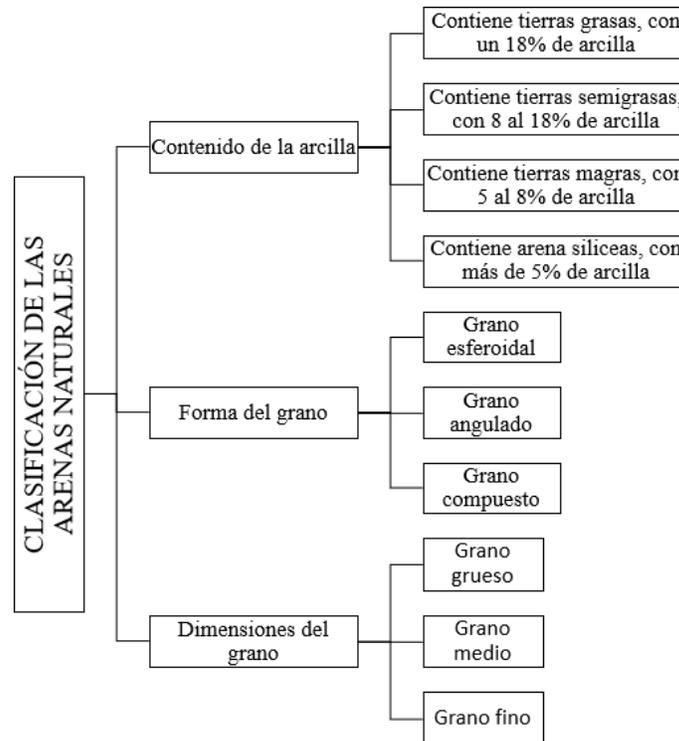
Los moldes que llegasen a perder su vida útil, son utilizados como materia de fundición y para los que están elaborados de coquilla, se les da un segundo uso para la elaboración de piezas más pequeñas.

2.7.3 Tipos de arenas para fundición

Para el moldeo transitorio, la arena que se utiliza debe tener características como la posesión y resistencia de ser moldeado, una parte debe ser plástica, debe soportar a las altas temperaturas en el momento de ser fundido, así como la permeabilidad de no deformarse o cambiar la geometría de la pieza y de la fragilidad de romperse cuando se necesite extraer la pieza fundida.

Algunas arenas se encuentran compuestas por granos de cuarzo que contienen bióxido de silicio y de arcilla compuestos por silicato hidratado de aluminio, permitiendo así el cumplimiento de las necesidades anteriormente mencionadas.

Estas arenas, mencionadas en la figura 2.14, tienen diferentes variantes que se deben tomar en cuenta, clasificándolas en tres: arenas con contenido de arcilla, en la forma del grano y las dimensiones del grano.

Figura 2.14*Clasificación de las arenas naturales*

Nota. Galván Alatorre, 2009.

2.8 Procesos de remoción de material

Al proceso de remoción de material se le conoce como el conjunto de operaciones que se realizan para dar la forma que necesita una pieza, esto a través de la eliminación del material no necesario, este material en exceso se remueve por medio de la viruta, este proceso se ha realizado principalmente en materiales como metales, plásticos, cerámica y madera.

La remoción de los materiales se clasifica en dos categorías: procesos habituales y procesos no habituales. Los procesos habituales son los que se emplean mediante herramientas que cuentan con un filo cortante, donde generan las virutas en el momento de hacer contacto con

el material. Esta herramienta va a moverse a través de un giro o por el contrario, a través del giro de la pieza, estos a una velocidad controlada.

Esta viruta se desprende de la pieza generando la geometría y especificaciones necesarias, algunos procesos en los que se utilizan son el torneado, el fresado, el taladrado y el rectificado (González, González y González, 2018). Estos procesos cuentan con algunas ventajas, como la precisión, la calidad superficial y la oportunidad de maquinarse materiales con altos grados de dureza. Esta precisión tiene la capacidad de obtener las dimensiones y especificaciones requeridas de la producción. La calidad superficial es debido al acabado y a la rugosidad que se obtiene de la pieza cuando se realiza un maquinado.

Estos procesos habituales presentan algunas desventajas como el tiempo, el desperdicio y el desgaste generado de las herramientas. Para el factor del tiempo se refiere a la cantidad de tiempo que se necesita para realizar el maquinado de una pieza, esto a través de la velocidad de corte, de la profundidad a maquinarse y del avance de la herramienta. El desperdicio del material que se elimina es a través de la viruta que es desprendido del material, esta viruta no es aprovechada netamente del material para nuevos procesos. Al desgaste de las herramientas se conoce como el deterioro que tienen las herramientas, esto es a través del alto contacto que tiene con el material, como consecuencia generando una reducción de su vida útil, afectando la calidad de cada uno de los maquinados.

Los procesos no habituales se emplean en otras formas de energía, como el calor, la electricidad o por ondas sonoras, donde ayuda a eliminar el material sobrante sin generar virutas. Las formas de energía se centran en un punto donde se genera un aumento de temperatura que funde o en su momento vaporiza el material, este material fundido o vaporizado se termina separando de la pieza y eliminando del área de trabajo; en las últimas décadas se han innovado dispositivos con estos procesos, los cuales son el corte por láser, el ultrasonido y del electro-erosionado (Pandey y Shan, 2016). Algunas ventajas en los procesos no habituales son la ausencia de virutas, la ausencia de contacto con la herramienta y el material, así como la posibilidad de realizar maquinados de materiales que suelen ser frágiles o inclusive sensibles al calor. Para la ausencia de virutas, se da a entender que no se genera

un gran desperdicio en forma de virutas, teniendo así una reducción de costos y la generación de desperdicios.

Con respecto a la ausencia de contacto entre la herramienta y el material, se refiere al aumento de la vida útil, ya que no presentan desgastes, además de la calidad del maquinado. Y para el maquinado de los materiales frágiles, estos ayudan para realizar trabajos que presentan una baja resistencia al impacto, donde se llegan a deformar con el calor.

Sin embargo, estos procesos no habituales presentan desventajas como el alto consumo energético, un alto costo al inicio, debido a los costos de adquisición, instalación y capacitación. Además de los riesgos de salud que se presentan y de los factores de seguridad que conlleva el manipular estos dispositivos, también existen riesgos en el alto consumo energético, centrado en la electricidad y el combustible utilizados en grandes cantidades.

El costo también influye en el precio tan elevado del dispositivo, como en los programas de mantenimiento, además de las herramientas que necesitan, ya que estas son especiales en su aplicación. Y para los factores de seguridad, el operador está expuesto a las formas de energía como descargas eléctricas, quemaduras e inclusive daños auditivos.

2.8.1 Principios básicos del torno paralelo

El torno convencional se conoce como una máquina-herramienta que permite mecanizar piezas con una forma geométrica de revolución, cuya simetría es a través de su propio eje. Las piezas a maquinar suelen ser de tipo cilíndricas, helicoidales, cónicas o en su defecto, formas complejas. Este mecanizado es por medio de la eliminación del material sobrante de la pieza, a través del auxilio de una herramienta de corte donde se desplaza a lo largo y la superficie de la pieza, esto por medio del giro de su eje. Este dispositivo funciona por medio de la herramienta y del avance de manera manual o semi automático, esto auxiliado por manivelas y palancas de la máquina (ASTM International, 2012).

Estas máquinas generalmente están compuestas por su bancada, el cabezal, contrapunto, carro principal, el carro transversal y la torreta portaherramientas. A continuación se describe cada una de las partes, comenzando por la bancada, que es conocida como la estructura que soporta y termina alineando el resto de los componentes.

El cabezal se conoce como el dispositivo que permite girar la pieza, esto mediante el chuck que permite sujetar la pieza. El contrapunto se encarga de apoyar y centrar el otro extremo de la pieza, esto debido a que las piezas a maquinar necesitan un punto de apoyo que ayuden a no generar vibraciones en la pieza.

El carro principal consiste en el mecanismo que realiza el desplazamiento longitudinal de la herramienta a lo largo de la pieza a maquinar. El carro auxiliar consiste en el mecanismo que ayuda a inclinar la herramienta y realiza maquinados cónicos o con algunos ángulos que se necesite realizar. El carro transversal consiste en el mecanismo que da el desplazamiento radial de la herramienta hacia el eje de la pieza montada. Y la torreta tiene la función de dar soporte de fijación de la herramienta de corte.

Un torno convencional tiene la facilidad de realizar diferentes operaciones de mecanizado, como mecanizado, cilindrado, refrentado, roscado, mandrilado, escariado, moleteado, taladrado y ranurado. En las operaciones mencionadas es necesario seleccionar de manera eficiente la herramienta de corte, el material de la pieza, las condiciones del corte y los parámetros geométricos a maquinar. También se deben tomar en cuenta las condiciones de corte, como son la velocidad de corte, el avance y la profundidad de corte de la pieza a maquinar (ASTM International, 2012).

La velocidad de corte se conoce como la velocidad tangencial con la que la superficie de la pieza a desbastar pasa por el mismo filo de la herramienta. Para realizar su cálculo se usa la ecuación 2.8

$$V_c = \pi DN$$

Ec. 2.8

Donde la velocidad de corte “ V_c ” se expresa en metros por minuto (m/min), el diámetro de la pieza “ D ” en metros (m) y el número de revoluciones por minuto del cabezal “ N ” (rpm). El parámetro del avance se conoce como la distancia en la que avanza la herramienta en la superficie de la pieza, el cálculo a realizar se representa por medio de la ecuación 2.9.

$$f = \frac{S}{N} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Donde el avance “ f ” se expresa en milímetros por revolución (mm/rev), la velocidad de avance “ S ” se expresa en milímetros por minuto (mm/min) y el número de revoluciones por minuto del cabezal “ N ” (rpm).

Además, la profundidad de corte se conoce como la distancia radial que corta la herramienta en la superficie de la pieza. Para el cálculo del tiempo de maquinado se necesita el cálculo por medio de la ecuación 2.10.

$$T = \frac{L}{fN} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Donde el tiempo de maquinado “ T ” se representa en minutos (min), la longitud de mecanizado “ L ” en metros (m), el avance “ f ” en milímetros por revolución (mm/rev) y el número de revoluciones por minuto del cabezal “ N ” (rpm).

Las ecuaciones mencionadas ayudan a optimizar el tiempo de mecanizado de las piezas a realizar, y así poder optimizar las condiciones del corte del material, para que así obtener una mejor eficiencia de calidad de acabados y de productividad. Lamentablemente se deben considerar más factores en el mecanizado de una pieza, como son el tipo y el estado de la herramienta a ocupar, el material y la geometría de la pieza a maquinar, como la rigidez y la potencia de la misma máquina, la lubricación y el refrigerante de la pieza, y de las normas de seguridad que demanda el uso de la máquina (ASTM International, 2012).

2.9 Herramientas computacionales para simulación numérica de procesos de manufactura

La simulación de los procesos de manufactura consiste en la técnica que permite analizar y optimizar el comportamiento de los sistemas a través del uso de los modelos matemáticos y de las herramientas computacionales que existen en la actualidad. Tiene como objetivo el mejorar la eficiencia, la calidad y la competencia en los procesos de producción, donde se busca también reducir costos, tiempos y riesgos que se puedan presentar.

La simulación numérica de los procesos de manufactura además se aplica en diversos procesos, como el maquinado, el modelo, forjado, corte, ensamble, maquinado, entre otros. En lo mencionado anteriormente, la simulación numérica necesita de herramientas computacionales que permitan crear y resolver los modelos matemáticos donde se representen los fenómenos físicos involucrados en estos procesos, las herramientas suelen ser de diferentes tipos, como software del uso comercial, libre sin licencias o permisos, propios e innovadores de acuerdo a sus necesidades y del tipo híbrido. Se debe considerar, al momento de elegir algún software, la facilidad de uso, la capacidad de modelado de los procesos, la precisión, la velocidad para realizarlo, la flexibilidad de realizar modificaciones, la compatibilidad de los procesos y el costo de adquisición (ASTM International, 2012).

Las herramientas computacionales que se utilizan para simulación numérica de los procesos de manufactura en la actualidad son FlexSim, Aspen Plus, CHEMCAD, ProModel y Tecnomatrix Process Simulate, que se irán describiendo a continuación:

FlexSim se considera como un software de uso comercial que permite la simulación de cualquier tipo de sistemas de manufactura, logística, manejo de materiales, entre otros, este se basa en el principio de arranque de viruta donde se permite la construcción de modelos de simulación en 3D con un alto detalle de los procesos en tiempo real, ofrece además analizar los datos obtenidos por medio de reportes y gráficos.

Aspen Plus es un software comercial donde que permite simular los procesos industriales que involucran reacciones químicas, separaciones físicas, además de transferencias de calor y de masa de los procesos de producción. Es utilizado en el diseño y optimización de las plantas químicas y petroquímicas que existen en la actualidad, también como en diversas herramientas analíticas en el ámbito económico y ambiental.

CHEMCAD se considera como un software de uso comercial que permite la simulación de los diferentes procesos industriales que involucran fluidos, sólidos y gases principalmente; es utilizado principalmente en el diseño y la optimización de plantas químicas, farmacéuticas y del área alimenticia. Permite además de la interfaz gráfica intuitiva y flexible de los procesos, también diferentes opciones del cálculo de las propiedades físicas y químicas que se han establecido hoy en día.

ProModel es también un software comercial que permite realizar la simulación de los procesos industriales de manera discreta o de número finito de los estados, es utilizado en el análisis y en la mejora de los sistemas de producción más complejos, como son las líneas de ensamble, los almacenes o las redes logísticas. También permite crear modelos dinámicos o estocásticos de animación en 2D y en 3D.

Tecnomatrix Process Simulate es considerado un software de uso comercial que permite simular los procesos industriales en un entorno tridimensional, que se utiliza en la verificación y la validación de los procesos de manufactura en donde se ven involucrados los robots, las máquinas-herramientas o los sistemas automatizados. Da la oportunidad de ingresar datos del tipo CAD y de tipo PLC, que permiten realizar análisis de tipo ergonómicos y energéticos.

La simulación numérica de los procesos de manufactura se considera la técnica de análisis y optimización del comportamiento de los sistemas de producción, a través del uso de los modelos matemáticos y de las herramientas de software mencionadas anteriormente, que mejoran la eficiencia, la calidad y la competitividad de los procesos de manufactura que hay en la actualidad, donde se busca reducir costos, tiempos y riesgos que generan estos procesos.

2.10 Manufactura aditiva

La manufactura aditiva (MA) es una la técnica de fabricación para crear objetos tridimensionales por medio de un modelo digital, que se logra a través de la adhesión sucesiva de capas de materiales, a diferencia de los procesos de remoción de material, que son basados en la eliminación o en la deformación del material para obtener la forma deseada.

La MA tiene como ventajas la personalización, la complejidad, la reducción de los desperdicios y la optimización de los recursos. Como desventajas se presentan los inconvenientes de calidad de estandarización, de propiedad intelectual y seguridad. También basa su funcionamiento mediante el uso de software 3D e inclusive en escaneo 3D, donde se genera un archivo digital que representa la pieza a elaborar. Estos archivos se van dividiendo por secciones transversales que van indicando el contorno y el relleno del objeto.

Posteriormente este archivo es enviado a una máquina que se encarga de su elaboración por capas de acuerdo a las indicaciones establecidas del archivo. Estos materiales están compuestos de plástico, metal, cerámica, resina, biomaterial, con la finalidad que sea procesado por el dispositivo. Lo que se obtiene finalmente es una pieza en estado sólido que se reproduce como en el diseño de la pieza original (Gibson, Rosen y Stucker, 2015).

La manufactura aditiva se clasifica principalmente en siete tipos, que depende del mecanismo de formación de capas y del estado del propio material, los cuales son el modelado por deposición fundida, la estereolitografía, el sinterizado selectivo por láser, la fusión selectiva por láser, de chorro aglutinante, por chorro de material y laminado por ultrasonido.

El modelado por deposición fundida (FDM) consiste en la extrusión de un filamento del tipo termoplástico, donde a través de una boquilla calentada previamente, se va moviendo sobre una plataforma dependiendo del patrón de cada una de las capas, este material una vez solidificado se va uniendo con la capa anterior (TecScience, 2020).

La estereolitografía (SLA) tiene la función de solidificar una resina líquida fotosensible a través de un haz de luz ultravioleta, que se proyecta sobre una plataforma según el patrón de cada capa a trabajar, este material se va endureciendo cuando recibe la luz y posteriormente se une a la capa anterior.

La sinterización selectiva por láser (SLS) es la fundición selectiva de un polvo de tipo termoplástico o metálico por medio de un láser que se dirige encima de una plataforma dependiendo del patrón de cada capa a realizar, este material se solidifica en el momento que se va enfriando y se va uniéndose con la capa anterior.

La fusión selectiva por láser (SLM) tiene la función de fundir completamente un polvo del tipo metálico a través de un láser que se dirige en una plataforma de acuerdo al patrón de cada una de las capas, este material se va solidificando y uniéndose con la capa anterior. El chorro de aglutinante (BJ) consiste en aglomerar de manera selectiva un polvo de tipo cerámico o metálico, mediante un agente aglutinante que se inyecta a través de una boquilla que se mueve en una plataforma de acuerdo al patrón de cada capa, este material se va sacando y uniéndose con la capa anterior.

El chorro de material (MJ) tiene la función de depositar gotas de material fundido o de un fotopolímero, que a través de una boquilla, se va moviendo sobre una plataforma de acuerdo al patrón de cada una de las capas a elaborar. Este material se va solidificando en el momento de enfriarse o en su defecto, al recibir la luz ultravioleta, donde se va uniéndose en la capa anterior.

El laminado por ultrasonido (UL) funciona a través de la soldadura de láminas metálicas a través de vibraciones ultrasónicas que se aplica también sobre una plataforma de acuerdo al contorno de cada una de las capas a trabajar, este material se va cortando por medio de una cuchilla y se une con las capas anteriores.

Algunas aplicaciones que tiene la manufactura aditiva van enfocadas en algunos sectores

industriales como el aeroespacial, en donde son utilizados en la fabricación de componentes estructurales, motores, turbinas, antenas y satélites cuyos materiales suelen ser ligeros y resistentes, ya que permiten reducir el peso, el consumo de los combustibles y de las emisiones que generan.

En el sector automotriz es utilizado en la fabricación de las piezas de la carrocería, el chasis, de la transmisión, suspensión y frenos, con materiales compuestos y funcionales, donde se permite mejorar el rendimiento, su seguridad y en la eficiencia de los vehículos en el desplazamiento. Para el sector biomédico, se utiliza en la fabricación de prótesis, tejidos artificiales e implantes, que permiten la restauración o mejoras de las funciones biológicas de las necesidades de los pacientes.

En el ámbito de la arquitectura es utilizado en la elaboración de estructuras, fachadas, el mobiliario y la decoración con materiales que dan una originalidad y personalización en el ambiente solicitado. También es usado en la fabricación de modelos, maquetas y prototipos de temas relacionados en la educación, donde se fomenta el aprendizaje y la creatividad. La manufactura aditiva debe superar algunos objetivos para el desarrollo y su difusión, como es la calidad que debe garantizar precisión, resistencia, durabilidad y funcionalidad de los objetos fabricados mediante la manufactura aditiva, con la finalidad de evitar las grietas y porosidades causadas en el proceso.

Así como en la estandarización para establecer las normas y protocolos que ayuden a regular los aspectos técnicos, legales y éticos. Además, busca la necesidad de minimizar los riesgos para la salud y el medio ambiente, debido al desperdicio generado, la exposición a los materiales tóxicos o radioactivos (TecScience, 2020).

2.10.1 Impresión 3D

La impresión tridimensional se considera como un proceso de fabricación aditiva donde se crean objetos en tres dimensiones a partir de un modelo digital, esto se va depositando a través

de capas sucesivas de un material plástico. Este avance tecnológico ofrece algunas ventajas de rapidez en la elaboración del modelo, como también de la personalización del objeto, así mismo permite crear piezas con un grado de complejidad superior a la de algún otro proceso de mecanizado, y además permite utilizar una gran variedad de materiales para su elaboración, que van desde plásticos, metales no ferrosos, hormigón o en algunos casos tejido (ADSLZone, 2023).

La impresión en 3D abarca desde los sectores de la ingeniería, la medicina, la arquitectura hasta en ámbitos de arte. Esta tecnología surge a través de los años 80's, como una técnica de prototipado rápido enfocado al diseño industrial. A partir de ese momento se fue revolucionando e innovando en diferentes métodos de impresión, basados en distintos principios físicos y químicos.

Estos métodos de impresión tridimensional son FFF (fabricación de filamento fundido) o FDM (modelado por deposición fundida), donde se utilizan bobinas de filamento plástico que funden y se depositan en una base; la SLA (estereolitografía) se solidifica a través de una resina fotosensible mediante un láser o una luz ultravioleta; el PBF (fusión de lecho de polvo) se fusiona partículas de polvo metálicos o de plásticos a través de un láser o haz de electrones (Autodesk, 2023).

Las principales aplicaciones de la impresión tridimensional llegan a ser variadas y abarcan desde la creación de prototipos hasta la producción masiva de piezas, como en la fabricación de piezas ligeras y complejas de la industria aeroespacial y automotriz.

Además de la creación de implantes médicos personalizados como en la reconstrucción ósea, así como la elaboración de herramientas, calibradores y accesorios para el mecanizado o el modelo de inyección y de los patrones de fundición de metal para objetos de grandes porciones.

Los materiales donde se utiliza la impresión en 3D dependen del método y del objeto que se requiere elaborar, materiales más comunes son los plásticos como el PLA, ABS y el PETG o

nylon, donde utilizan el método FFF y el FDM, ofreciendo estos una resistencia, flexibilidad y con una variedad de colores. Para los metales como el acero, aluminio, titanio o cobre utilizan el método PBF, ofreciendo así una resistencia, durabilidad y conductividad. Para las resinas, como el fotopolímero, se utiliza el método SLA, ofreciendo buena precisión, transparencia y acabado superficial. En otros materiales se puede usar la impresión tridimensional como el hormigón, cerámica, madera o tejido vivo (DassaultSystèmes, 2023).

La impresión en 3D se considera una tecnología innovadora que permite elaborar objetos tridimensionales con formas complejas y de diversos materiales, por medio de la adición de capas sucesivas, así se ofrece rapidez, personalización y reducción de costos y residuos que genera este proceso.

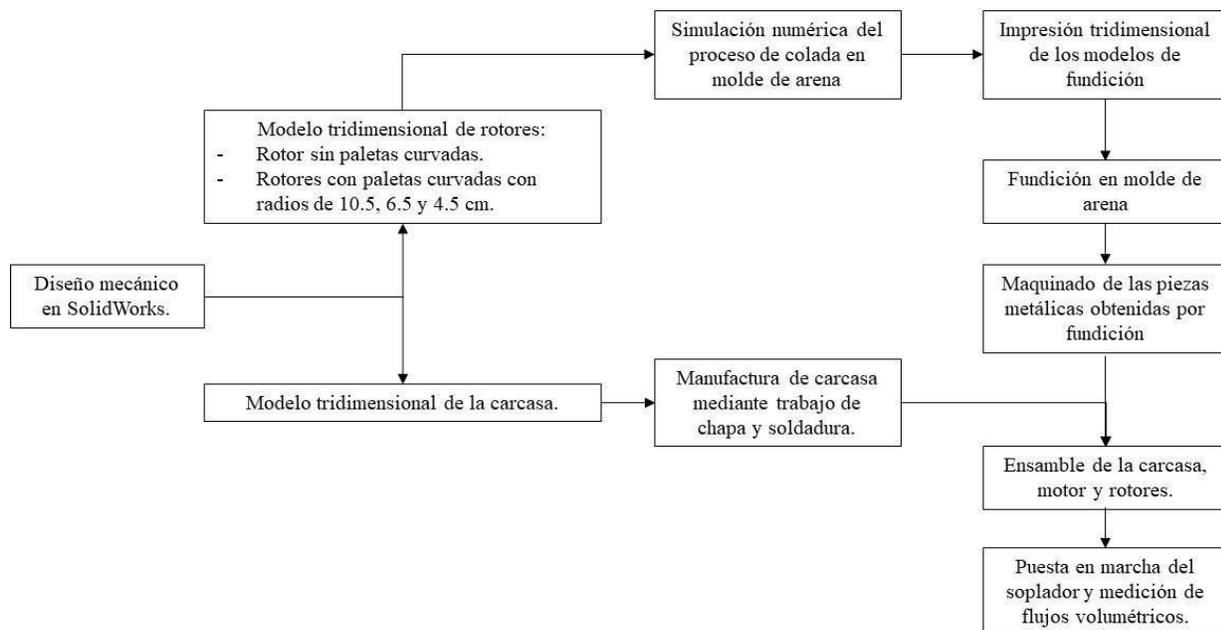
Para la elaboración de los modelos de los sopladores de las aspas, se implementó primero la elaboración de las diferentes piezas en un modelo de diseño, donde posteriormente se elaboraron de una impresora en 3D, utilizando un material de filamento plástico del tipo PLA.

CAPÍTULO 3. PROPUESTA DE INTERVENCIÓN

Fue establecido un procedimiento experimental de acuerdo a los objetivos establecidos en el capítulo 1 del presente trabajo. El diagrama de flujo mostrado en la figura 3.1 va describiendo el procedimiento por el cual se fue desarrollando cada uno de los rotores, como se indica que la primera etapa de la experimentación consistió en realizar el diseño mecánico del soplador en el programa informático SolidWorks. Este programa fue útil para la elaboración de los modelos tridimensionales correspondientes a la carcasa y los rotores. Para la carcasa se consideró la introducción de rotores de 18.50 cm de diámetro, 7 cm de altura y 8 palas. Por otra parte, los rotores fueron diseñados respecto a las siguientes condiciones: un rotor con paletas rectas y 3 rotores con paletas curvadas (10.5, 6.5 y 4.5 cm).

Figura 3.1

Diagrama de flujo.



Por otra parte, la simulación del comportamiento del metal líquido, al ingresar al molde de arena, fue considerada para determinar el llenado completo del molde de arena en la manufactura de los rotores mediante la técnica de fundición en molde de arena en el programa informático Procast. Posteriormente, los modelos de fundición fueron elaborados mediante el uso de una impresora marca Creality CR-10 y filamento polimérico, PLA.

Cada uno de estos modelos llevaron aproximadamente 25 horas de impresión; una vez elaborados, se revisaron si no llegaron a presentar alguna anomalía en el proceso, como puede ser en la curvatura de las paletas, alguna cavidad en las superficies o alguna deformación que afectara la estética del modelo. Más adelante estos modelos se resanaron superficialmente, esto con la finalidad de corregir la calidad superficial de los modelos y no se vea afectado al momento de realizar la fundición, como consecuencia se obtengan irregularidades que no sean posibles corregir en un futuro.

Para la siguiente etapa, en la fundición de los modelos fueron usados para la elaboración de moldes no permanentes de arena, con la finalidad de poder reutilizar la arena para la fundición de los nuevos modelos, además tiene la opción de poder realizar alguna corrección en la elaboración del molde, esto debido a que se pueden generar pequeños derrumbes durante su traslado al área de fundición de los cuales permitieron depositar aluminio líquido para la obtención de piezas fundidas.

Una vez obtenidos los modelos de los rotores de aluminio, para la siguiente etapa fueron maquinados mediante procesos de remoción de material, de los cuales se incluyeron operaciones de torneado, taladrado, roscado y barrenado, esto con la finalidad de realizar el ajuste dimensional adecuado al modelo tridimensional establecido en la etapa de diseño y de las condiciones que lo establece el dispositivo de la carcasa donde será montado. Una vez obtenidos los modelos maquinados, se procedió a realizar el balanceo de las piezas, esto con la finalidad de no generar una vibración en el modelo en el momento de ser operado y no afectar las condiciones de uso del rotor.

Posteriormente, en la siguiente etapa fue realizado el ensamble de los componentes del soplador (motor, carcasa y rotor) para evaluar el flujo volumétrico generado por cada uno de

los rotores mediante la realización de mediciones con el uso de un anemómetro marca Waporich, modelo RQ-846A.

Para la obtención de los resultados se requirió establecer seis diferentes condiciones: la primera condición fue establecida con un área de succión de aire de 0.658 m^2 sin la conexión del tubo.

Para la segunda condición se tomó en cuenta un área de succión del aire de 0.329 m^2 sin la conexión del tubo que da al horno; para la tercera condición se tomó en cuenta el área de succión de aire de 0.658 m^2 con la conexión del tubo hacia el horno; para la cuarta condición se estableció el área de succión de 0.329 m^2 con la conexión del tubo hacia el horno, posteriormente para las últimas dos condiciones se desmontó la tapa reguladora de succión cuya área es de 1.316 m^2 sin tomar en cuenta la conexión del tubo que da al horno, y para la sexta condición sí se toma en cuenta la conexión del tubo que da al horno.

Las condiciones de posición que fueron establecidas anteriormente y de lectura se utilizaron para cada uno de los modelos manufacturados. Cada uno de los resultados fueron analizados y discutidos en función del trabajo experimental correspondiente a las etapas de diseño, manufactura y puesta en marcha del equipo. Los resultados obtenidos al implementar los diferentes rotores fueron determinados por el rotor con mejor desempeño en cuanto a la generación del mayor flujo volumétrico de salida del soplador centrifugo.

Los valores obtenidos de la velocidad de cada uno de los rotores con las diferentes condiciones se ven plasmados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1*Valores de velocidad registrados en cada una de las aletas y condiciones de posición*

Posición	Velocidad m/s					
	1° Condición	2° Condición	3° Condición	4° Condición	5° Condición	6° Condición
Aletas planas	23.66	25.30	21.97	23.25	23.33	22.98
Aletas curvas a 10.5 cm de radio	26.31	20.48	24.81	20.39	28.34	23.84
Aletas curvas a 6.5 cm de radio	27.13	21.02	23.82	21.17	28.17	25.69
Aletas curvas a 4.5 cm de radio	23.37	20.65	25.09	20.38	29.92	29.37

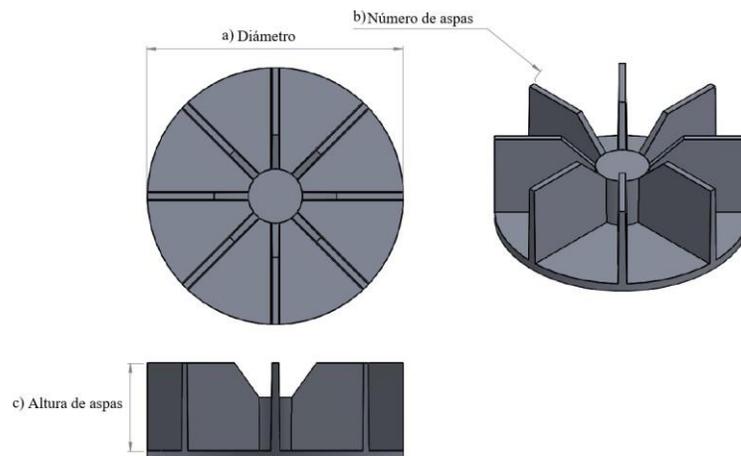
CAPÍTULO 4. RESULTADOS

4.1 Diseño mecánico del soplador

La figura 4.1 muestra un modelo tridimensional obtenido experimentalmente en el programa informático SolidWorks versión 2020. En el diseño de los rotores se consideró el diámetro principal de la base del soplador, el número de paletas y la altura de las aspas.

Figura 4.1

Consideraciones elementales para el diseño de un soplador.

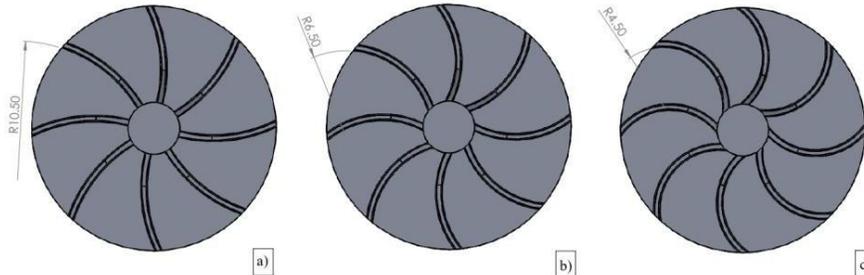


Dentro del programa de diseño mecánico, tomando en cuenta los parámetros de la geometría del rotor con 8 paletas planas, fueron establecidos tres modelos de rotores de 8 paletas curvadas. La figura 4.2 en el inciso a) el radio de curvatura es de 10.5 cm, para el inciso b) un radio de curvatura de 6.5 cm y para el inciso c) con un radio de curvatura de 4.5 cm.

Los modelos obtenidos en el programa informático fueron usados para generar archivos de código G para su impresión tridimensional en polímero, PLA, y lograr la obtención de los modelos de fundición. Estos últimos usados en la aplicación de la técnica de fundición en molde de arena.

Figura 4.2

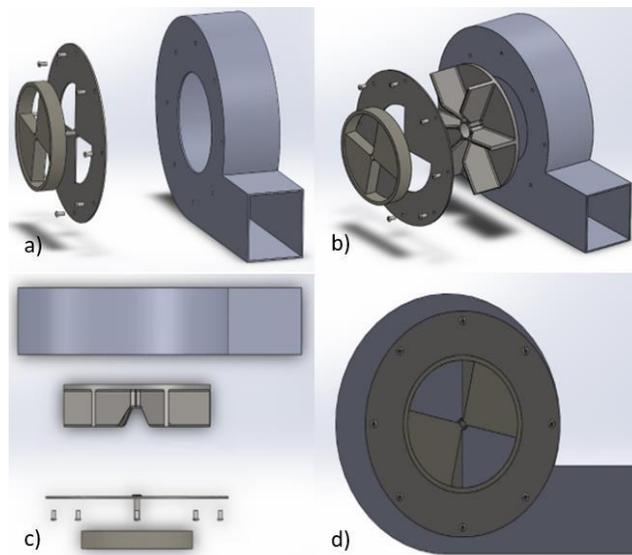
Curvaturas de las paletas en los rotores del soplador



La figura 4.3 muestra los modelos tridimensionales de las piezas diseñadas. Dicho resultado fue útil para prevenir problemas en el ensamble de las piezas. Además, sirvió para determinar las cantidades y geometrías de los materiales a procesar para su obtención.

Figura 4.3

Diseño de piezas y ensamble del soplador



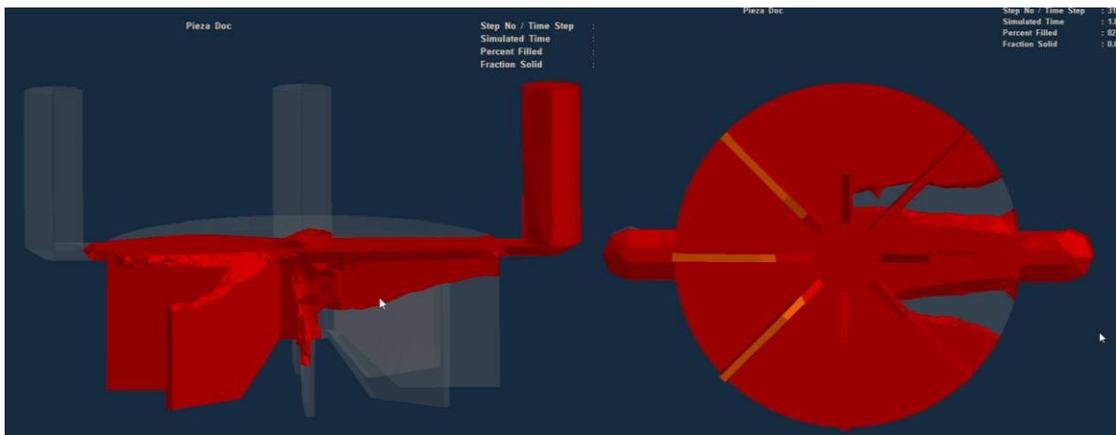
Nota. a) Vista explosionada de la carcasa y el regulador de aire, b) Vista explosionada de la carcasa, regulador de aire y rotor y c) Vista superior explosionada y d) Ensamble de las piezas.

4.2 Simulación numérica del proceso de colada

Con la finalidad de obtener piezas sanas mediante el proceso de fundición para la obtención de los rotores del soplador, se realizó la simulación del proceso de colada en moldede arena. De acuerdo a lo anterior, la aparición de defectos en las piezas fundidas puede aparecer en la superficie y también al interior del volumen del material, tales como rechupes, falta de llenado y porosidad. La figura 4.4 muestra la simulación del proceso de colada para la obtención de una de las aspas cuando inicia la entrada de material al molde. Mediante los resultados experimentales fue posible determinar que no llegasen a presentar problemas en el llenado de los moldes.

Figura 4.4

Llenado del molde por aluminio líquido.

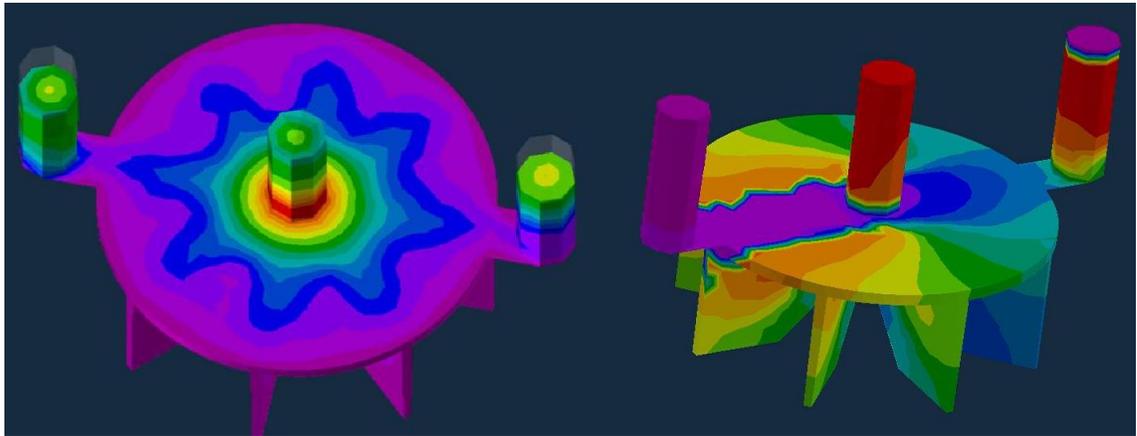


Los resultados de la simulación del proceso de solidificación mostrados en la figura 4.5, también sirvieron para determinar que la contracción volumétrica “rechupe” del material que ocurrió fuera de las piezas útiles. Esto de acuerdo al gradiente de temperatura indica que las zonas últimas en solidificar (en color rojo) se encuentra en la mazarota a una temperatura por encima de 625°C , mientras que las zonas de la pieza en color morado indican que sus temperaturas se encuentran a 400°C , aproximadamente, esto por ser las zonas más delgadas de la pieza.

Algunos de los parámetros usados en la simulación numérica en el proceso de colado fueron: molde de arena, aleación líquida de aluminio, colada por gravedad, coeficientes de transferencia de calor, tamaño del molde y flujo másico del líquido, principalmente.

Figura 4.5

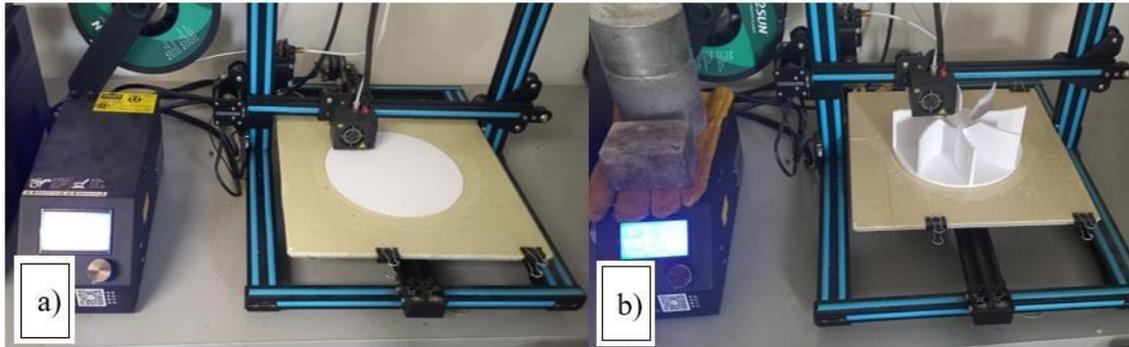
Simulación numérica del proceso de solidificación



4.3 Manufactura de los rotores del soplador

Una vez elaborados los modelos de cada rotor, fueron introducidos a una impresora de tipo 3D, donde a través de la extrusión del material PLA, cuyo diámetro del filamento es de 1.75 mm con una temperatura de fundición del PLA de 200 °C. Estos modelos estaban elaborados en un formato “SLDPRT” propio del programa, además se tiene la opción de cambiar al formato “STL” que son requeridos para la programación de la impresora 3D.

La manufactura de los rotores inició con la obtención de los modelos de fundición mediante la técnica de impresión 3D, esto de acuerdo a la figura 4.6. En el inciso a) se muestra la evolución de impresión del rotor con paletas curvadas con radio de 10.5 cm, comenzando con la base del soplador y en el inciso b) se muestra el proceso en su etapa. El tiempo promedio de impresión de cada modelo fue de 25 horas, debido a que las piezas se obtienen por medio de impresión por capas de 0.2 mm.

Figura 4.6*Impresión del modelo 3D.*

La figura 4.7 muestra los modelos de polímero impresos. Es posible observar la diferencia en los radios de cada rotor de mayor a menor radio de izquierda a derecha.

Figura 4.7*Modelos impresos*

4.4 Elaboración de los moldes de fundición

Una vez arreglados los modelos se procedió a la siguiente etapa, que consistió en la preparación de los moldes de cada uno de los modelos, para esto fue necesario del auxilio de dos cajas de moldeo de fundición, estos están elaborados de madera, siendo así más prácticos de maniobrar para la compactación de la arena con los modelos y en el transporte de los

mismos. Además, se consideró que era necesario utilizar dos partes para formar cada molde de acuerdo a las características de los modelos. Para la elaboración de los moldes fue necesario usar arena sílica y una arcilla, esta última sirve como ligante de las partículas de arena y conferir resistencia en verde al material compactado.

Un marco de madera fue colocado sobre una base plana en donde fue vertida la arena de fundición en los alrededores del modelo para ser compactada con un apisonador a través de pequeños golpes, esto teniendo como finalidad el amoldamiento el material particulado. La figura 4.8 muestra la primera parte del molde de arena. Una vez realizada la primera parte del molde, fue limpiada el área de trabajo y fue volteado, esto para colocar un segundo marco de madera que sirvió para la elaboración de la segunda parte del molde, al repetir el procedimiento de colocación de arena de fundición y su compactación.

Figura 4.8

Preparación de la primera parte del molde



Una vez que se tiene el molde en la posición adecuada, se verifica si no hay alguna anomalía de la arena con la figura, si llegase a tener alguna, es necesario volver a preparar el molde, esto con la finalidad de no presentar algún defecto en la fundición de la pieza. La figura 4.9

muestra la preparación de la segunda parte del molde, donde se tiene la preparación de la ubicación del escape de los gases, tales como aire y vapor de agua.

También el conducto para el ingreso del metal en la colada. Aparte de la consideración teórica estimada en la simulación con tres canales en el molde, fueron implementados dos canales más en el molde, para garantizar el desplazamiento de aire y vapores de agua, esto para asegurar que la colada del material fuese exitosa.

Figura 4.9

Preparación de la segunda parte del molde



El molde incluyó cuatro escapes de los gases, cuyo diámetro fue de 2.54 cm. y estos estuvieron ubicados en cada una de las esquinas del molde. Dichos conductos también sirven como alimentadores de material durante la contracción volumétrica del metal.

Figura 4.10

Acabado de la segunda parte del molde



La figura 4.10. muestra las dos partes del molde empalmados antes de retirar el modelo de fundición. Por tanto, ambas partes fueron separadas para retirar el modelo que se encuentra dentro de la primera parte del molde, para esto fue necesario retirar la segunda parte del molde, como se observa en la figura 4.11. En la misma figura se observa la cavidad generada al retirar el modelo que fue utilizado; una vez retirado, fue verificada la ausencia de derrumbes en el molde. Cabe mencionar que las características del molde determinan la geometría y posibles defectos en las piezas obtenidas.

Figura 4.11

Obtención del negativo de la primera parte del molde



Una vez obtenido de manera adecuada el negativo de las dos partes de los moldes, se realizó el detallado del negativo del primer molde, donde se ubicaron las cavidades para los escapes de los gases del segundo molde. Esto con la finalidad de que no presentaran algún problema en el momento de realizar la colada del líquido metálico.

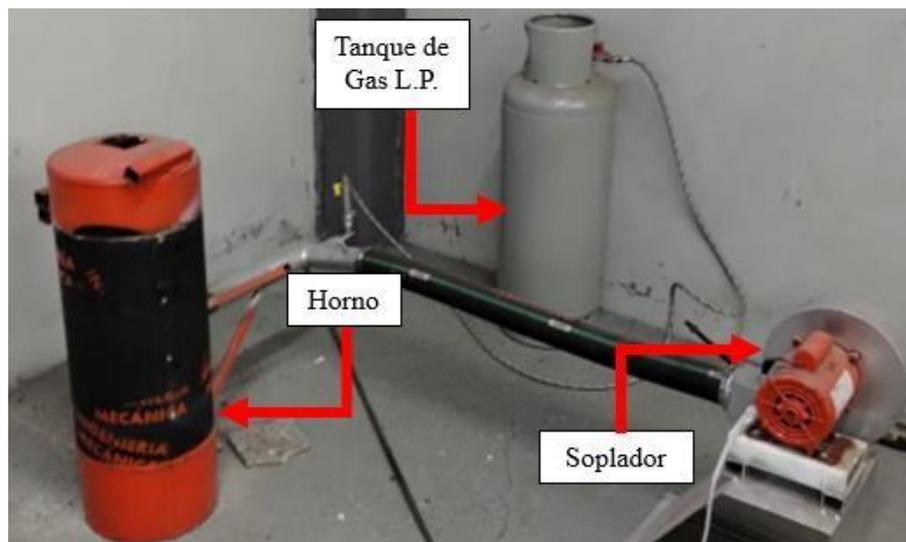
El proceso de preparación de los moldes para la fundición, como se mencionó anteriormente, fue el mismo para los otros modelos de soplador, donde se realizó la preparación de la arena, la preparación de la primera parte del molde, la elaboración de la segunda parte del molde y la obtención definitiva del negativo de ambas partes del molde. Para la obtención adecuada del mismo fue necesario inspeccionar durante el moldeo.

4.5 Fundición en molde de arena

Una vez preparados los moldes, se fundió el material metálico en un horno de combustión a gas L.P. y aire. El horno incluyó un soplador de aire, como se muestra en la figura 4.12. El horno tiene la capacidad de fundir metales no ferrosos con temperatura de fusión por debajo de 1300°C.

Figura 4.12

Horno de fundición.



Posteriormente, fueron preparadas las herramientas, utensilios y equipos de seguridad apropiadas para el proceso de fundición, donde se comenzó con el encendido del horno, calentando previamente el horno y cargando el aluminio al crisol. Cuando el material alcanzó 700°C, fue retirado del horno para ser colado dentro de las cavidades de los moldes, tal como se muestra en la figura 4.13.

Figura 4.13

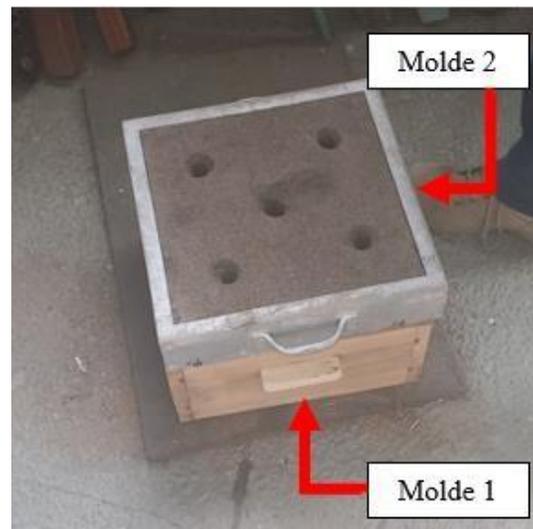
Gradientes de temperatura obtenidos mediante cámara termográfica.



Mientras se fue alistando el material, se colocaron los moldes cerca del horno, estos fueron trasladados a la zona donde se vertió el material líquido. La figura 4.14 muestra cómo se empalman ambas partes de un molde, se supervisó que las partes del molde se encontraran bien ensambladas para que no ocurriera una fuga de material entre las caras de estas.

Figura 4.14

Empalme de los moles previo a la fundición.



La exposición del metal a la atmósfera generó la formación de escoria, formada por óxidos de aluminio, que es menos densa que el metal, por esto flotó, quedando por encima del metal líquido, tal como se muestra en la figura 4.15.

Figura 4.15

Extracción de la escoria del material líquido.



La extracción de la escoria del crisol tiene la finalidad de purificar de lo que se va a verter en el molde donde se preparó, ya que, si se llega a verter con la escoria, la pieza no estaría constituida por material metálico al 100%, por tanto, las piezas estarían contaminadas.

La figura 4.16 muestra el momento previo al vertido del material al molde, donde se depositó por el centro del molde, esto con la finalidad de no generar alguna turbulencia y perjudicara la fundición. De acuerdo a la simulación de la solidificación del material, el colado del metal por el centro sería más correcta, debido a que es la última zona en solidificar. Durante el colado del material, que se muestra en la figura 4.17, se va desplazando el líquido a través de los conductos del molde, donde además se aprecian los orificios para el escape de los gases. Es crucial este proceso, debido a las altas temperaturas que presenta el material fundido, además de que existe el riesgo de que, si los moldes no se asentaron debidamente, se presentaría la fuga del material entre ambos moldes, dejando sin suficiente material para la obtención de las piezas.

Figura 4.16

Alistado la colada

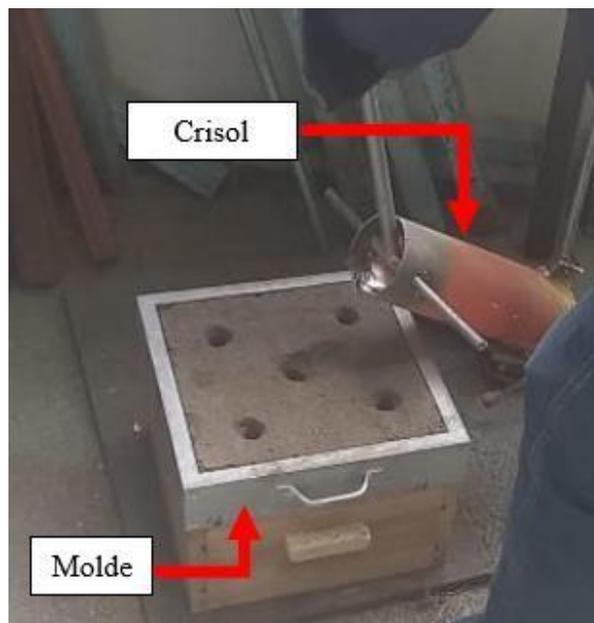


Figura 4.17*Colada del material***Figura 4.18***Solidificación del metal.*

Posteriormente, una vez que se terminó de realizar el colado, el material inició su solidificación. Una vez que el material alcanzó la temperatura ambiente, fue realizado el desmoldeo, tal como se observa en la figura 4.19. La figura anterior muestra que no hubo escape del material del molde, corroborando que empalmaron correctamente ambas partes del mismo.

Figura 4.19*Desmoldeo.*

Las piezas fundidas fueron limpiadas de la arena tenían impregnada en sus paredes, esto a través de las herramientas adecuadas. En la figura 4.20 se aprecia el acabado de la pieza fundida. Cabe mencionar que existieron algunos problemas con la resistencia en verde de la arena de fundición por falta de arcilla. Sin embargo, fue usada una cantidad de harina de trigo como ligante, por esto la superficie de las piezas obtuvo una tonalidad dorada.

Figura 4.20

Limpieza de la pieza fundida.

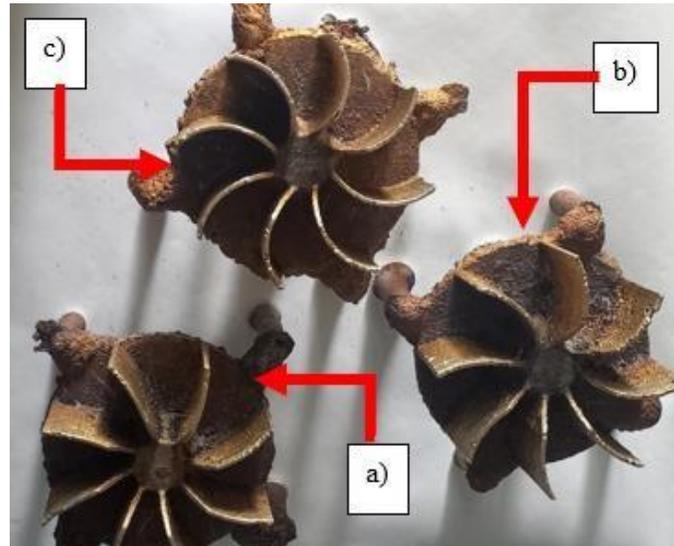


Las irregularidades superficiales de las piezas obtenidas fueron eliminadas mediante el proceso de maquinado. Mediante operaciones de taladrado fue realizado el balanceo de las piezas. Esto debido a que el material en las piezas no está exactamente distribuido al no obtenerse rectificadas. También, por la realización de la perforación y roscado de las piezas para su fijación en el eje del motor.

La figura 4.21 muestra las piezas fundidas que fueron obtenidas antes de su maquinado. Cabe mencionar que ocurrieron pequeños defectos superficiales en las piezas, debido al derrumbe de parte de la arena de los moldes. Esto podría evitarse al usar una cantidad mayor de ligante de la arena de fundición. Sin embargo, dichos defectos no fueron críticos para descartar la aplicación de las piezas.

Figura 4.21

Obtención de los modelos de la fundición



4.6 Maquinado de las piezas fundidas

Una vez obtenidas las piezas fundidas, se terminó de inspeccionar superficialmente para verificar que no se hubiese generado alguna anomalía en cada una de las piezas fundidas. La siguiente etapa consistió en el maquinado de las piezas, esto a través del desbaste superficial de la geometría de los rotores. Antes, se procede a eliminar el exceso del material de los escapes de fundición, esto a través del degollado de los mismos, más adelante se realizó el maquinado por medio de un torno paralelo.

La figura 4.22 muestra la sujeción de una de las piezas a maquinar, donde se realizó un careado en la parte superior del rotor. Para el centrado de las piezas, fue usado un cabezal de cuatro mordazas y un buril de alta velocidad. En el torneado, fue ajustada la velocidad del husillo del torno a 120 revoluciones por minuto. Aunque podría parecer un error maquinar la pieza a tan baja velocidad, no lo es, porque las ecuaciones para calcular los parámetros de maquinado consideran un corte material continuo en la superficie del material. Además, el impacto de la herramienta de corte podría deformar plásticamente las paletas de los rotores al ser maquinadas.

Figura 4.22

Montaje de la pieza al torno.



Las figuras 4.23 y 4.24 muestran el careado de las secciones transversales de una de las piezas. La figura 4.23 muestra el inicio del maquinado interior para la sujeción del eje del motor del soplador el careado y el uso de brocas de acero de alta velocidad. La calibración del interior de los rotores es importante para evitar problemas de vibraciones del soplador al generar desbalanceo.

La herramienta de corte para el maquinado del interior fue una barra con buril de acero de alta velocidad. Para evitar la adhesión del aluminio a las herramientas de corte, fue agregado líquido refrigerante durante el mecanizado.

Figura 4.23*Careado del centro del soplador.***Figura 4.24***Careado de la base de un rotor.*

La figura 4.25 muestra los rotores de paletas curvas cubiertos por pintura una vez lavados con solvente, esto para garantizar la adherencia del recubrimiento.

Posterior al secado de la pintura, cada uno de los rotores fueron ensamblados por separado en el eje del motor mediante su sujeción con un opresor de 0.25" de rosca estándar. Durante la puesta en marcha, el ventilador no mostró vibraciones que impidieran su funcionamiento al girar en sentido contrario a las manecillas del reloj, a una velocidad de rotación de 360 revoluciones por minuto.

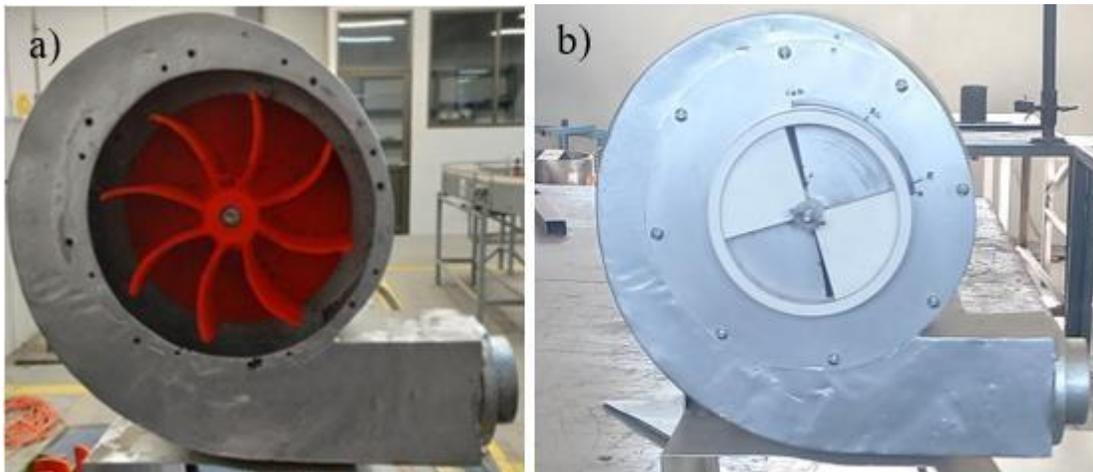
Figura 4.25

Rotores.



La figura 4.26 muestra el soplador obtenido de acuerdo al diseño mecánico realizado. En dicha figura se observa un rotor ensamblado en el eje del motor y el ensamble con la cubierta y regulador del área de aspiración de aire en la carcasa del soplador centrífugo.

Figura 4.26
Soplador centrífugo



Nota. a) Sin tapa y regulador de aire y b) Con tapa y regulador de aire

4.7 Medición de flujos volumétricos

En este apartado son mostrados los resultados experimentales obtenidos a partir de las mediciones de flujo volumétrico en función del área de succión de aire hacia el interior de la carcasa del soplador. El flujo a la salida corresponde a la cantidad máxima de aire que puede suministrar el soplador al horno de fundición referido en la sección de planteamiento del problema del presente trabajo.

Además, otras propiedades relativas al sistema de estudio fueron consideradas, tales como el peso específico del aire, a 20°C $\gamma = 11.81 \times 10^3 \text{ N}$, la densidad del aire a 20°C , $\rho = 1.204 \text{ kgm}^{-3}$, la viscosidad dinámica del aire a 20°C , $\mu = 1.825 \times 10^{-5} \text{ Nm}^{-2}$ para la estimación de parámetros relacionados a las características del fluido a la salida del soplador. En el cálculo de la rapidez del flujo de volumen Q , es necesario conocer las áreas de la sección de la salida de la carcasa del soplador y de la sección del tubo que conduce al horno, cada una de estas secciones son del tipo circular, cuyos valores son los siguientes: diámetro de la sección de la carcasa es de 0.121 m y el diámetro del tubo es de 0.196 m.

Con la ecuación 2.1 se realizan los cálculos correspondientes a la rapidez del flujo de volumen “Q” obteniendo los diferentes valores de acuerdo a las condiciones de apertura y de la curvatura de las aspas de los rotores. Para la obtención de la rapidez del flujo de peso W, fueron necesarios los valores obtenidos anteriormente de la rapidez del flujo de volumen, como se muestra en la ecuación 2.2.

Una vez obtenido el valor de W, es posible calcular los parámetros de la rapidez del flujo de masa, M, con el apoyo de la ecuación 2.3, esto debido a que se necesita la información de la rapidez, Q. Es posible analizar el número de Reynols generados en cada una de las aperturas y condiciones geométricas de los sopladores, esto con el apoyo de la ecuación 2.6.

A continuación, se describen los resultados obtenidos y calculados en cada una de las aperturas usadas en el trabajo experimental, como la posición del tubo que va al horno y de curvatura de las aspas del soplador. En las tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4 son mostrados los resultados obtenidos al utilizar las seis condiciones mencionadas en el capítulo anterior, los cuales se vuelven a mencionar.

- a) Primera condición: fue establecida con un área de succión de aire de 0.658 m^2 sin la conexión del tubo.
- b) Segunda condición; se tomó en cuenta un área de succión del aire de 0.329 m^2 sin la conexión del tubo que da al horno.
- c) Tercera condición: se tomó en cuenta el área de succión de aire de 0.658 m^2 con la conexión del tubo hacia el horno.
- d) Cuarta condición: se estableció el área de succión de 0.329 m^2 con la conexión del tubo hacia el horno.
- e) Quinta condición: se desmontó la tapa reguladora de succión cuya área es de 1.316 m^2 tomando en cuenta la conexión del tubo que da al horno.
- f) Sexta condición: se desmontó la tapa reguladora de succión cuya área es de 1.316 m^2 se toma en cuenta la conexión del tubo que da al horno.

La tabla 4.1 muestra los datos obtenidos al poner en marcha el rotor con paletas planas en el soplador, en donde el flujo volumétrico con la apertura al 100% con el tubo fue de $0.256\text{m}^3\text{s}^{-1}$, este valor se considera cuando el horno se encuentra en condiciones de operación.

Además del registro de la velocidad cuyo valor es de 21.97 ms^{-1} de acuerdo con las condiciones mencionadas.

Tabla 4.1

Desempeño del soplador con impulsor de aletas planas.

Posición	Área m^2	Velocidad registrada "v" $\frac{m}{s}$	Rapidez del flujo de volumen "Q" $\frac{m^3}{s}$	Rapidez del flujo de peso "W" $\frac{N}{s}$	Rapidez del flujo de masa "M" $\frac{kg}{s}$	Número de Reynolds
1° Condición	11.67×10^{-3}	23.66	0.2762	3,262.15	0.3326	190,306.36
2° Condición	11.67×10^{-3}	25.30	0.2954	3,488.27	0.3556	203,497.50
3° Condición	11.67×10^{-3}	21.97	0.2565	3,029.14	0.3088	176,713.05
4° Condición	11.67×10^{-3}	23.25	0.2714	3,205.62	0.3268	187,008.57
5° Condición	30.43×10^{-3}	23.33	0.7100	8,385.43	0.8549	302,979.87
6° Condición	30.43×10^{-3}	22.96	0.6988	8,252.44	0.8413	298,174.78

La tabla 4.2 contiene los datos calculados considerando la curvatura de las aspas del soplador, cuyo radio es de 10.5 cm, este radio tiende a ser un valor significativo, debido a que generó un incremento en el flujo volumétrico, Q: con una apertura al 100% con el tubo cuyo valor registrado fue $Q = 0.2896\text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y con una velocidad de 24.81 ms^{-1} .

Tabla 4.2

Datos registrados del soplador de aletas curvas con radio de 10.5 cm.

Posición	Área m^2	Velocidad registrada “ v ” $\frac{m}{s}$	Rapidez del flujo de volumen “ Q ” $\frac{m^3}{s}$	Rapidez del flujo de peso “ W ” $\frac{N}{s}$	Rapidez del flujo de masa “ M ” $\frac{kg}{s}$	Número de Reynolds
1° Condición	11.67×10^{-3}	26.31	0.3072	3,627.53	0.3698	211,621.32
2° Condición	11.67×10^{-3}	20.48	0.2391	2,823.71	0.2879	164,728.41
3° Condición	11.67×10^{-3}	24.81	0.2896	3,420.71	0.3487	199,556.25
4° Condición	11.67×10^{-3}	20.39	0.2380	2,811.30	0.2866	164,004.51
5° Condición	30.43×10^{-3}	28.24	0.8595	0,150.22	1.0348	366,744.60
6° Condición	30.43×10^{-3}	23.84	0.7255	8,568.74	0.873	309,603.09

Estos valores presentan una mejora en el contacto de la superficie de las aspas con dicha curvatura. Los datos mostrados en la tabla 4.3 corresponden a una curvatura más pronunciada de las paletas del impulsor, donde este radio es de 6.5 cm, es decir, un valor más pequeño que del modelo anterior. A continuación, se mencionan los principales valores a tomar en cuenta como es el valor del flujo volumétrico de $0.2781 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ y una velocidad registrada de 23.82 ms^{-1} .

Tabla 4.3.

Datos experimentales obtenidos del soplador con impulsor de aletas curvas con radio de 6.5 cm.

Posición	Área m^2	Velocidad registrada "v" $\frac{m}{s}$	Rapidez del flujo de volumen "Q" $\frac{m^3}{s}$	Rapidez del flujo de peso "W" $\frac{N}{s}$	Rapidez del flujo de masa "M" $\frac{kg}{s}$	Número de Reynolds
1° Condición	11.67×10^{-3}	27.13	0.3167	3,740.58	0.3813	218,216.89
2° Condición	11.67×10^{-3}	21.02	0.2454	2,898.16	0.2955	169,071.84
3° Condición	11.67×10^{-3}	23.82	0.2781	3,284.21	0.3348	191,593.30
4° Condición	11.67×10^{-3}	21.17	0.2472	2,918.84	0.2976	170,278.34
5° Condición	30.43×10^{-3}	28.17	0.8573	10,125.06	1.0322	365,835.53
6° Condición	30.43×10^{-3}	25.69	0.7819	9,233.68	0.9414	333,28.49

La tabla 4.4 muestra los valores experimentales cuando la curvatura de las aspas es 4.5 cm, es decir, la curvatura de las paletas más pronunciadas respecto a los otros rotores. A continuación, se menciona el valor de la velocidad registrada que es de 25.09 ms^{-1} y del flujo volumétrico es de $0.2929 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$.

Tabla 4.4.

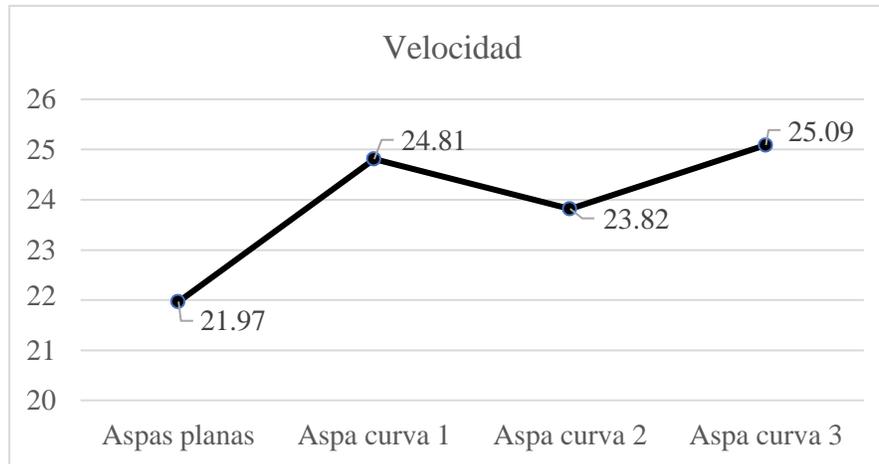
Datos registrados del soplador de aletas curvas con radio de 4.5 cm.

Posición	Área m^2	Velocidad registrada "V" $\frac{m}{s}$	Rapidez del flujo de volumen "Q" $\frac{m^3}{s}$	Rapidez del flujo de peso "W" $\frac{N}{s}$	Rapidez del flujo de masa "M" $\frac{kg}{s}$	Número de Reynolds
1° Condición	11.67×10^{-3}	23.37	0.2728	3,222.17	0.3285	187,973.78
2° Condición	11.67×10^{-3}	20.65	0.2411	2,847.15	0.2903	166,095.79
3° Condición	11.67×10^{-3}	25.09	0.2929	3,459.32	0.3527	201,808.39
4° Condición	11.67×10^{-3}	20.38	0.2379	2,809.92	0.2865	163,924.07
5° Condición	30.43×10^{-3}	29.92	0.9106	10,754.05	1.0963	388,562.26
6° Condición	30.43×10^{-3}	29.37	0.8939	10,556.37	1.0762	381,419.58

La figura 4.27 muestra gráficamente los valores de la velocidad con la posición de apertura al 100% con tubo de los cuatro tipos de sopladores, donde se muestra el incremento a partir del primer modelo curvo del aspa, hasta el tercer modelo. Se tiene en cuenta que hay una mejora del 12.43% en relación del soplador de paletas planas. Lo anterior es relevante de acuerdo con los datos obtenidos experimentalmente en el presente trabajo.

Figura 4.27

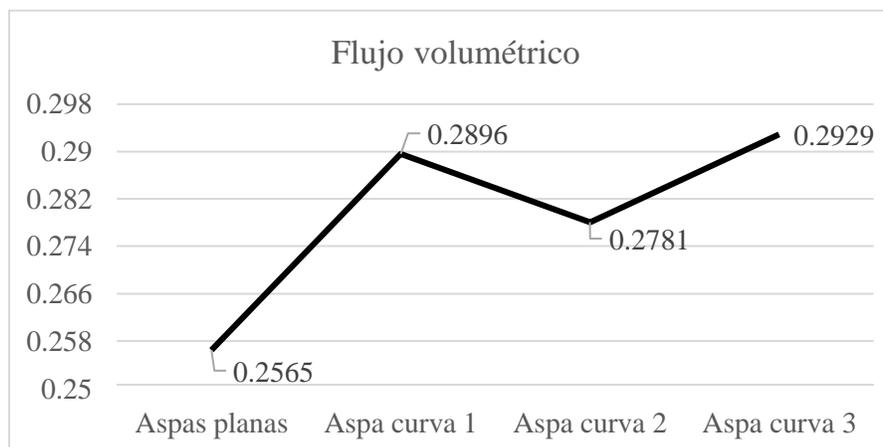
Gráfica de velocidad, tercera condición: apertura al 100% con tubo.



La figura 4.28 muestra gráficamente el flujo volumétrico obtenido del soplador de aspas planas, incluyendo los tres modelos con paletas curvas en el soplador; en donde se encontró un cambio significativo a partir del primer modelo de soplador curvo. Posteriormente se encuentra que hay una mejora del 12.42 % del soplador de aspas planas con el último modelo de aspas curvas.

Figura 4.28

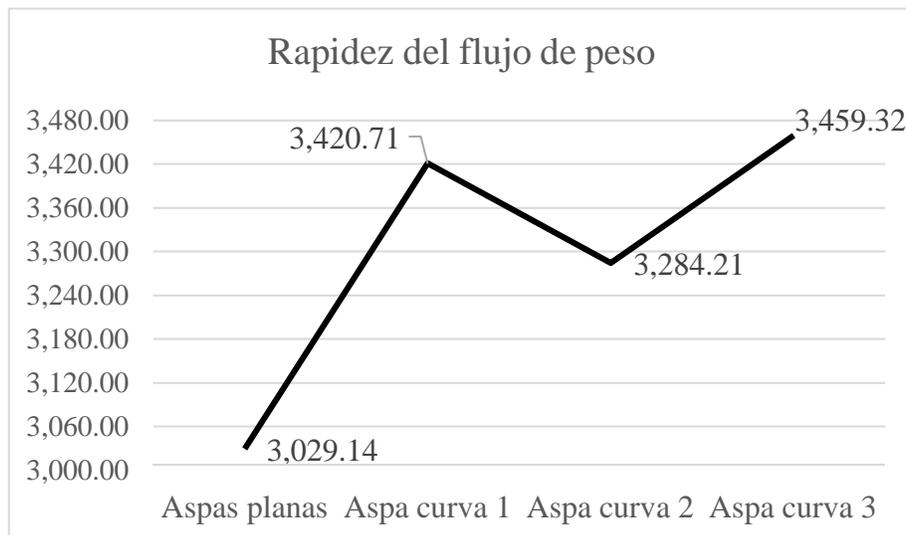
Gráfica de flujo volumétrico tercera condición: apertura al 100% con tubo.



Para la obtención de la rapidez del flujo de peso, que se muestra en el gráfico de la figura 4.29, se observa un incremento significativo de los valores obtenidos y calculados de los modelos de las aspas curvas bajo la condición de la apertura al 100% con el tubo que va hacia el horno.

Figura 4.29

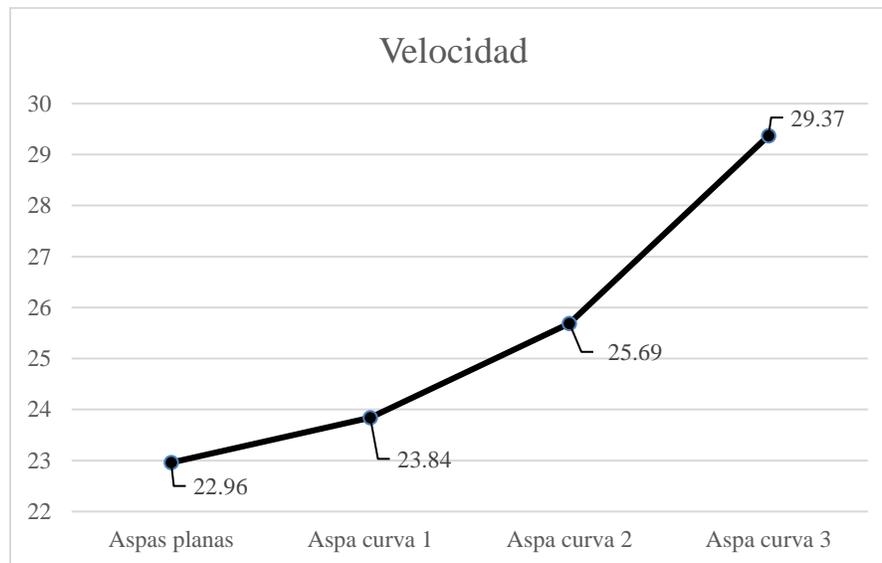
Gráfica de rapidez del flujo de peso tercera condición: apertura al 100% con tubo.



Con base en los datos obtenidos de las tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4, se encuentra un aumento significativo de velocidad en la posición de apertura de la tapa de la carcasa donde se encuentra el soplador y con la conexión del tubo al horno. En el gráfico de la figura 4.30 se observa el incremento que cuenta el modelo más curvo de las aspas. Donde se estima que hay incremento del 21.82% en relación del soplador de aspas planas con el último modelo de aspas curvas.

Figura 4.30

Gráfica de velocidad sexta condición: apertura de la tapa de la carcasa con la conexión del tubo.



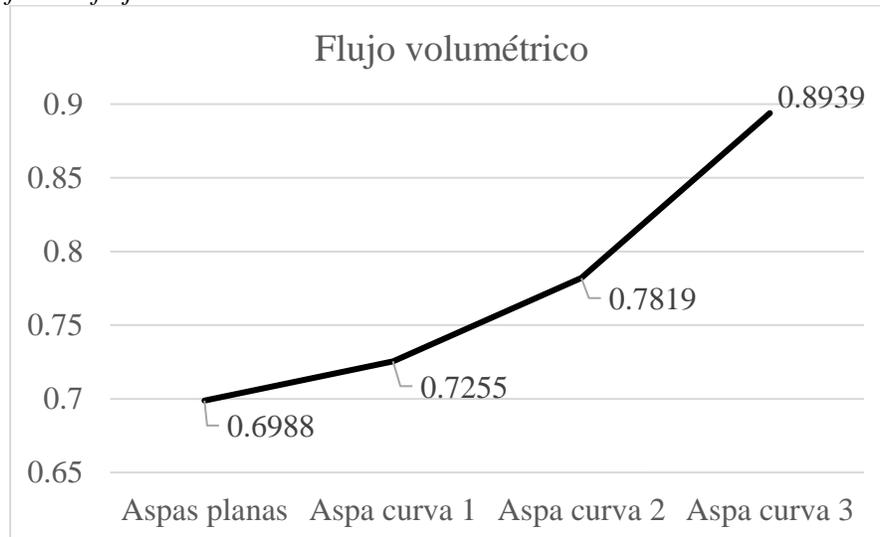
Además del aumento de la velocidad que se obtuvo, se encontró el aumento del flujo volumétrico que existe entre el primer modelo del soplador de aspas planas y del tercer modelo del soplador curvo, donde se tiene el mismo incremento del 21.82% en relación de las aspas. Dando a entender una mejora positiva en el cambio de la geometría de las aspas del soplador. Esto de acuerdo a los datos graficados mostrados en la figura 4.30. La relación en volumen para la combustión completa del gas L.P. – aire corresponde a 1:5.21. Por lo tanto, la cantidad de aire requerida para llevar a cabo la combustión con dicho hidrocarburo puede ser estimada o calculada. El uso de los rotores manufacturados permitirá el diseño de sopladores centrífugos de acuerdo a las necesidades o capacidades térmicas que puedan ser requeridas.

Sin embargo, aún queda pendiente el estudio del efecto del tamaño de los rotores, número de paletas implementadas y la variación de la velocidad de rotación de los mismos. Esto abre la posibilidad de continuar con la investigación acerca del desempeño de los sopladores centrífugos, no dejando de lado la simulación del comportamiento del fluido al interactuar con el equipo, aun cuando en todos los casos el fluido tuvo un comportamiento como “flujo turbulento”, dados los valores del número de Reynolds determinados experimentalmente, Re

> 2300.

Figura 4.31

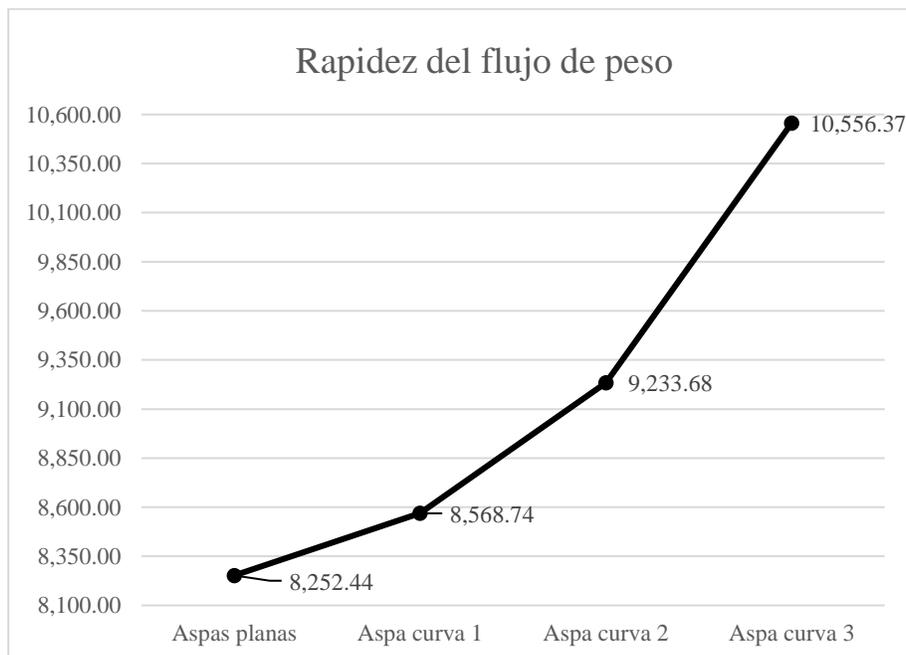
Gráfica de flujo volumétrico sexta condición:



Nota. apertura de la tapa de la carcasa con la conexión del tubo. Para el cálculo de la rapidez del flujo de peso con la condición de apertura de la tapade la carcasa con la conexión del tubo se observa en la figura 4.32 que existe un aumento significativo del 21.82% en relación de las aspas planas en comparación de la geometría de las aspas más curvas que se elaboraron

Figura 4.32

Gráfica de rapidez del flujo de peso sexta condición:



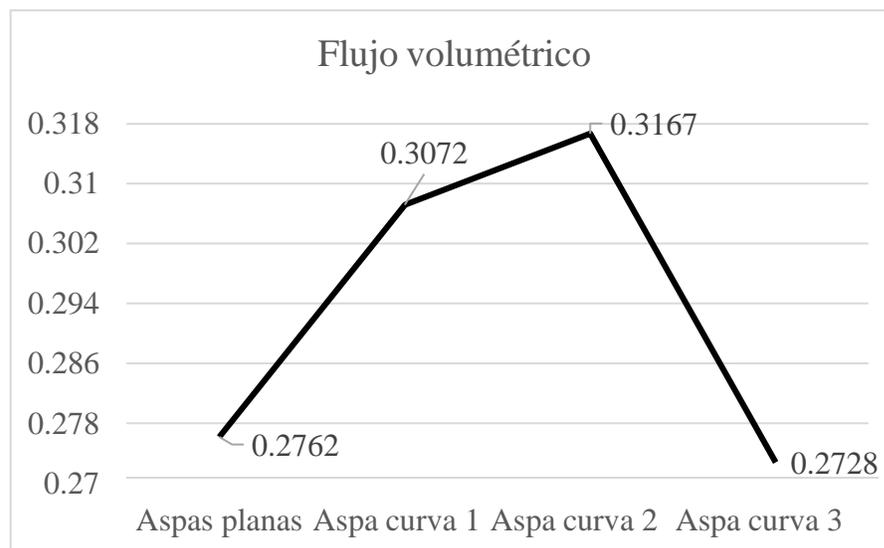
Nota: posición de apertura de la tapa de la carcasa con la conexión del tubo.

A continuación, se menciona un análisis detallado del comportamiento del aspa plana con relación de las aspas curvas en diferentes condiciones de apertura de la tapa de la carcasa, donde se encuentra una pérdida de flujo volumétrico en una de las aspas curvas y de la caída del mismo valor en una condición de trabajo establecida.

Se inicia primero con el análisis de la condición de apertura de la carcasa al 100% y sin la conexión del tubo al horno, donde se muestra en el gráfico de la figura 4.33 que el registro del flujo volumétrico del aspa curva de radio 6.5 cm es el más alto de los tres modelos de aspas curvas, debido a que el último modelo de aspas más curvas tiene una pérdida del 13.86%, cabe mencionar que en esta posición de apertura se resalta que el aspa de curva de radio 6.5 cm obtuvo una mejora del 12.78% en comparación con las aspas planas del modelo.

Figura 4.33

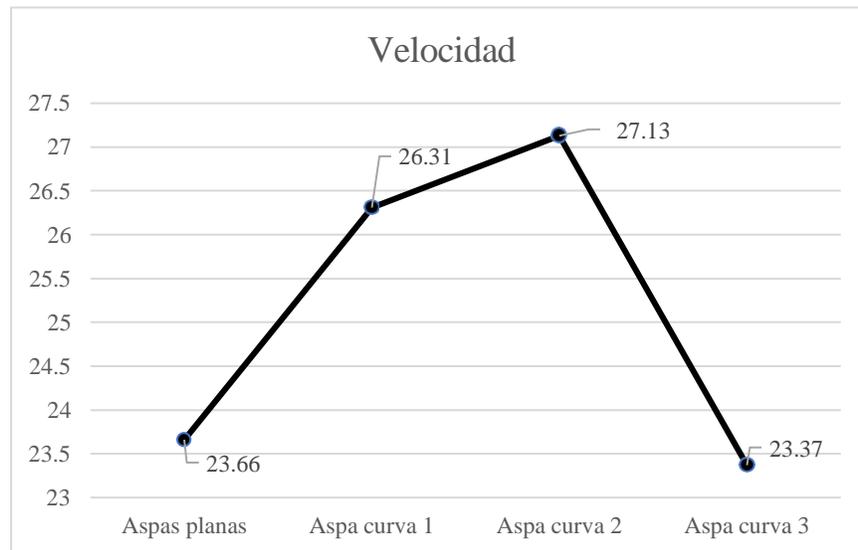
Gráfica de flujo volumétrico primera condición: apertura al 100% sin tubo.



Para el gráfico de la figura 4.34 se muestra el mismo comportamiento de la velocidad del aspa curva 2, donde se muestra un registro de velocidad de 27.13 m/s en comparación con la velocidad registrada del aspa más curva que fue de 23.37 m/s, para el comparativo del aspa plana con el aspa curva 2 tuvo un incremento del 12.79%.

Figura 4.34

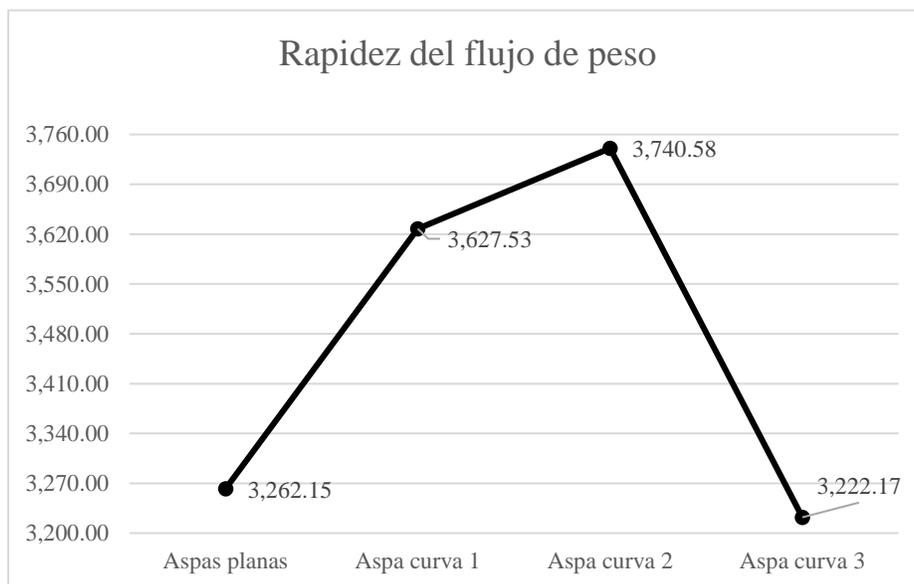
Gráfica de velocidad primera condición: apertura al 100% sin tubo.



A continuación, en el gráfico de la figura 4.35 se observa el incremento de rapidez del flujo de peso en el aspa curva 2 donde se registra un incremento del 12.79% en relación del aspa plana. Este comportamiento de las aspas fue debido a la posición de apertura que se estableció al 100% pero sin la conexión del tubo que lleva al horno.

Figura 4.35

Gráfica de rapidez del flujo de peso primera condición: apertura al 100% sin tubo.



En el siguiente estudio de posición de apertura se considera una apertura de la carcasa al 50% con la conexión del tubo hacia el horno, donde se muestra una pérdida de flujo volumétrico, velocidad y rapidez de flujo de peso en relación con las aspas curvas con las aspas planas, esto debido a la poca apertura de entrada de aire de la carcasa donde hubo una reducción de la mitad.

En el gráfico de la figura 4.36 se observa cómo se genera una pérdida de flujo volumétrico del aspa plana con relación del aspa curva 3, del 18.38%. Donde tendría una mejora de flujo entre las tres aspas curvas se encuentra en el aspa curva 2, sin embargo, no es significativa esta mejora, debido al valor obtenido del aspa plana que fue mayor en comparación con los tres modelos curvos de las aspas.

Figura 4.36

Gráfica de flujo volumétrico cuarta condición: apertura al 50% con tubo.

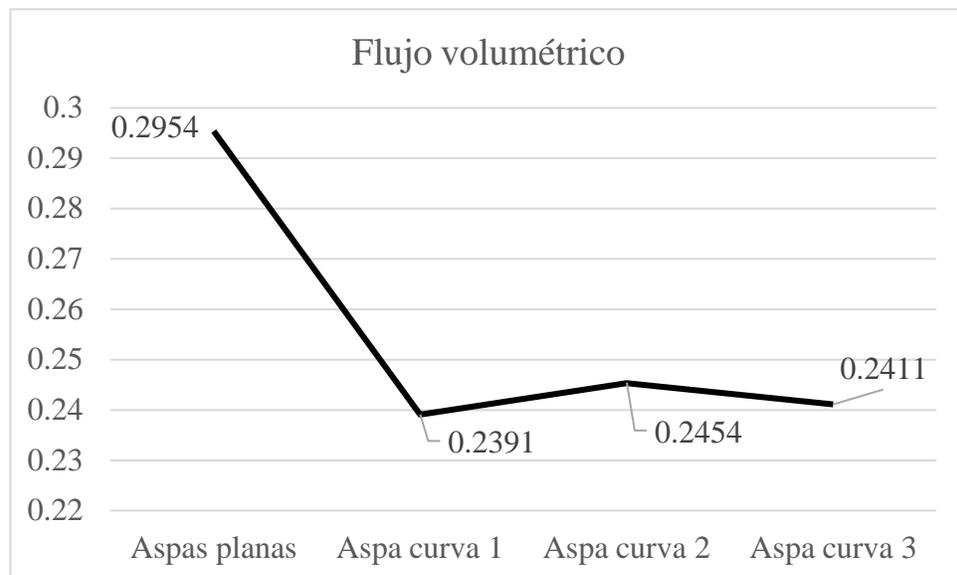
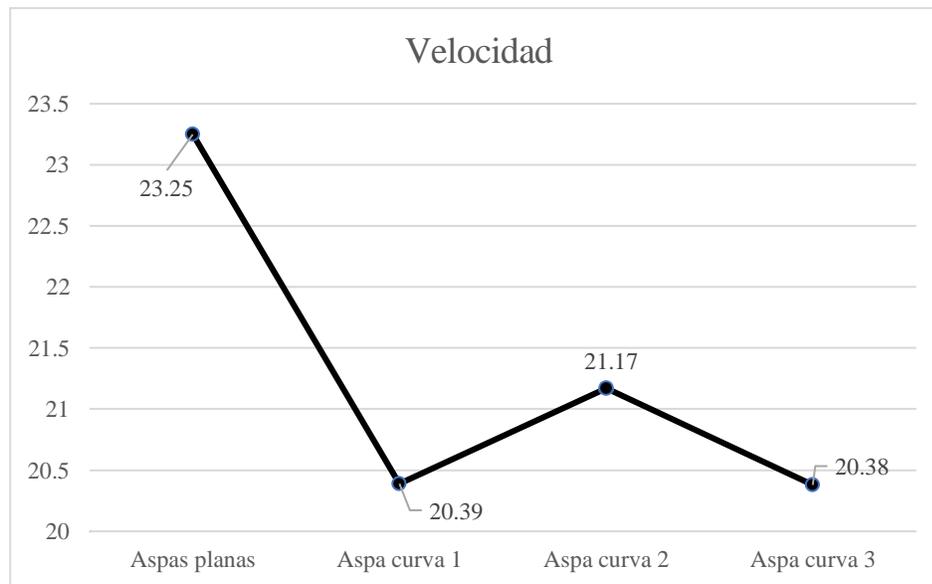


Figura 4.37

Gráfica de velocidad cuarta condición: apertura al 50% con tubo.

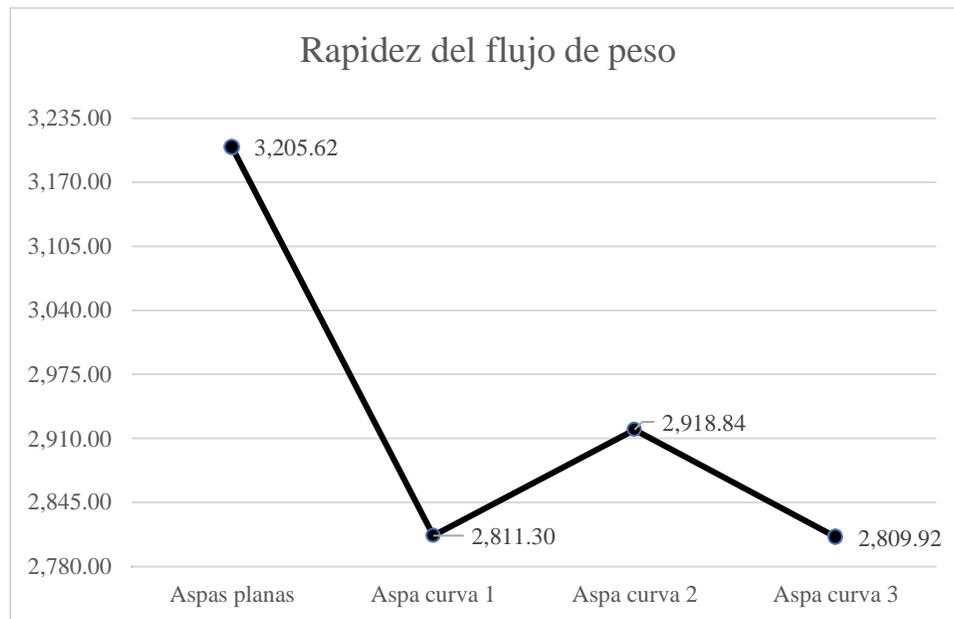


Como se mencionó anteriormente, el valor registrado de la velocidad bajo la condición de apertura del 50% de la carcasa con la conexión del tubo hacia el horno se obtuvo una pérdida de rendimiento de los modelos de las aspas curvas. En la figura 4.38 se observa la pérdida de velocidad que tienen los tres modelos de las aspas curvas, debido a que se tiene una velocidad de 23.25 m/s del aspa plana, y de una velocidad de 20.38 m/s del modelo más curvo de aspas, dando una pérdida del 12.34%.

La misma pérdida de los tres modelos de las aspas curvas, donde se tiene una diferencia del 12.34% en relación del aspa plana, se muestra que el aspa curva 2 tiene una mejora en comparación con los modelos de aspas curvas anteriores, pero este no es mejor que el del aspa plana.

Figura 4.38

Gráfica de rapidez del flujo de peso con apertura al 50% con tubo.

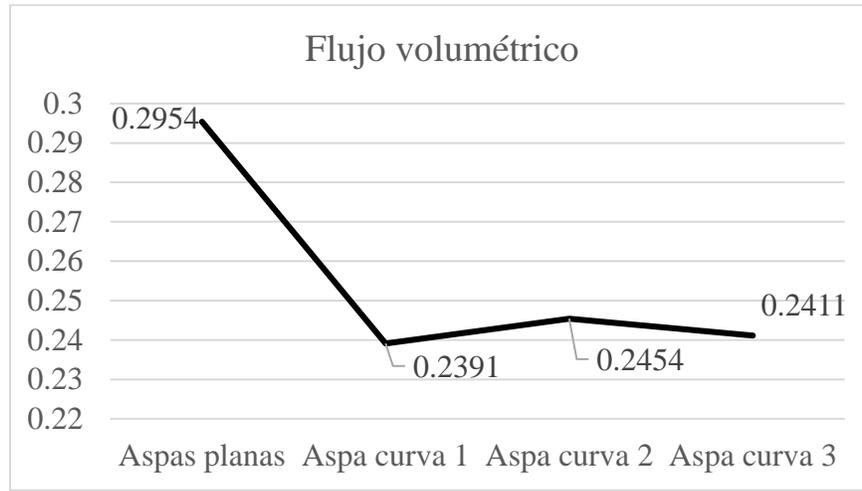


Para el siguiente estudio de posición, se consideró una apertura de la carcasa al 50% pero en esta ocasión sin la conexión del tubo que da hacia el horno de fundición, donde se encuentra el mismo comportamiento de rendimiento en los parámetros de flujo volumétrico, velocidad y rapidez de flujo de peso en los tres modelos de aspas a comparación del aspa plana.

Se analiza que, con estas condiciones de apertura limitada de la carcasa, los modelos de las aspas curvas presentan una baja eficiencia en relación con el aspa plana, debido a que se requiere una mayor superficie de contacto de las aspas curvas, presentando así en esta condición de apertura una pérdida significativa de rendimiento de los modelos curvos de las aspas. Es decir, se muestran limitadas las condiciones de operación de las aspas curvas del soplador, dando estos registros bajos, como se muestra en el gráfico de la figura 4.39 donde el flujo volumétrico registrado de las aspas curvas tuvo una pérdida del 18.38% en comparación con las aspas planas del soplador.

Figura 4.39

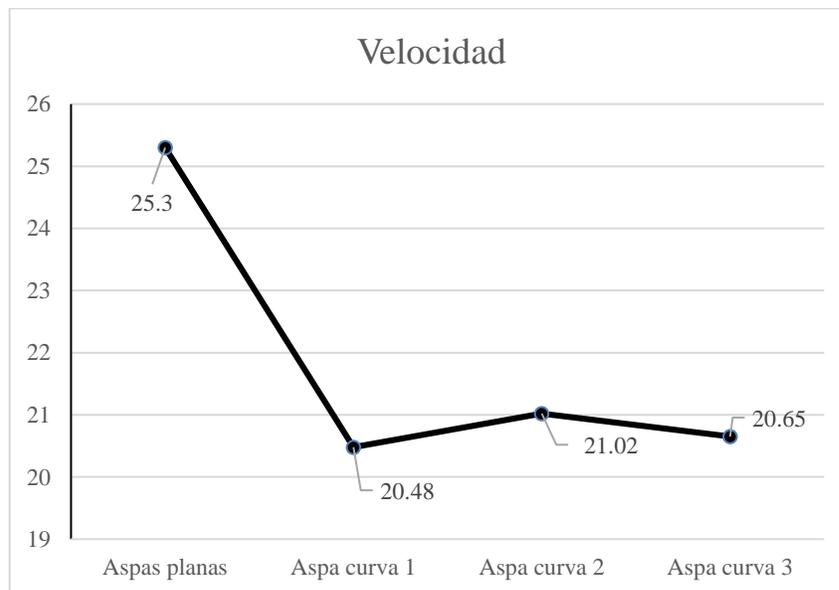
Grafica de flujo volumétrico con apertura al 50% sin tubo.



En las condiciones de la velocidad para esta condición, se muestra en la figura 4.40 el comportamiento de desempeño que tiene el asa plana del soplador en comparación con los otros tres modelos curvos de las aspas, donde se analiza que se tiene una pérdida del 18.37%. Para el modelo de asa curva 2, como en el estudio anterior, se muestra que presenta un mejor rendimiento en comparación con los otros dos modelos de aspas curvas.

Figura 4.40

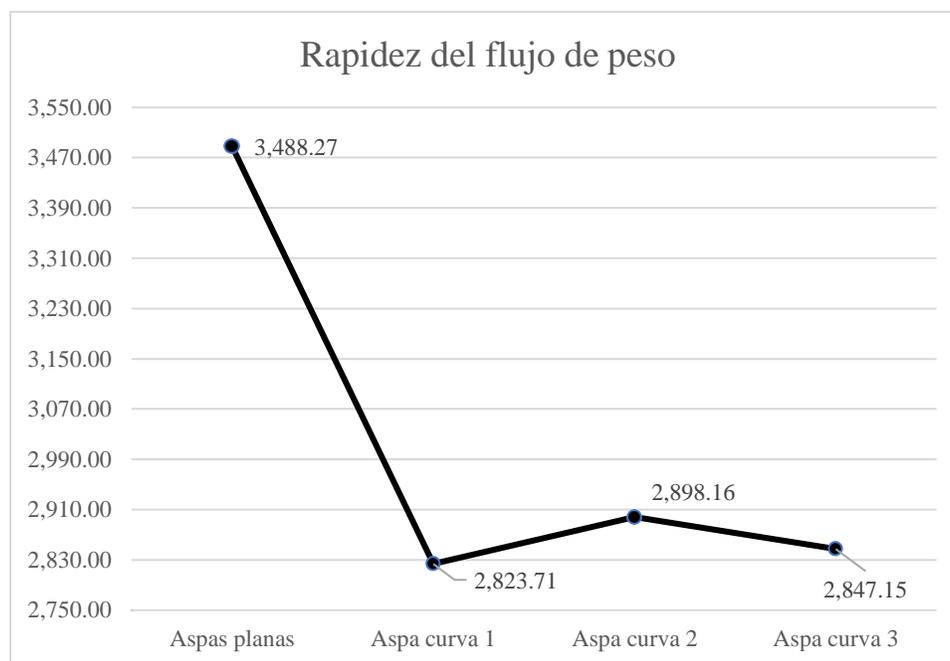
Gráfica de velocidad cuarta condición: con apertura al 50% con tubo.



Por último, en el gráfico de la figura 4.41, se analiza el comportamiento de rapidez de peso, donde se muestra el mismo comportamiento de pérdida de rendimiento de los tres modelos de las aspas curvas del cual lo representa un 18.37%. Y además se sigue presentando que el modelo de aspa curvo 2 tiene un mejor desempeño de los tres modelos curvos de aspas; sin embargo, no es suficiente para mejorar con el valor obtenido del aspa plana.

Figura 4.41

Gráfica de rapidez del flujo de peso segunda condición: apertura al 50% sin tubo.

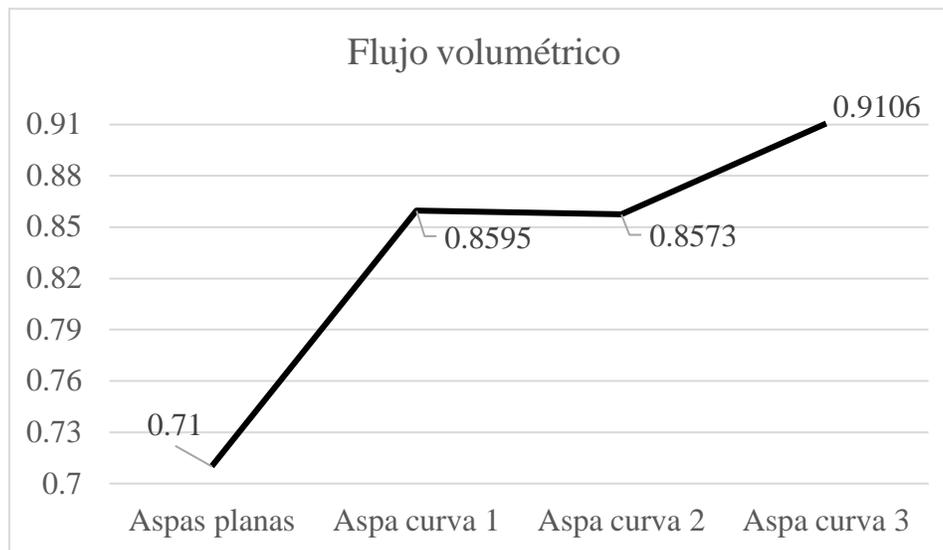


A continuación, se hace el último estudio de condición que se obtuvieron de los valores de las tablas 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4, donde se realizaron las mediciones y cálculos del flujo volumétrico, velocidad y rapidez de flujo de peso sin la tapa de carcasa y sin la conexión del tubo al horno, donde se obtuvo una mejora significativa de los modelos de las aspas curvas, dando a entender que es necesario de la apertura óptima del soplador en los modelos curvos de las aspas.

Donde se observa en el gráfico de la figura 4.42, que se genera una mejora del flujo volumétrico en el modelo más curvo de las aspas, dando un incremento del 22.02% en comparación con el modelo de aspas planas.

Figura 4.42

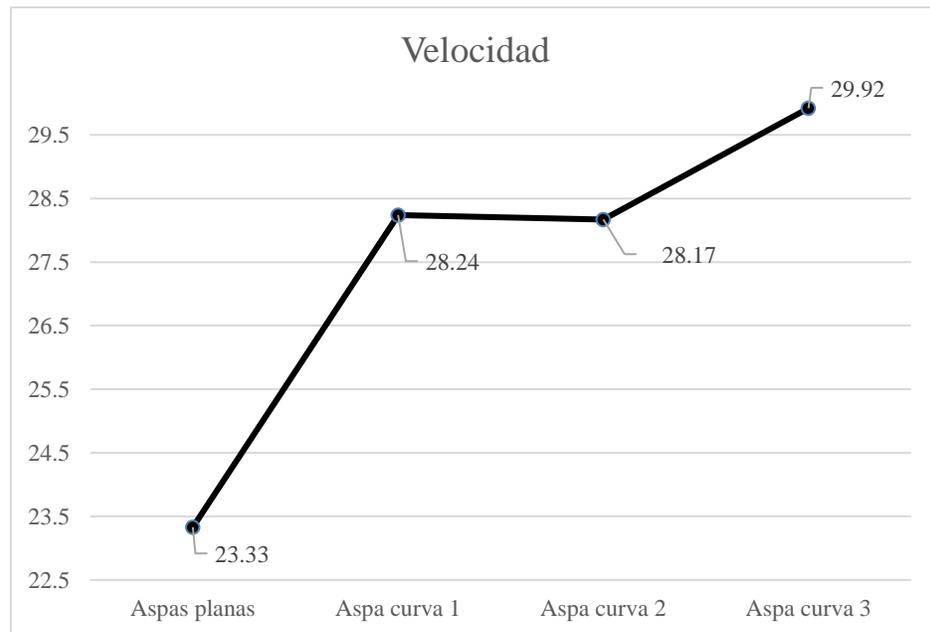
Gráfica de flujo volumétrico quinta condición: apertura de la tapa de la carcasa sin la conexión del tubo.



A continuación, en la figura 4.43, se muestra el gráfico de la velocidad obtenida de cada una de las aspas curvas y del aspa plana del soplador, donde se observa un incremento del 22.02% entre el aspa plana respecto del aspa más curva de los tres modelos del soplador. Este incremento es significativo para el estudio de caso que se ha propuesto desde un principio.

Figura 4.43

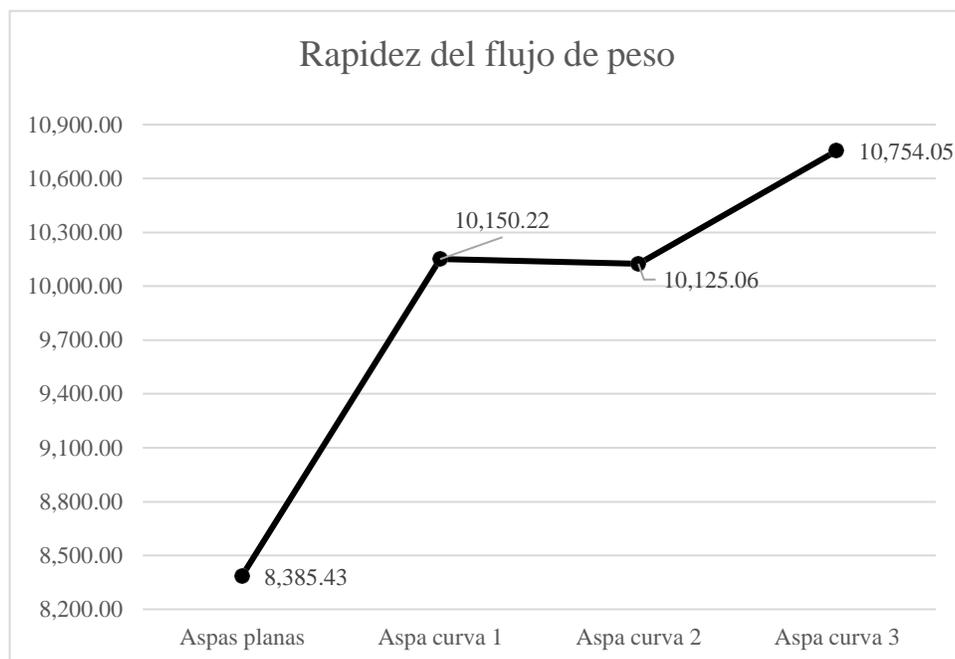
Gráfica de velocidad quinta condición: apertura de la tapa de la carcasa sin la conexión del tubo.



Por último, en la figura 4.43, se muestra el gráfico de rapidez de flujo de peso, donde a partir del modelo curvo 1, hay un incremento significativo en relación del modelo de aspas planas, para el modelo curvo 2 no se presenta un incremento enorme, al contrario, una pequeña pérdida no tan significativa. Y para el modelo de aspa curva 3, el que presenta una curvatura más pronunciada, registra un incremento en comparación con el aspa curva 1, dando así un incremento del 22.02%.

Figura 4.44

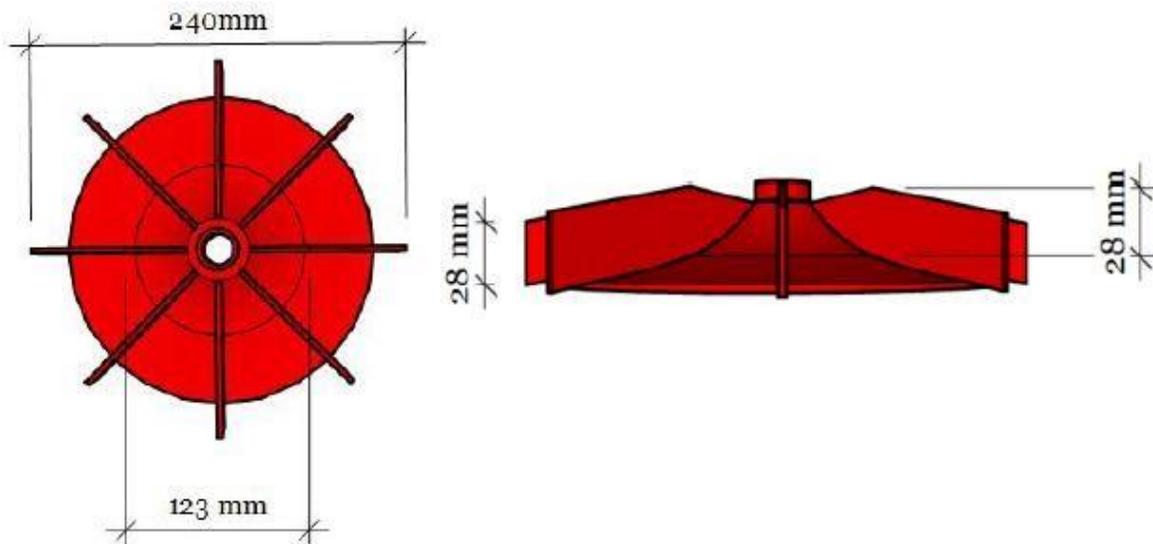
*Gráfica de rapidez del flujo de peso quinta condición:
apertura de la tapa de lacarcasa sin la conexión del tubo.*



4.8 Comparativo de resultados

En el trabajo de “Diseño, fabricación y montaje de soplador centrífugo para gases corrosivos y calientes en representaciones químicas, S.A.” (Morfín Sarceño, 2017), se describe el proceso de diseño y fabricación de un soplador centrífugo para gases corrosivos y calientes, esto con base en la selección de materiales y técnicas de fabricación.

El autor menciona las dimensiones y parámetros de funcionamiento, donde se toma en cuenta, la fuente eléctrica de impulso, el voltaje y la frecuencia. Las dimensiones que el autor consideró para elaborar el impulsor de aletas planas se muestran en la figura 4.45

Figura 4.45*Dimensiones del impulsor de soplador centrifugo*

Nota. Morfín Sarceño, 2017.

La elaboración del modelo mencionado es a través de la utilización de la fibra de vidrio y de una resina Dion 382 sólida (lentejas) y monómero de estireno, con una mezcla del 50/50 en peso. Una vez que se dio forma y reforzado a las partes, se aplica gelcoat con la finalidad de crear una barrera que proteja la resina de los rayos UV.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 4.5 donde se realizaron las siguientes condiciones: un giro a 1700 rpm, a temperatura ambiente y de cuatro condiciones de apertura, los cuales son de la apertura al 100%, 75%, 50% y 0% del dámper y con la lectura de 5 velocidades diferentes, dando así una velocidad promedio en cada una de las diferentes condiciones de apertura.

Tabla 4.5

Valores obtenidos del soplador de aletas planas a 1700 rpm

Apertura	Velocidad m/s					Promedio
	1	2	3	4	5	
100%	9.38	16.18	10.57	9.6	14.56	11.98
75%	8.7	15	9.8	8.9	13.5	11.1
50%	7	12.36	7.82	7.04	10.79	9.1
0%	1.7	1.3	1.85	3.65	1.25	1.95

Nota. Morfín Sarceño, 2017.

Además, se encuentran en la tabla 4.6 otras lecturas de velocidad considerando las condiciones mencionadas anteriormente, solo que con un giro mayor del motor a 3400 rpm, donde se encuentra que la velocidad promedio con la apertura al 100% del dámper de 23.96 m/s.

Tabla 4.6

Valores obtenidos del soplador de aletas planas a 3400 rpm (Morfín Sarceño,2017).

Apertura	Velocidad m/s					Promedio
	1	2	3	4	5	
100%	16.76	34.36	21.04	19.3	29.12	23.96
75%	17.4	30	1.6	17.8	27	22.2
50%	14	24.72	15.64	14.0	21.58	18.2
0%	3.4	2.6	3.7	7.3	2.5	3.9

Nota. Morfín Sarceño, 2017.

Los valores obtenidos del soplador de aletas planas a 3400 rpm, con una apertura del 100% del dámper fue del 23.98 m/s en comparación con los valores obtenidos de la velocidad de las aletas curvas a 4.5 cm de radio de la tabla 3.1, que fue de 29.37 m/s, es decir, que hubo una mejora del 18.35% en relación con las aletas curvas a 4.5 cm de radio que con las aletas planas.

Para las aletas curvas a 6.5 cm de radio se encontró un registro de 25.69 m/s en comparativa con las aletas planas del estudio mencionado, encontrándose una mejora del 6.73%, dando a entender que se obtiene una mejora significativa con los modelos que cuentan con una curvatura.

CONCLUSIONES

El proceso para la realización de cada uno de los modelos del soplador centrífugo que fueron planteados en el presente trabajo fueron cumplidos de la manera exitosa, esto debido al planteamiento adecuado del diseño mecánico de los tres modelos, donde se fueron modelando tres curvaturas diferentes, donde el primer modelo presenta un radio de curvatura amplio $r = 10.5$ cm, el segundo modelo con un radio de curvatura más cerrada, $r = 6.5$ cm y del tercer modelo con radio de curvatura con $r = 4.5$ cm.

Una vez que los modelos cumplieron con las condiciones geométricas adecuadas del diseño, se procedió a la siguiente etapa de elaboración de los modelos a través de la impresión tridimensional, con la finalidad de elaborar los moldes de fundición, el cual fue la siguiente etapa del proceso, donde cada uno de estos moldes fueron adecuados para ser usados en la “técnica de fundición en molde de arena”.

Posteriormente, se logró realizar con éxito la etapa de maquinado de las piezas obtenidas por fundición, donde se realizaron las operaciones de torneado, taladrado y roscado. En cada uno de los rotores se tuvo el cuidado necesario en este proceso, debido a que si se presentara alguna rotura o alguna deformación de las aspas, era comprometer la elaboración de las aspas y como consecuencia, se generaría una complicación en el proceso y se termina por desechar el modelo y volver a realizar la elaboración de los moldes y la fundición del mismo modelo. Cabe mencionar que el balanceo de los rotores fue necesario para evitar vibraciones excesivas en el equipo.

Una vez concluida la etapa de manufactura de cada uno de los rotores, se procedió a realizar el montaje y la toma de los valores pertinentes de velocidad del flujo registrados por el anemómetro, tomando en cuenta las diferentes posiciones de apertura del regulador de succión de aire y de las conexiones del tubo hacia el horno. De acuerdo a los resultados

experimentales, la curvatura de las paletas de los rotores influye en el comportamiento del fluido. Fue determinado que el rotor con paletas de mayor curvatura genera un incremento sustancial del flujo de aire a la salida del soplador centrífugo respecto al rotor de paletas planas.

En comparación con los datos obtenidos del trabajo de investigación mencionado en esta tesis, se registró una mejora del 18.35% de las aletas curvas a 4.5 cm de radio respecto de las aletas planas. Y para los valores obtenidos del modelo de las aspas planas que se realizaron en el Capítulo IV, fue del 22.02% entre el aspa plana respecto al aspa más curva de 4.5 cm de radio.

La información generada para mejorar el desempeño del horno de fundición considerado en este trabajo, resulta útil en caso de requerir un incremento de la velocidad de calentamiento del mismo, mediante un incremento en la cantidad de gas a ser quemado en caso de ser posible el desahogo de los productos de combustión de la cámara del horno.

Para trabajos futuros, es necesario estudiar otros parámetros que influyen en el desempeño de los sopladores estudiados en el presente trabajo, como:

1. El tamaño de cada uno de los rotores, tomando en cuenta el diámetro del rotor, la altura y el espesor de las aspas.
2. Realizar un modelo de rotor con una curvatura más prolongada.
3. La velocidad de rotación, esto depende de la configuración del motor eléctrico, si este tiene la capacidad de regular sus rpm.
4. La elaboración de los modelos tridimensionales más exactos y sin alguna irregularidad superficial del rotor.
5. La arena y la consistencia para realizar los modelos de fundición que no presenten orificios en las superficies del rotor.

REFERENCIAS

- ADSLZone. (2023). *Impresión 3D: qué es, métodos, aplicaciones, materiales e historia*. Recuperado el 4 de febrero de <https://www.adslzone.net/reportajes/tecnologia/impresion-3d/>
- Alonso, F. L. (2008). *El aluminio y su aplicación al grabado*. Studium: Revistade humanidades,(14), 329-349.
- Aplicaciones de Sopladores y Bombas de vacío*. (2 de agosto2019). Ingeniería SAE; Ingeniería SAE. Recuperado el 2 de julio de 2023, de <https://ingenieriasae.com/aplicaciones-de-sopladores-y->
- ASTM International. (2012). *ASTM F2792 - 12a Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies*. Recuperado el 5 de abril de 2023, de 1.
- Atlas Copco. (2018). *Soplador de aire*. Atlas Copco. Recuperado el 4 de julio de 2023, de <https://www.atlascopco.com/es-pe/compressors/aplicaciones-aire-comprimido/sopladores-aire-comprimido-como-funcionan-aplicaciones-tipos>
- Autodesk. (2023). *¿Qué es la impresión 3D?* Recuperado el 5 de marzo de 2024 de <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing>
- Beldarrain-Calderón, M. (2017). *Evolución del sistema constructivo de los hornos de calcinación de la minería de hierro en Bizkaia (1890–1970)*. In Actas del Décimo Congreso Nacional y Segundo Congreso Internacional Hispanoamericano de Historia de la Construcción: Donostia-San Sebastián, 3-7 octubre 2017 (pp. 153-162). Instituto Juan de Herrera.
- BossTech. (30 de septiembre2020). *¿Qué es un soplador regenerativo?* - Boss Tech. Recuperado el 2 de julio de 2023, de <https://bosstech.pe/que-es-soplador-regenerativo/>
- Combustión - Concepto, reacción, etapas, tipos y ejemplos*. (2023). Recuperado el 9 de febrerode 2024, de <https://concepto.de/combustion/>
- Cotiza tu sistema de vacío para carga*. (2020). Com.mx. Recuperado el 3 de julio de 2023, de <https://www.industrialcom.com.mx/sistema-de-vacio-para-carga/>Cros Stotter, A. (2013). Demo 86. *Flujo laminar. Mezcla reversible de fluidos*.

- Cruz, P., & Téreygeol, F. (2020). *Los hornos de reverbero andinos. Dinámicas de transferencia e innovaciones de tecnologías metalúrgicas indígenas y europeas*. Estudios atacameños, (66), 105-128.
- Damián, R. E. R. (22 de septiembre 2020). *Soplador de aire - Manufacturera Century*. Recuperado el 1 de julio de 2023, de <https://mcentury.com.mx/soplador-de-aire/>
- Dassault Systèmes. (2023). *Impresión 3D, ¿qué es y cómo funciona?* Recuperado el 5 de marzo de 2024 de <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/3d-printing>
- Durán Guerrero, S. M. (2022). *Hornos para aceración y fundición*. Blogspot.com. Recuperado el 12 de febrero de 2024, de <https://tmmateriales.blogspot.com/2009/03/tipos-de-hornos.html>
- Espinoza, M. (13 de julio 2021). *Sopladores industriales: Conoce el modelo ideal para tu proceso*. Sobitec; Sobitec – Soluciones Biotecnológicas en Equipos Industriales. Recuperado el 2 de julio de 2023, de <https://www.sobitec.cl/neumatica/sopladores-industriales-conoce-el->
- Galván Alatorre, H. (2009). *Procesos de moldeo para fundir* (Doctoral dissertation).
- Galván Valle, K. (2017). *Fases formadas en el proceso de producción de plomo en el horno desoplo, en función de los contenidos de cobre, antimonio y arsénico*.
- García, P. (2017). *Funcionamiento y simulación de un horno alto*.
- Gibson I., Rosen D. & Stucker B. (2015). *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping and Direct Digital Manufacturing* (2nd ed.). Springer.
- Gómez, J. E. V. (2004). *Análisis de equipos de desgasificación en instalaciones de vapor*.
- González, J., González, A., González, M., & González, R. (2018). *Procesos de fabricación: maquinado tradicional y moderno* (2a ed.). McGraw-Hill.
- Grainger, México. (2018). *Sopladores de Desplazamiento Positivo*. Recuperado el 1 de julio de 2023, de <https://www.grainger.com.mx/categoria/Sopladores-de-Desplazamiento-Positivo/c/18229>
- Guerrero, O. E. (2008). *Procesos de manufactura*. Bogotá, Colombia. Recuperado el 16 de febrero de 2024, de <https://es.slideshare.net/Firefalls/procesos-productivos-de-manufactura>.
- Henríquez Meneses, O. E., & Aguilar Castro, E. E. (2016). *Diseño de un horno de arco eléctrica a escala de laboratorio para la obtención de silicio metalúrgico* (Bachelor's thesis, Español).

- Ignacio-Martínez, M. L., Vázquez-Flores, S. L., & Cruz-Castellanos, D. (2021). *Tipos de materiales*. TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río,8(15), 35-39.
- Juvinall, R. C., & Marshek, K. M. (2023). *Fundamentals of machine component design* (7th ed.). JohnWiley & Sons.
- López Ruano, C. F., & Trejo Flores, L. A. (2013). *Diseño y construcción de un intercambiador de calor directo para horno cubilote* (Bachelor's thesis, QUITO/EPN/2013).
- Maffia, E. G. (2013). *Aluminio y sus aleaciones*. Estructura y Propiedades de las Aleaciones.
- Montejo, J. L. G. (2019). *Diseño de un sistema simulador físico de flujo multifásico para reproducir condiciones de flujo semejantes a las reales*. Villahermosa, Tabasco.
- Morfín Sarceño E. (2017). *Diseño, fabricación y montaje de soplador centrífugo para gases corrosivos y calientes en representaciones químicas, S.A*. Recuperado Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería
- Morlacchi, S. (14 de enero 2021). Programa CFD. Cadlog; Cadlog Group. Recuperado el 15 de febrero de 2024, de <https://www.cadlog.es/temas-clave/programa-cfd/>
- Mott, R. L., Untener, J. A., Murrieta, J. E. M., & Cárdenas, R. H. (2006). *Mecánica de fluidos*.
- Nava, J. R. D. (2004). *Estudio experimental del efecto de la porosidad de partículas sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando aire*.
- Pandey, P. C., & Shan, H. S. (2016). *Modern machining processes*. Tata McGraw-Hill Education.
- Parmar, D. (31 de mayo 2023). *Las 10 mejores computadoras portátiles 2 en 1 para empresas en 2024*. Geekflare. Recuperado el 15 de febrero de 2024, de <https://geekflare.com/es/best->
- Pasinato, H. D., & Confluencia, R. A. (2008). *Fundamentos de mecánica de fluidos. Resumentécnico*.
- Peña Mera, J., & Choreño Torres, C. D. (2019). *Implementación del control de las variables de flujo y presión en un soplador centrífugo*.
- Qué es la Combustión (concepto, definición y tipos) - Significados*. (2019). Recuperado el 9 de febrero de 2024, de <https://www.significados.com/combustion/>

- Soplador centrífugo L-CZR-Taizhou Gaogong Electric Appliance Co., Ltd.* (2019). Chinablowerfan.com. Recuperado el 2 de julio de 2023, de <https://es.chinablowerfan.com/product/1-czr-centrifugal-blower/1-czr-centrifugal->
- Sopladores de aire industrial - Manufacturera Century.* (03 de mayo 2013). Manufacturera Century, S.A. de C.V; Manufacturera Century. Recuperado el 2 de julio de 2023, de <https://mcentury.com.mx/productos/sopladores/>
- Sosa Caballero, P. (2014). *Estudio de la planta de fundición de la DAS del DDF para la fabricación de piezas de fundición de hierro gris.*
- TecScience. (2020). *¿Qué es la manufactura aditiva o impresión 3D?* Recuperado el 5 de abril de 2023, de 2.
- Trujillo Roldán, S. A. (2005). *Diseño y construcción de un horno de crisol para fundición utilizando gas natural* (Bachelor's thesis, Quito: USFQ, 2005).
- Vázquez Padilla, M. A. (1992). *Procesos de fundición: antología de recopilación.*
Zumdahl, S., & Zumdahl, S. (2014). *Química (9ª ed.)*. Cengage Learning.