



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

## **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

### **CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECANICA**

**“TECNOLOGIA DE FABRICACION DEL IMPULSOR CERRADO DE BOMBA  
CENTRIFUGA MARK GRUNDFOS MODELO DVR 10 DE 7.5 kW FABRICADO EN  
HIERRO FUNDIDO”**

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO ELECTROMECANICO**

**AUTOR(ES):**  
Romario Kavier Alcívar Alcívar  
Kleber Agustín Carriel Aveiga

**TUTOR:**  
Ing. Héctor Luis Laurencio Alfonso; Dr. C.

Latacunga, octubre 2025 – marzo 2026

### ***Agradecimiento***

*Agradezco principalmente a mi dios por permitirme cumplir un sueño más de mis objetivos propuestos en la vida a mi madre y padre que han sido el pilar fundamental En todo este proceso y a toda la familia agradezco a los docentes por todo ese proceso de formación Que me sirvieron para ser una buena persona Y un buen profesional en la vida. Gracias a la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirme las puertas y ser un cotopaxense más.*

***Romario Alcivar***

***Dedicatoria***

*El presente título se lo dedico a mis Padres que a pesar de todas las Dificultades en este proceso largo Siempre creyeron en mí, hoy lo logre Juntos con ustedes y todo ese apoyo Incondicional de la familia y amigos Que estuvieron presente en el camino.*

***Romario Alcivar***

### ***Agradecimiento***

*En primer lugar, agradezco a Dios por la salud y vida que me ha brindado día a día y la bendición de seguir adelante cada día. Agradezco a mis padres por todo el apoyo que me han dado en el transcurso de este proceso de cumplir mis objetivos, por confiar en mi y creer en mis sueños, a mi madre por siempre estar pendiente de mi y a mi padre por enseñarme lo que es el esfuerzo y a mi hermana por el apoyo que me ha brindado.*

*Agradezco a toda mi familia por cada granito de arena con el que me ha apoyado.*

*Y por último gracias a mi novia por estar siempre a mi lado en todos estos días y noches de esfuerzo.*

***Kleber Carriel.***

### ***Dedicatoria***

*Este trabajo va dedicado a todas las personas que me han apoyado en todo este proceso, a mi madre Armandina Lourdes Aveiga Llerena, a mi padre Eduardo Kleber Carriel Antón, por siempre confiar en mi y brindarme toda la ayuda para cumplir mis sueños. A mi hermana Arelis Elizabeth Carriel Aveiga, por las ayudas que me ha brindado.*

*A mi novia Evelyn Margoth Chiciasa Aimacaña por seguir inspirándome a seguir con este sueño. Y a mi tía Lucia Carriel Antón que también ha estado ahí ayudándome en los momentos difíciles.*

***Kleber Carriel.***

## UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

### FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADA

#### **TITULO: “TECNOLOGIA DE FABRICACION DEL IMPULSOR CERRADO PARA BOMBA CENTRÍFUGA MARK GRUNDFOS MODELO DVR 10 DE 7.5 Kw FABRICADO EN HIERRO FUNDIDO”**

**Autores:**

Alcivar Alcivar Romario Kavier

Carriel Aveiga Kleber Agustín

#### **RESUMEN**

Este proyecto de investigación establece la tecnología de fabricación para el impulsor cerrado de la bomba centrífuga Mark Grundfos modelo DVR 10 de 7.5 kW, utilizando hierro fundido como material base. La problemática central abordada son las deficiencias tecnológicas en la fundición artesanal que generan porosidad y fallas dimensionales. Para mitigar esto se ajustaron los parámetros teniendo en cuenta los siguientes valores: G: 2.618(kg), E%: 0.89, P2: 1.909(kg), S2:  $7.3(\text{cm}^2) < 10(\text{cm}^2)$ , hdt: 748 (mm), M: 2.41, Qk: 3.54 Kg, sobremedida de maquinado:  $Y_1=303.5$  mm,  $Y_2=46.5$  mm,  $Y_3= 202.5$  mm,  $Y_4= 23.5$  mm,  $Y_5= 302.5$  mm, con el fin de reducir la variabilidad del proceso y minimizar defectologías.

Se utilizó un horno de cubilote a temperaturas de 1480°C, estableciendo un tiempo de enfriamiento crítico de 2 horas y 10 minutos para asegurar la integridad de la pieza. El análisis microestructural final identificó el material como una fundición blanca hipoeutéctica con matriz perlítica y red de cementita, lo cual proporciona una dureza contra el desgaste abrasivo. Las pruebas metalográficas confirmaron una heterogeneidad microestructural que requiere un control riguroso de la velocidad de enfriamiento para homogeneizar las propiedades mecánicas. Desde la perspectiva financiera con un presupuesto inicial de \$713.75, el proyecto resultó altamente rentable, presentando un VAN de USD 1,687.90, un TIR del 39% y un periodo de recuperación de inversión de 1.69 años. En conclusión, la integración de herramientas CAD/CAM y el control estandarizado garantizan una producción eficiente, técnica y económicamente viable para el sector metalmecánico.

**Palabras clave:** tecnología, fundición, defectos, análisis microestructural, moldeo.

**COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY**  
**FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES**

**TITLE: "MANUFACTURING TECHNOLOGY OF THE CLOSED IMPELLER FOR CENTRIFUGAL PUMP MARK GRUNDFOS MODEL DVR 10 OF 7.5 KW MADE OF CAST IRON"**

**Authors:**

Alcivar Alcivar Romario Kavier

Carriel Aveiga Kleber Agustín

**ABSTRACT**

This research project establishes the manufacturing technology for the closed impeller of the Mark Grundfos centrifugal pump model DVR 10 of 7.5 kW, using cast iron as the base material. The central issue addressed is the technological deficiencies in artisanal casting that generate porosity and dimensional failures. To mitigate this, the parameters were adjusted considering the following values: G: 2.618(kg), E%: 0.89, P2: 1.909(kg), S2:  $7.3(\text{cm}^2) < 10(\text{cm}^2)$ , hdt: 748 (mm), M: 2.41, Qk: 3.54 Kg, machining allowance:  $Y_1=303.5$  mm,  $Y_2=46.5$  mm,  $Y_3=202.5$  mm,  $Y_4=23.5$  mm,  $Y_5=302.5$  mm, with the aim of reducing process variability and minimizing defects. A cupola furnace was used at temperatures of 1480°C, establishing a critical cooling time of 2 hours and 10 minutes to ensure the integrity of the part. The final microstructural analysis identified the material as a hypoeutectic white cast iron with a pearlitic matrix and network of cementite, which provides hardness against abrasive wear. Metallographic tests confirmed a microstructural heterogeneity that requires strict control of the cooling rate to homogenize the mechanical properties. From a financial perspective, with an initial budget of \$713.75, the project proved to be highly profitable, presenting a NPV of USD 1,687.90, an IRR of 39%, and a payback period of 1.69 years. In conclusion, the integration of CAD/CAM tools and standardized control guarantees efficient production, both technically and economically viable, for the metalworking sector.

**Keywords:** technology, casting, defects, microstructural analysis, molding.

## ÍNDICE GENERAL

<i>AGRADECIMIENTO</i> .....	v
<i>DEDICATORIA</i> .....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. información general.....	18
2. introducción.....	1
2.1.1. Situación problemática .....	2
2.1.2. Formulación del problema.....	3
2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCION.....	3
2.3. BENEFICIARIOS .....	3
2.3.1. Directos: el beneficiario directo es la Universidad Técnica de Cotopaxi en el campo Salache con la adquisición de un nuevo impulsor para una bomba centrífuga MARK GRUNDFOS MODELO DVR 10 DE 7.5 KW.....	3
2.3.2. Indirectos: Técnicos e ingenieros interesados en la tecnología de fundición, manufactura de impulsores cerrados. ....	3
2.4. JUSTIFICACION.....	3
2.5. OBJETIVOS.....	4
2.5.1. General.....	4
2.5.2. Específicos.....	4
2.5.3. Sistemas de tareas.....	4
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	6
3.1. Bombas centrífugas .....	6
3.1.1. Principio de funcionamiento.....	7
3.1.2. Componentes de la bomba centrífuga .....	8
3.2. Impulsores cerrados.....	8

3.2.1.	Tipos de Impulsor cerrado.....	9
3.3.	Proceso de ingeniería.....	11
3.3.1.	Ingeniería inversa .....	11
3.3.2.	Proceso de diseño .....	11
3.4.	Procesos de manufactura .....	12
3.4.1.	Proceso de fabricación.....	13
3.4.2.	Tipos de proceso de manufactura .....	13
3.4.3.	Proceso de manufactura con tecnología 3D .....	15
3.5.	Autodesk Inventor .....	15
3.6.	Tecnología de fundición .....	15
3.6.1.	La fundición.....	16
3.6.2.	Fundición en materiales metálicos .....	16
3.6.3.	Tipos de fundición .....	17
3.7.	Hornos para fundición .....	19
3.7.1.	Horno de crisol .....	19
3.7.2.	Hornos de llama directa.....	19
3.7.3.	Hornos rotativos .....	20
3.7.4.	Horno cubilote .....	20
3.8.	Arenas de moldeo y machos.....	21
3.8.1.	Características y propiedades de la arena.....	22
3.8.2.	Composición química.....	22
3.8.3.	Distribución granulométrica y morfología de los granos de arena.....	22
3.8.4.	Número de fineza de AFS. ....	23
3.8.5.	Propiedades de la mezcla de moldeo.....	23
3.8.6.	Sistema de moldeo.....	23
3.8.7.	Sistema de colada y alimentación.....	24

3.9.	Defectos de fundición.....	24
	Causas de los defectos de fundición.....	24
3.10.	Mecanizado.....	25
	3.10.1. Proceso de mecanizado.....	25
3.11.	Software CFD.....	28
3.12.	Microestructura de los metales y estudios metalográficos.....	28
	3.12.1. Muestras para la metalografía.....	28
4.	métodos y procedimientos.....	30
4.1.	PROCESO DE DISEÑO.....	31
	4.1.1. Proceso de manufactura.....	32
	4.1.2. Herramientas utilizadas en inventor.....	33
	4.1.3. Elaboración del molde del Impulsor.....	34
	4.1.4. Impresión del macho inferior.....	36
4.2.	PROCESO DE FUNDICION.....	36
	4.2.1. Material del impulsor.....	37
4.3.	Datos necesarios para la calidad de la pieza.....	38
	4.3.1. Peso de la pieza.....	38
	4.3.2. Contracción lineal.....	38
	4.3.3. Fuerza de flotación del macho.....	39
	4.3.4. Área de soporte de los machos.....	39
	4.3.5. Carga de coque.....	40
	4.3.6. Velocidad de separación de inclusiones.....	40
	4.3.7. Composición de la mezcla de machos.....	41
	4.3.8. Presión critica de penetración.....	41
	4.3.9. Balance de carga del horno.....	42
	4.3.10. Sobremedida de maquinado.....	43

4.3.11.	Tiempo de enfriamiento.....	43
4.3.12.	Proyección de los machos .....	44
4.3.13.	Determinación de la caja de moldeo.....	44
4.4.	Procedimiento de moldeo .....	44
4.4.1.	El molde.....	44
4.4.2.	Moldeo en verde .....	45
4.4.3.	Material de fundición.....	45
4.4.4.	Temperatura del metal liquido.....	46
4.5.	Proceso de fundición .....	46
4.5.1.	Proceso de enfriamiento .....	47
4.5.2.	Remoción de la pieza fundida .....	47
4.5.3.	Limpieza de la pieza fundida.....	47
4.6.	PROCESO DE MECANIZADO .....	47
4.6.1.	Tecnología de maquinado.....	48
4.6.2.	Pasos de mecanizado .....	48
4.6.3.	Ecuación de refrentado .....	49
4.6.4.	Ecuación de cilindrado y mandrinado .....	49
4.7.	PROCESO METALOGRAFICO .....	50
4.7.1.	Equipos y materiales para la metalografía.....	51
4.7.2.	Pasos para el análisis metalográfico .....	51
5.	análisis y discusión de los resultados .....	56
5.1.	ANALISIS DE DISEÑO DE LA PLANTILLA .....	57
5.2.	ANALISIS DE ESFUERZO EN LOS MOLDES DEL IMPULSOR.....	58
5.2.1.	Simulación de esfuerzo del macho inferior .....	58
5.2.2.	Simulación de la primera y tercera tensión en el macho inferior. ....	59
5.2.3.	Simulación de funcionamiento del impulsor fabricado en hierro fundido .....	61

5.2.4.	Simulación de funcionamiento del impulsor fabricado en bronce aluminio ....	62
5.3.	MATERIAL DE FUNDICIÓN .....	63
5.3.1.	Hierro fundido .....	63
5.3.2.	Temperatura de fundición.....	63
5.4.	ANÁLISIS DE LA TECNOLOGIA DE FUNDICION .....	64
5.4.1.	Velocidad de separación de inclusiones .....	67
5.4.2.	Presión critica de penetración.....	68
5.5.	CAJA DE MOLDE.....	69
5.6.	TIEMPO DE ENFRIAMIENTO .....	69
5.6.1.	Cálculo de tiempo de enfriamiento.....	70
5.7.	REMOCIÓN DEL MATERIAL .....	70
5.7.1.	Desmoldeo del material .....	70
5.8.	ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL IMPULSOR FUNDIDO .....	71
5.8.1.	Análisis macroestructural .....	71
5.8.2.	Análisis microestructural .....	72
5.8.3.	Análisis microestructural final.....	81
5.9.	MECANIZADO DEL IMPULSOR FUNDIDO .....	84
5.9.1.	Mecanizado por arranque de viruta .....	84
5.9.2.	Mecanizado por torneado .....	84
5.10.	VALORACIÓN ECONÓMICA.....	86
5.11.	IMPACTO TECNOLÓGICO .....	89
5.12.	IMPACTO AMBIENTAL.....	90
6.	conclusiones y recomendaciones.....	90
6.1.	CONCLUSIONES.....	90
6.2.	RECOMENDACIONES .....	91
7.	referencias.....	92

## INDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Diseños de bombas centrífugas. [1] .....	7
Figura 3.2. Principio de funcionamiento de la bomba centrífuga. [1].....	8
Figura 3.3. Impulsor cerrado.[3].....	9
Figura 3.4. Tipos de impulsores cerrado realizado con IA.....	10
Figura 3.5. Factores de aplicación de ingeniería inversa en la industria.[4] .....	11
Figura 3.6. Etapas de manufactura.[6].....	13
Figura 3.7. Procesos de fabricación.[6] .....	13
Figura 3.8. Manufactura por solidificación o fundición.[6] .....	14
Figura 3.9. Manufactura por corte o arranque de viruta.[6] .....	14
Figura 3.10. Manufactura por abrasión.[6].....	15
Figura 3.11. Actividades para el proceso de fundición.[6].....	16
Figura 3.12. Materiales de fundición.[6] .....	17
Figura 3.13. Proceso de función por inyección.[6].....	18
Figura 3.14. Proceso de fundición por inyección.[6] .....	19
Figura 3.15. Horno de crisol. [11] .....	19
Figura 3.16. Horno de llama directa. [12] .....	20
Figura 3.17. horno rotativo.[12] .....	20
Figura 3.18. horno de cubilote. [12] .....	21
Figura 3.19. Clasificación de los granos de arena.[14] .....	23
Figura 3.20. Sistema de colada y alimentación.[16].....	24
Figura 3.21. Principio de torno.[19] .....	26
Figura 3.22. Ejes presentes en la máquina.[19].....	26
Figura 3.23. Proceso de refrentado.[19] .....	27
Figura 3.24. Proceso de cilindrado.[19] .....	28
Figura 3.25. Métodos de preparación de muestras metálicas para metalografía.[23] .....	29
Figura 4.1. Ingeniería inversa. ....	32
Figura 4.2. Rediseño del impulsor.....	32

Figura 4.3. Estructura del impulsor. ....	36
Figura 4.4. Impresora 3D ELEGOO.....	36
Figura 4.5. Clasificación de tipos de arena.....	42
Figura 4.6. Índice de finura de la arena. ....	42
Figura 4.7. Moldes realizados.....	45
Figura 4.8. Diagrama de hierro-carbono.[25].....	46
Figura 4.9. Horno de cubilote.....	46
Figura 4.10. Mecanizado de torneado. ....	49
Figura 4.11. Corte del impulsor defectuoso. ....	51
Figura 4.12. Extracción de las muestras. ....	52
Figura 4.13. Papel abrasivo (lija).....	52
Figura 4.14. Desbaste de las muestras.....	53
Figura 4.15. Alúmina para pulir. ....	53
Figura 4.16. Paño de pulir. ....	54
Figura 4.17. Muestras totalmente limpias. ....	54
Figura 4.18. Ataque químico con nital. ....	55
Figura 4.19. Muestras después del ataque químico. ....	55
Figura 4.20. Observación de la microestructura de las muestras. ....	56
Figura 5.1. Impulsor elaborado. ....	56
Figura 5.2. Impulsor de bronce-aluminio dañado. ....	57
Figura 5.3. simulación del macho inferior.....	59
Figura 5.4. Simulación de la primera tensión principal.....	59
Figura 5.5. simulación de tercera tensión superficial. ....	60
Figura 5.6. Simulación del desplazamiento máximo de la pieza. ....	61
Figura 5.7. Simulación del impulsor fabricado en hierro fundido. ....	62
Figura 5.8. Simulación del impulsor fabricado en bronce.....	63
Figura 5.9. diagrama hierro carbono. ....	64
Figura 5.10. Velocidad de separación de inclusiones.....	68
Figura 5.11. Presión crítica de penetración. ....	68
Figura 5.12. Caja de molde para el impulsor.....	69
Figura 5.13. Curva de enfriamiento estimada.....	70
Figura 5.14. Remoción del material. ....	71

Figura 5.15. Rechupes e inclusiones en el impulsor.....	71
Figura 5.16. Grietas de solidificación.....	72
Figura 5.17. Proyección de metal irregulares en los bordes.....	72
Figura 5.18. Microestructura en hierro fundido blanco.....	83
Figura 5.19. Mecanizado de la chaveta. ....	86

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Modalidad de titulación.....	1
Tabla 2.1. Sistema de Tareas.....	4
Tabla 4.1. Equipos y materiales utilizados.....	30
Tabla 4.2. Barra de herramientas utilizadas .....	33
Tabla 4.3. características de fundición.....	37
Tabla 5.1. Tabla de sobredimensión de la plantilla y caja de machos.....	57
Tabla 5.2. Impulsor simulado e impreso en 3D.....	57
Tabla 5.3. Análisis de la tecnología de fundición.....	64
Tabla 5.4. análisis metalográfico.....	72
Tabla 5.5. Comparación metalográfica.....	80
Tabla 5.6. características del hierro fundido.....	82
Tabla 5.7. Cálculo de tiempo de mecanizado.....	84
Tabla 5.8. Costo de producción.....	86
Tabla 5.9. TIR y VAN.....	87
Tabla 5.10. valores de inversión.....	88
Tabla 5.11. VAN Y TIR.....	88
Tabla 5.12. acabado del impulsor en bronce-aluminio y hierro fundido.....	89

## 1.INFORMACION GENERAL

**Tema del proyecto:** Tecnología de fabricación del impulsor cerrado de bomba centrifuga mark grundfos modelo DVR 10 de 7.5 kW fabricado en hierro fundido.

**Modalidad de Titulación:**

Tabla 1.1. Modalidad de titulación.

MODALIDAD DE TITULACIÓN	HOMOLOGACIONES PARA INFORME FINAL DE TITULACIÓN	SELECCIÓN
Propuesta tecnológica	Informe de propuesta tecnológica	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
	Artículo científico	
Proyecto de investigación	Informe de Proyecto de investigación	X
	Artículo científico	
	Patente, Modelo de utilidad, Certificado de propiedad intelectual.	
Examen de indicadores de RDA		

**Trabajo de Titulación Vinculado al Proyecto:** Implementación de Tecnologías de fundición para la fabricación de un impulsor cerrado.

**Equipo de Trabajo del Trabajo de Titulación:**

Alcivar Alcivar Romario Kavier

Carriel Aveiga Kleber Agustín

Ing. Héctor Luis Laurencio Alfonso; Dr. C.

**Área de Conocimiento:** 07 Ingeniería, Industria y Construcción-

**Línea de investigación:** Procesos industriales

**Sublíneas de investigación de la Carrera:** Diseño, construcción y mantenimiento de proyectos electromecánicos.

## 2.INTRODUCCIÓN

El impulsor cerrado de una bomba centrífuga, fabricado en hierro fundido, se fabrica normalmente mediante un proceso de fundición en arena.

Sin embargo, en muchos entornos de fabricación existen limitaciones tecnológicas relacionadas con el diseño de moldes, la preparación de la arena, el control de los parámetros de fundición y endurecimiento y las operaciones de acabado posteriores.

Las deficiencias de la tecnología de procesamiento de fundición son las principales causas de defectos como porosidad, impurezas de arena, depresiones y cambios dimensionales, que afectan directamente la calidad del impulsor, así como su rendimiento mecánico.

En términos de alcance, es necesario analizar y ajustar la tecnología del proceso de fundición de impulsor cerrado de las bombas centrífugas, identificar variables importantes del proceso y establecer estándares técnicos que puedan mejorar la calidad del producto final. Este análisis pretende contribuir a la reducción de defectos de fundición, el uso eficiente de materiales y la estandarización de los procesos de fabricación, asegurando el funcionamiento confiable de los impulsores de acuerdo con las necesidades técnicas de la industria.

### **2.1.1. Situación problemática**

En Ecuador, la operación continua de los sistemas de agua potable, riego e industriales depende en gran medida de las bombas centrífugas, y por lo tanto la disponibilidad y confiabilidad de sus componentes vitales representa un tema técnico y económico importante.

El impulsor cerrado tiene un rol relevante en la estabilidad operativa de la bomba, así como en el rendimiento, la altura de presión y el caudal.

Por tanto, cualquier cambio en el proceso de fabricación afecta al rendimiento de los equipos, al mantenimiento y a los costes energéticos.

Sin embargo, en la producción nacional de impel de hierro fundido mediante fundición en arena y posterior procesamiento mecánico, aún existen limitaciones tecnológicas y de control de procesos, lo que provoca defectos de fundición y desviaciones dimensionales (porosidad, impurezas, ductilidad, falta de carga, desviaciones y dimensionamiento inadecuado).

Estas no conformidades a menudo están asociadas con: control inadecuado de arena y núcleos (humedad, presión, permeabilidad), deficiencias en el diseño del sistema de fundición y alimentación, variaciones en la temperatura/composición mineral y falta de planes de prueba y criterios de aceptación estrictos.

Como resultado, aumentan los desperdicios y el retrabajo, disminuye la repetibilidad del proceso y pueden ocurrir errores de operación (vibración, cavitación acelerada o desgaste), lo que afecta la confiabilidad del funcionamiento de la bomba.

El problema surge entonces de que la tecnología de construcción de impulsor cerrado de la bomba centrífuga Mark Grundfos DVR 10 (7,5 kW), cuando no está estandarizada y controlada, genera variaciones y defectos que afectan la calidad final y el funcionamiento de la pieza, afectando la continuidad de operación, los costos de mantenimiento y la eficiencia energética.

### **2.1.2. Formulación del problema**

Deficiencias en la tecnología del proceso de fundición generan defectos que afectan su funcionalidad, por ello, se requiere analizar y ajustar dicho proceso con la finalidad de mejorar la calidad y desempeño del componente.

## **2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCION**

**Objeto de investigación:** Proceso tecnológico de fabricación del impulsor cerrado de la bomba centrífuga Mark Grundfos, modelo DVR 10 (7,5 kW), en hierro fundido.

**Campo de Acción:** 3315 Talleres de Forja, laminación y Fundición Hierro y Acero.

## **2.3. BENEFICIARIOS**

**2.3.1. Directos:** el beneficiario directo es la Universidad Técnica de Cotopaxi en el campo Salache con la adquisición de un nuevo impulsor para una bomba centrífuga MARK GRUNDFOS MODELO DVR 10 DE 7.5 KW.

**2.3.2. Indirectos:** Técnicos e ingenieros interesados en la tecnología de fundición, manufactura de impulsores cerrados.

## **2.4. JUSTIFICACION**

Desde el enfoque productivo e industrial, el análisis y ajuste del proceso de fundición permitirá establecer criterios técnicos que contribuyan a la mejora de la calidad de piezas, reduciendo defectos, reprocesos y desperdicio en la fabricación de materiales. Esto favorece la estandarización del proceso de fabricación y fortalece la confiabilidad del componente en condiciones reales de operación, aspecto fundamental para diferentes equipos utilizados en aplicaciones industriales.

En el ámbito académico y científico, el estudio aporta conocimiento aplicado sobre la tecnología de fundición de hierro fundido para componentes hidráulicos, sirviendo como referencia para futuras investigaciones y proyectos relacionados con la fabricación de piezas. Asimismo, los resultados obtenidos podrán ser utilizados como base para la mejora continua de procesos de fundición en el contexto nacional, contribuyendo al desarrollo tecnológico del sector metalmeccánico.

## **2.5. OBJETIVOS**

### **2.5.1. General**

Proponer la tecnología de fundición del impulsor cerrado de la bomba centrífuga Mark Grundfos modelo DVR 10 de 7,5 kW fabricado en hierro fundido, mediante el análisis y ajuste de las etapas del proceso de fundición, para mejorar la calidad, confiabilidad y durabilidad del componente.

### **2.5.2. Específicos**

Analizar cambios en el diseño de la plantilla del impulsor de bronce aluminio y hierro fundido, utilizando los programas CFD e Inventor.

Seleccionar el tipo de tecnología de fundición más apropiado para la fabricación del impulsor en hierro fundido, considerando sus propiedades microestructurales, físicas, mecánicas y de resistencia del material.

Ejecutar el proceso de manufactura, fundición y maquinado.

### **2.5.3. Sistemas de tareas**

Tabla 2.1. Sistema de Tareas.

Objetivos específicos	Actividades (Tareas)	Resultados de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
-----------------------	----------------------	----------------------------	-------------------------------------------------------

<p>Analizar cambios en el diseño de la plantilla del impulsor de bronce aluminio y hierro fundido por medio del método de ingeniería inversa, utilizando los programas CFD e Inventor.</p>	<p>Recopilación de datos acerca del impulsor de la bomba para diseño en el software inventor.</p>	<p>Comparamos la plantilla anterior el cual modificamos en los alabe para que el impulsor tenga un mayor rendimiento y no este expuesto al desgaste por los sedimentos, realizando simulaciones de tensión y fluido para observar los resultados.</p>	<p>Software inventor, Fusión 360, CFD, Excel para realizar las gráficas.</p>
	<p>Identificar los efectos que tienen los cambios de diseño en el impulsor.</p>	<p>Se identificaron los diferentes efectos que tiene el cambio de diseño mediante simulación.</p>	
<p>Seleccionar el tipo de tecnología de fundición más apropiado para la fabricación del impulsor, considerando sus propiedades microestructurales, físicas, mecánicas y de resistencia.</p>	<p>Revisión técnica y especificación de requisitos.</p>	<p>Lista de requisitos material, densidad, limite elástico, dureza, tenacidad, tolerancia, resistencia.</p>	<p>Estas actividades se realiza mediante consultas bibliográficas, proyectos de grado y tesis, libros.</p>
	<p>Identificación de tecnologías de fundición.</p>	<p>Inventarios cortos de tecnologías aplicables con</p>	<p>Se realiza la metalografía para el análisis estructural de la pieza.</p>

		ventajas y limitaciones.	
	Análisis microestructural del material	Composición de la aleación del material	
Ejecutar el proceso de manufactura, fundición y maquinado.	Preparar los materiales, herramientas y equipos necesarios para la fundición.	Materiales seleccionados, moldes adecuados y equipos listos para la fundición.	En el hierro fundido, se revisa el tipo de horno a ocupar y las herramientas.
	Fundir y colar el hierro en el molde del impulsor.	Impulsor con forma adecuada y sin defectos visibles.	Se funde el hierro y se realiza la colada en moldes de arena.
	Desmoldar y limpiar la pieza fundida.	Impulsor sólido y libre de impurezas.	Se deja enfriar, se desmolda y se elimina residuos con herramientas abrasivas o cepillos metálicos.
	Maquinar las superficies del impulsor.	Impulsor mecanizado con medidas y acabado dentro de las tolerancias.	Se utiliza torno, fresadora y calibradores.

### 3.FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 3.1. Bombas centrífugas

Dentro de las máquinas hidráulicas rotodinámicas, las bombas centrífugas son las más utilizadas. Esto se debe a que cubren un rango de trabajo muy amplio: pueden manejar caudales muy pequeños ( $\approx 1$  L/min) y, al mismo tiempo, llegar a valores del orden de  $10^6$  L/min. De manera similar, son capaces de generar alturas manométricas desde unos pocos metros hasta cientos de metros, incluso cuando se trabaja con una sola etapa. La potencia instalada también varía considerablemente, desde decenas de vatios hasta varios megavatios. En equipos de mayor

capacidad, el rendimiento puede acercarse al 90%, y el consumo de potencia por lo general aumenta conforme se incrementa el caudal.

En cuanto a su construcción, estas bombas se fabrican en distintos materiales y con varias configuraciones del conjunto impulsor, como se muestra en la Figura 3.1. Además, existen soluciones como accionamientos magnéticos y sellos dinámicos, que se seleccionan según las condiciones de operación. Para ajustar el sistema a las necesidades del proceso, también es común utilizar arreglos de bombas trabajando en serie o en paralelo, dependiendo del caudal y la altura requeridos. [1]

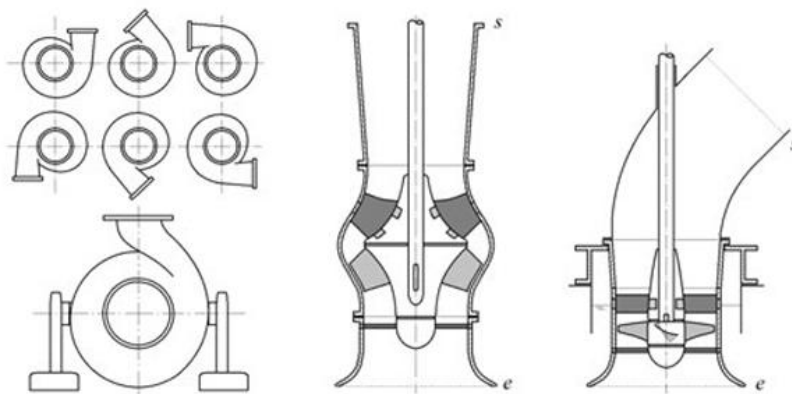


Figura 3.1. Diseños de bombas centrífugas. [1]

### 3.1.1. Principio de funcionamiento

El rodete de una bomba centrífuga incorpora un número definido de álabes, por lo general curvados en sentido contrario al giro, los cuales determinan la dirección de las velocidades absoluta y relativa del fluido dentro del impulsor. El líquido ingresa por la zona central debido a la depresión generada durante la rotación y, al ser conducido por los álabes, se desplaza en sentido radial; por esta razón, a la salida el flujo presenta componentes radial y tangencial, sin componente axial.

En los rodetes cerrados, se establece un canal de circulación entre los álabes y las paredes internas laterales del rotor. Como el rodete es el que proporciona la mayor parte del aumento de energía del fluido, su tamaño y forma tienen un impacto importante en el funcionamiento de la máquina. No obstante, la energía transferida no se traduce íntegramente en presión estática; una parte significativa se manifiesta como energía cinética, la cual debe transformarse en presión mediante difusores, se puede observar en la Figura 3.2. [1]

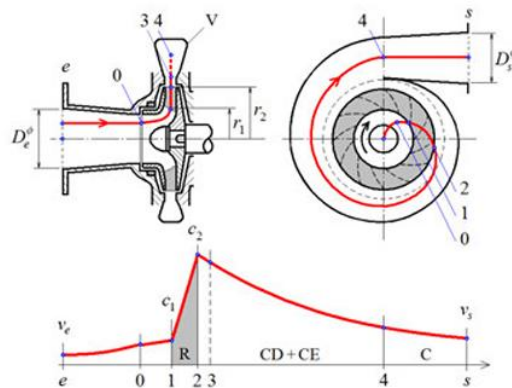


Figura 3.2. Principio de funcionamiento de la bomba centrífuga. [1]

### 3.1.2. Componentes de la bomba centrífuga

Una bomba centrífuga es un aparato hidráulico que se utiliza para transportar líquidos; en ella, la energía mecánica proporcionada por el motor es transformada en energía hidráulica. Para cumplir esta función, integra un conjunto de componentes que operan de forma coordinada.

Además del circuito hidráulico, la bomba dispone de elementos mecánicos que garantizan un funcionamiento estable y seguro. Entre los componentes principales se incluyen:

- Rodete o impulsor: Está formado por álabes cuya geometría se define en función de la aplicación. Gira dentro de una carcasa circular, es accionado por el motor y permanece rígidamente acoplado al eje, constituyéndose como el elemento móvil fundamental del equipo.
- Voluta: Es un elemento fijo con geometría espiral que rodea la zona de descarga del rodete. La separación entre la voluta y el impulsor es reducida al inicio y aumenta de manera gradual hasta la salida. Su finalidad es recoger el líquido descargado a alta velocidad, ordenar el flujo y conducirlo hacia la brida de impulsión.
- Tubería de impulsión: Se sitúa a la salida de la voluta y permite la evacuación del líquido con la presión y la velocidad generadas durante el funcionamiento.

En términos generales, estos elementos constituyen la configuración básica de una bomba centrífuga, si bien existen variantes constructivas según el servicio requerido. De manera análoga, su estructura presenta similitudes con la de una turbina hidráulica. [2]

### 3.2. Impulsores cerrados

En el impulsor cerrado, los álabes se disponen entre dos discos laterales, conformando una estructura única de elevada rigidez. Este tipo de impulsor se emplea con mayor frecuencia en

bombas de mayor tamaño, debido a que permite alcanzar altas eficiencias y, en general, requiere un NPSH relativamente bajo. Por ello, para bombear líquidos limpios o transparentes, las bombas centrífugas de impulsor cerrado son comúnmente las más empleadas.

Su desempeño está condicionado por la necesidad de mantener holguras reducidas y por la incorporación de anillos de desgaste tanto en el impulsor como en la carcasa, con el fin de limitar pérdidas internas. Sin embargo, se trata de una solución más compleja y de mayor costo, no solo por la fabricación del rodete, sino también por el requerimiento de anillos de desgaste adicionales, como se indica en la Figura 3.5. [3]



Figura 3.3. Impulsor cerrado.[3]

### 3.2.1. Tipos de Impulsor cerrado.

En el análisis de la tecnología de fundición aplicada a la fabricación del impulsor de la bomba centrífuga Grundfos DVR 10 (7,5 kW), se determina que el impulsor cerrado constituye la alternativa más conveniente desde el enfoque técnico y productivo. Este tipo de rodete, conformado por álabes dispuestos entre dos discos (cubierta delantera y trasera), presenta una geometría de mayor complejidad que, sin embargo, puede reproducirse de manera eficaz mediante fundición en moldes de arena, tecnología ampliamente utilizada en la obtención de componentes en hierro fundido.

Los impulsores cerrados, al incorporar cubiertas anterior y posterior, suelen ofrecer mayor eficiencia hidráulica y se recomiendan principalmente para el manejo de líquidos limpios o con baja presencia de partículas, tal como se aprecia en la Figura 3.6.

- Impulsor cerrado de álabes rectos: empleado en bombas pequeñas que operan a altas presiones; presenta buen desempeño cuando el fluido es muy limpio.
- Impulsor cerrado de álabes curvos (curvados hacia atrás): es el diseño más común; se

caracteriza por alto rendimiento y menor carga axial.

- Impulsor cerrado de álabes curvados hacia adelante: menos frecuente en aplicaciones industriales; puede entregar mayor caudal, aunque generalmente con menor eficiencia que los de álabes curvados hacia atrás.
- Impulsor cerrado multietapa: orientado a sistemas de altas presiones, como bombas para pozos profundos o alimentación de calderas.
- Impulsor cerrado tipo turbina: adecuado cuando se requiere alto caudal con una elevación favorable; se utiliza en turbomáquinas de flujo mixto.
- Impulsor cerrado de flujo axial: incrementa la presión trabajando con gran caudal a baja altura manométrica; es menos común, pero existe en aplicaciones industriales.
- Impulsor cerrado de corte: incorpora bordes cortantes para el manejo de fibras o sólidos blandos.
- Impulsor cerrado de alta carga hidráulica: diseño especializado para soportar cargas elevadas, manteniendo alta eficiencia y robustez estructural.

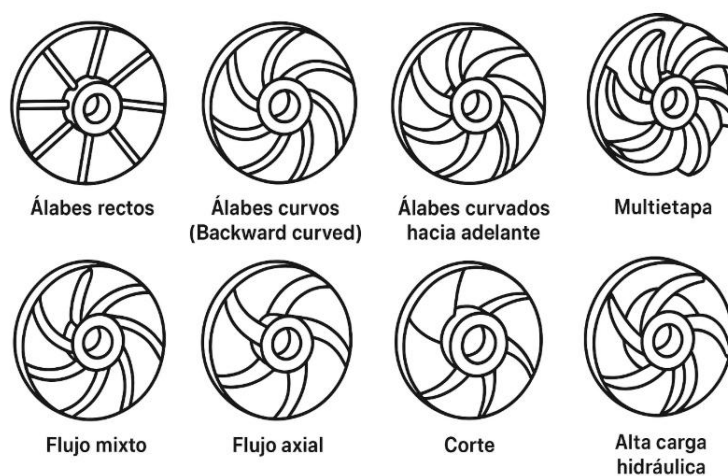


Figura 3.4. Tipos de impulsores cerrado realizado con IA.

### **Ventajas entre los impulsores cerrados.**

- Operación estable y adecuada para altas presiones.
- Mayor eficiencia, lo que conlleva a un consumo de energía más bajo.
- Reducción de la fuerza axial en comparación con otras configuraciones.
- Capacidad de generar caudales significativos con diámetros relativamente menores, según el diseño.

- Posibilidad de lograr presiones muy elevadas con control operativo más preciso (especialmente en configuraciones multietapa).
- Diseño robusto y eficiente para condiciones de trabajo exigentes.[3]

### 3.3. Proceso de ingeniería

#### 3.3.1. Ingeniería inversa

La ingeniería inversa se enfoca en examinar un sistema, proceso o elemento para identificar sus características y funciones, con el fin de reproducirlo o crear una base para su rediseño. Esta técnica permite extraer información directamente desde un objeto físico, incluso sin tener planos o archivos digitales, en componentes mecánicos. Por lo tanto, es una opción efectiva para duplicar piezas, sustituir partes y restaurar información técnica que se ha perdido debido a la rotura, el desgaste o la degradación. La duplicación de partes y la creación de sistemas que se basan en un modelo existente son algunos de sus usos más comunes. Borja-Ramírez propuso un esquema de factores para la implementación de la ingeniería inversa en el contexto industrial, se indica en la figura 3.7. [4]



Figura 3.5. Factores de aplicación de ingeniería inversa en la industria.[4]

#### 3.3.2. Proceso de diseño

Hoy en día, la ingeniería inversa se emplea como un apoyo para innovar en el diseño, sobre todo debido a su habilidad para acelerar la fase de desarrollo y digitalizar modelos físicos. Algunas de sus aplicaciones más comunes son:

- Desarrollo de nuevos productos: La ingeniería inversa permite crear una representación digital cuando se parte de un prototipo físico. Con esa base se ejecutan optimizaciones y mejoras en los entornos CAD, y al final, el producto se manufactura a través de procesos y equipos CAM.
- Reemplazo de piezas dañadas o con desgaste: Si no hay planos disponibles y una pieza concreta se desgasta o se rompe, es posible reconstruir la geometría en CAD utilizando el modelo físico y volver a fabricarla.
- Verificación e inspección industrial: La comparación entre la pieza real y su modelo CAD permite llevar a cabo una evaluación dimensional.
- Actualización de documentación técnica: Es habitual realizar cambios durante la producción con el fin de optimizar el desempeño o adecuar las tolerancias; En consecuencia, es indispensable que el documento CAD sea revisado y actualizado para que coincida con el producto final.[4]

### **3.4. Procesos de manufactura**

La manufactura, que proviene de las palabras latinas "manus" (mano) y "factura" (elaborar o hacer), se relaciona históricamente con la producción manual. En esta línea, se refiere al procedimiento de convertir materias primas en productos acabados que son adecuados para ser vendidos. [5]

Desde una perspectiva tecnológica, la manufactura puede definirse como el uso de procedimientos que cambian la estructura o microestructura de un material, lo cual provoca cambios en sus características físicas, químicas y mecánicas. [5]

La manufactura tiene distintas etapas que reflejan el avance y la optimización de la eficiencia productiva. Cada uno de estos pasos supone una mejora en los procedimientos y en la implementación de tecnología con el fin de alcanzar niveles superiores de desempeño, tal como se ilustra en la Figura 3.8.[6]



Figura 3.6. Etapas de manufactura.[6]

### 3.4.1. Proceso de fabricación

La transformación de las materias primas en un producto terminado se lleva a cabo mediante el procedimiento de producción. La fabricación empieza con el diseño del producto y la elaboración de los materiales. Para conseguir el producto necesario, estos materiales sufren alteraciones durante la manufactura.[7]

En la figura 3.9 se detallan los principales procesos a los que se someten las piezas para transformarlas en productos finales.[6]



Figura 3.7. Procesos de fabricación.[6]

### 3.4.2. Tipos de proceso de manufactura

- **Proceso de fabricación mediante solidificación o fundición.**

La fundición es un proceso que consiste en calentar un metal hasta su punto de fusión. Una vez que el metal se vuelve líquido, se coloca en una cuchara o crisol para modificar

su composición química y luego se vierte en un molde previamente fabricado. Al solidificarse, el metal toma la forma final deseada, tal como se ilustra en la figura 3.10. [6]

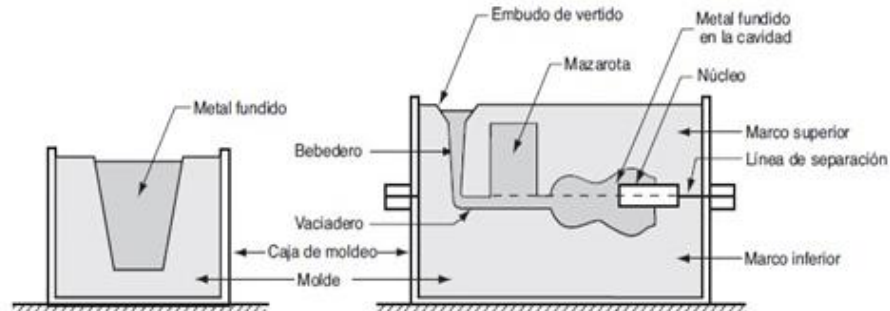


Figura 3.8. Manufactura por solidificación o fundición. [6]

- **Proceso de manufactura por corte o arranque de viruta.**

Es el que se utiliza para dar forma a un material utilizando una herramienta de corte, por medio del arranque de fragmentos o virutas del material. El instrumento de corte suele ser una cuchilla, un buril, una fresa, un machuelo, etc. Este avanza en contra de la pieza y la modifica plásticamente y elásticamente en la zona que se desea alterar. De esta manera, se le va dando forma a lo que se quiere conseguir, como puede verse en la figura 3.11.

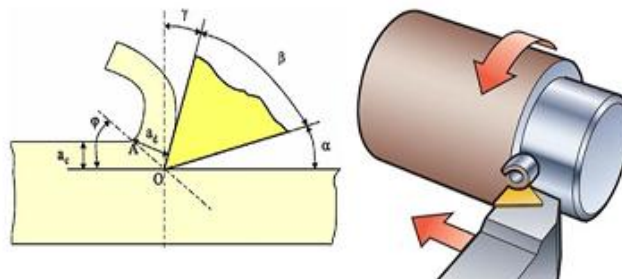


Figura 3.9. Manufactura por corte o arranque de viruta. [6]

- **Proceso de manufactura por abrasión.**

Los procesos de abrasión requieren el uso de herramientas abrasivas, como muelas, lijas o barras, con el propósito de suprimir pequeñas porciones de material. Se realizan para lograr la forma y los acabados que se desean; esto se ilustra en la figura 3.12. [6]

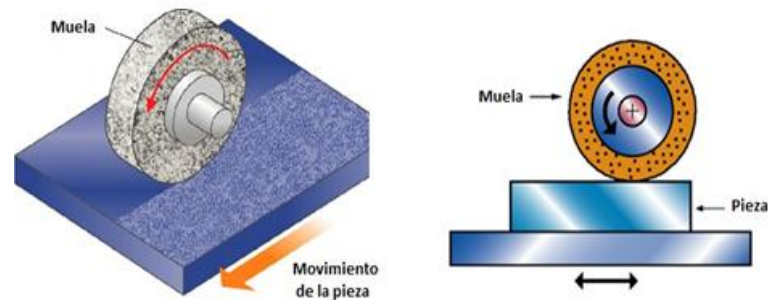


Figura 3.10. Manufactura por abrasión.[6]

### 3.4.3. Proceso de manufactura con tecnología 3D

La aparición de métodos de fabricación más sofisticados, como la impresión 3D, ha cambiado notablemente el panorama manufacturero al facilitar la optimización de características de los materiales y la producción de geometrías complejas que antes resultaban difíciles o imposibles. [8]

La impresión en 3D, también llamada fabricación aditiva, es una tecnología que permite generar cosas físicas a partir de modelos o planos digitales 3D. Estos modelos se generan utilizando software de diseño asistido por computadora. Asimismo, posibilita la fabricación compacta y portátil en el lugar, la elaboración a pedido y la disminución de residuos, lo cual mejora las métricas establecidas, como son la reducción de inventarios, los tiempos de entrega y los desechos o residuos producidos. [9]

### 3.5. Autodesk Inventor

Es un software que se utiliza para elaborar conjuntos y piezas mecánicas, además de planos de ensamblaje. Asimismo, posibilita la simulación dinámica o estática del conjunto y también el análisis de nodos y fuerzas en elementos finitos. Esto facilita la identificación de parámetros de diferentes componentes, lo que ayuda a detectar áreas frágiles y posibles puntos débiles en el diseño.

Esto le posibilita adaptar el tamaño según sea requerido para asegurar que todos los elementos operen de manera adecuada.[10]

### 3.6. Tecnología de fundición

La tecnología de fundición es considerada uno de los fundamentos históricos y actuales de la metalurgia, gracias a su capacidad de transformar el metal en piezas de formas simples o muy complejas, vertiendo el material en estado líquido en un molde.

Este método de fabricación nos permite obtener piezas que se asemejan mucho a la forma final, reduce las etapas de procesamiento y puede crear piezas de gran tamaño o piezas con cavidades internas, que serían difíciles o costosas de producir con otros métodos.

### 3.6.1. La fundición

Es un proceso en el que el material a fabricar se convierte a estado líquido mediante transferencia de calor en un horno.

Este material fundido luego se vierte en un molde hueco, utilizando el efecto de la gravedad u otra fuerza externa, después de la solidificación toma la forma del molde, formando un producto fundido.

Este proceso de fundición se divide en dos áreas básicas: fusión y moldeo.

Pero aun así es necesario considerar primero todo el proceso, incluido el diseño y las especificaciones de las piezas.

La Figura 3.13 muestra un diagrama de las operaciones que normalmente se realizan durante una fusión.[6]

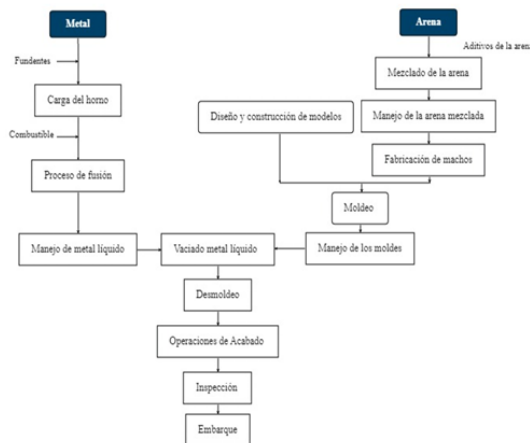


Figura 3.11. Actividades para el proceso de fundición.[6]

### 3.6.2. Fundición en materiales metálicos

El proceso de fundición implica elevar el material hasta un punto de fusión que se puede lograr utilizando materiales poliméricos y metálicos, incluidos materiales ferrosos y no ferrosos, como se ilustra en la figura 3.14.



Figura 3.12. Materiales de fundición.[6]

Los materiales metálicos se caracterizan por una excelente conductividad térmica y eléctrica, además de su alta densidad y su solidez a temperaturas normales.

Los metales son muy utilizados en la industria debido a sus propiedades como resistencia mecánica, ductilidad, etc. Estos materiales minerales se dividen en metales ferrosos y no ferrosos.

**Metales no ferrosos:** Estos metales tienen como base el hierro, siendo las más importantes las aleaciones hierro-carbono, conocidas como acero y hierro fundido.

El acero es una aleación de hierro que incluye carbono en una proporción del 0,02% al 2,11%, y tiene la posibilidad de incorporar otros elementos como níquel, manganeso, molibdeno o cromo.

Estos metales se utilizan principalmente por su resistencia a la tracción y durabilidad.

El hierro fundido o fundición es una aleación de hierro con un contenido de carbono que oscila entre el 2,1% y el 6,67%.

Este hierro fundido es menos dúctil y más duro que el acero, aunque se funde más fácilmente a temperaturas más bajas que el acero y tiene buena moldeabilidad, lo que permite producir piezas complejas mediante matrices. Se utiliza para producir piezas de máquinas, tapas de motores, engranajes, pistones, farolas, tapas de alcantarillas, bloques de motores, etc. [6]

### 3.6.3. Tipos de fundición

**Fundición en arena:** esto se realiza comprimiendo arena de fundición alrededor del patrón de la pieza dentro del molde.

**Fundición por revestimiento:** En esta modalidad de fundición, el modelo se realiza en cera y se recubre con un material refractario para crear un molde.

Una vez formado el molde, se calienta todo el conjunto para derretir la cera y retirarla del molde, permitiendo que la cavidad dentro del molde descargue el material fundido y cree el producto.

**Fundición por moldeo en carcasa:** implica preparar un molde hecho de chapa sobre una placa patrón de metal, produciendo piezas con tolerancias dimensionales ajustadas y buen acabado superficial a bajo costo, lo que puede reducir o eliminar el posprocesamiento de las piezas.

**Fundición en molde metálico:** la matriz se divide en dos mitades hechas de materiales como hierro fundido, acero, cobre o aleaciones metálicas resistentes al calor. Después de calentar las mitades del molde, el metal fundido se vierte a través de los canales de alimentación y, una vez solidificado, se abren los moldes y se retira la pieza fundida.

Este proceso se puede automatizar para la producción en masa.

**Fundición por inyección:** proceso de utilizar presión para empujar el metal fundido hacia arriba dentro de un molde de grafito o metal, como se ilustra en la Figura 3.15.

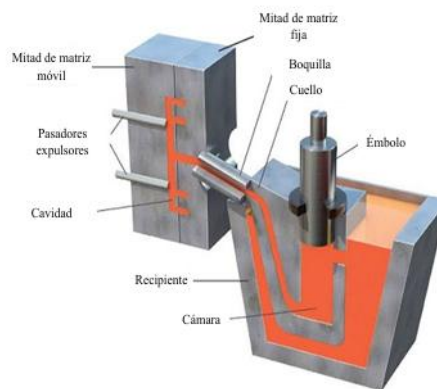


Figura 3.13. Proceso de fundición por inyección.[6]

**Fundición por centrifugación:** La fuerza centrífuga generada por la rotación del molde se utiliza para distribuir el metal fundido en las cavidades.

Este proceso se utiliza para producir piezas cilíndricas en matrices giratorias, como se observa en la Figura 3.16.

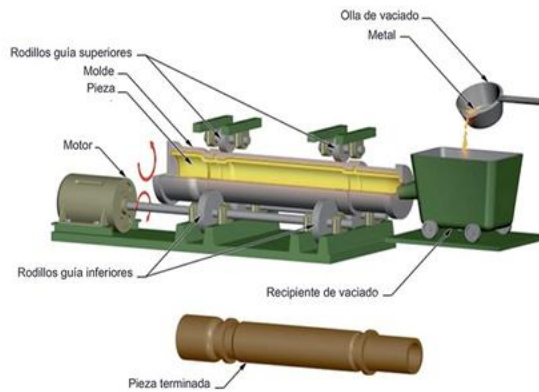


Figura 3.14. Proceso de fundición por inyección.[6]

**Fundición por colada continua:** Es un proceso que se utiliza para producir una variedad de productos de acero, como palanquillas y placas de acero, así como piezas fundidas de bronce y hierro. Este método mejora la calidad del producto al eliminar los poros y la porosidad, mejorando las propiedades mecánicas y la uniformidad de la microestructura.[6]

### 3.7. Hornos para fundición

Las aleaciones metálicas se funden en un alto horno. Como material de aportación para estos hornos se utilizan a menudo chatarra y aleaciones. Las empresas de fundición deben considerar varios factores relevantes al optar por una máquina fusora, lo cual es una de las decisiones más significativas que deben tomar.

#### 3.7.1. Horno de crisol

El horno de crisol, que se muestran en la Figura 3.17, se utilizan ampliamente para fundir aleaciones no ferrosas como aluminio, cobre, zinc y magnesio.

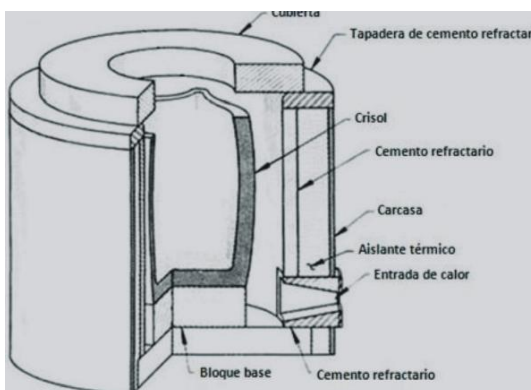


Figura 3.15. Horno de crisol. [11]

#### 3.7.2. Hornos de llama directa

Estos hornos se cargan con chatarra, arrabio y otros componentes, retirando las partes abovedadas, como se muestra en la Figura 3.18.

Se utilizan para fundir hierro, algunos se utilizan para fundir hierro fundido gris o blanco y hierro dúctil.

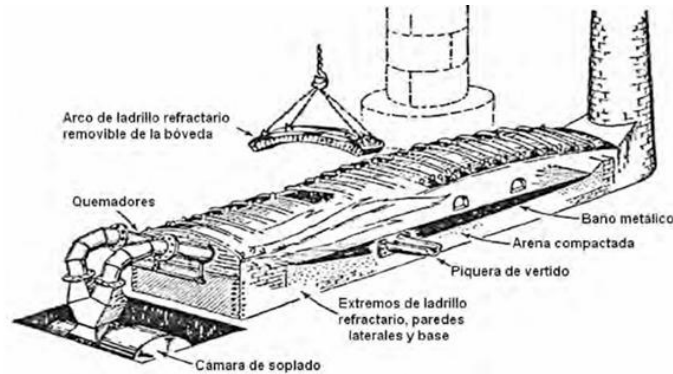


Figura 3.16. Horno de llama directa. [12]

### 3.7.3. Hornos rotativos

Los hornos rotatorios son adecuados para una variedad de trabajos, incluidos hierro fundido, acero gris, acero fino o dúctil, así como latón, aluminio y plomo.

El horno suele terminar en ambos extremos con un cono truncado; Uno tiene un quemador y el otro tiene salida de gases de escape, que suelen dirigirse al sistema de recuperación para calentar el aire utilizado en el proceso de combustión, como se puede observar en la figura 3.19.[12]

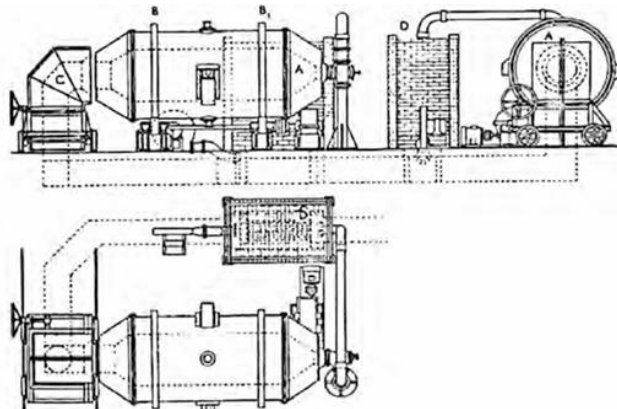


Figura 3.17. horno rotativo.[12]

### 3.7.4. Horno cubilote

Para conseguir la fusión, emplea el principio de combustión entre las materias primas. Están compuestos de coque, metal (chatarra) y fundente, y se emplean a menudo para la fundición gris. Operan a temperaturas que alcanzan los 1200 °C. Los hornos de cúpula son estructuras

verticales en forma de torre, compuestas por una torre cilíndrica de acero que se encuentra situada en posición vertical sobre una placa base que normalmente está soportada por cuatro vigas o columnas de acero, tal como se ilustra en la figura 3.20.[12]

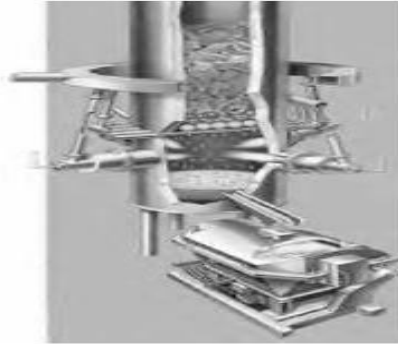


Figura 3.18. horno de cubilote. [12]

### **3.8. Arenas de moldeo y machos**

La fundición en arena es reconocida por su capacidad para adaptarse a una extensa diversidad de aleaciones, tamaños y complejidades. Por ello, se trata de un procedimiento esencial y rentable para fabricar una amplia variedad de componentes industriales, que van desde diseños sencillos hasta muy complejos. No obstante, la calidad y eficiencia de la fundición en arena a menudo se ven perjudicadas por fallas que emergen durante la complicada interacción entre materiales, métodos y factores medioambientales. [13]

En el proceso de producción de piezas fundidas, las propiedades de los machos y moldes son importantes. Estas dependen de las características de la arena base utilizada para su fabricación; por lo tanto, no se puede usar cualquier tipo de arena, sino que esta debe satisfacer ciertos requisitos para ser adecuada.

- Moldeo sencillo para una adecuada adaptabilidad a los modelos y para la exactitud en su reproducción.
- Resistencia ante asaltos químicos que ocurran entre el molde y el metal líquido.
- Resistencia a ataques químicos que se produzcan entre el metal líquido y el molde.
- Capacidad para eliminar la energía térmica del metal líquido y así lograr una solidificación adecuada.
- Alta habilidad de colapsarse tras fundir la pieza, para que ocurra la contracción del metal y el desmolde.

- Cualidades apropiadas para obtener buenos acabados en la superficie de piezas fundidas.[14]

### **3.8.1. Características y propiedades de la arena.**

La fundición en arena es un procedimiento que ha sido empleado durante milenios, el cual consiste en poner un modelo con una forma específica de la pieza para crear una huella. Este método incluye un sistema de alimentación mediante el cual la cavidad creada con el modelo se llena con metal fundido. Luego, se deja enfriar el metal hasta que se solidifica y se rompe el molde de arena para finalmente sacar la fundición.

La arena es uno de los elementos más utilizados para fundir metales, por lo que es fundamental que tenga propiedades adecuadas para ser empleada en la fabricación de moldes de arena. Estos últimos, a su vez, deben contar con características y propiedades apropiadas para garantizar una producción con el mínimo posible de defectos. [14]

### **3.8.2. Composición química.**

Las arenas de moldeo son rocas sedimentarias formadas por la separación sucesiva de materiales minerales y por la meteorización de los sedimentos provenientes de diversas soluciones naturales.

La arena cuarzosa se utiliza con frecuencia para la mezcla de moldeo y fabricación de machos, ya que es muy abundante en la naturaleza, lo que permite lograr costos bajos y características apropiadas. Esta arena se compone de granos de silicio o cuarzo, y la estructura granular de la misma garantiza su permeabilidad.

Además, el cuarzo o sílice ( $\text{SiO}_2$ ) cambia su estructura cristalina debido al calor, lo cual provoca un cambio en su volumen. Este material atraviesa varias estructuras hasta llegar a la masa fundida y tiene una variación de volumen del 0,1%. [14]

### **3.8.3. Distribución granulométrica y morfología de los granos de arena.**

Los rasgos de los moldes se ven afectados por factores morfológicos, además de los químicos. Algunos ejemplos de estos factores son la forma, el tamaño y la distribución granular. La morfología de los granos que componen la arena debe ser tomada en cuenta, ya que las propiedades de la arena no son las mismas que las de la sílice, debido a que es un material

heterogéneo y compacto. La figura 3.21 ilustra la forma de los granos, tomando en cuenta su redondez y esfericidad. [14]

Esfericidad ↓	Muy angular	Angular	Subangular	Redondeada	Redonda	
0,9						Muy esférica
0,7						Esférica
0,5						Semiesférica
0,3						Poco esférica
Redondez →	0,1	0,3	0,5	0,7	0,9	

Figura 3.19. Clasificación de los granos de arena.[14]

#### 3.8.4. Número de fineza de AFS.

La dimensión de los granos tiene un fuerte impacto en la cohesión, la refractariedad y la permeabilidad, así como en el acabado superficial de las piezas fundidas. Por ello, se lleva a cabo un análisis de la fineza para determinar cómo están distribuidos los granos.

La razón por la que se utilizan las arenas medias para machos y moldes de fundiciones basadas en hierro grafitico es su gran habilidad de aglomeración y aglutinación. Su permeabilidad varía entre 100 y 200 ml/min, siendo efectivos en casi todas las dimensiones (de tamaño pequeño a mediano), desde 25 mm de grosor hasta 50 kg. [14]

#### 3.8.5. Propiedades de la mezcla de moldeo.

La resistencia se determina en estado seco o húmedo. La resistencia verde es la resistencia inicial, que es la base que va a resistir la solidificación de la pieza vaciada. En esta propiedad, el nivel de humedad es un punto de referencia porque a mayor humedad, menor resistencia y viceversa. [14]

#### 3.8.6. Sistema de moldeo

El sistema de moldeo se realiza mayormente en el sector de fundición. La fabricación de machos y moldes, así como la construcción del propio molde, son las etapas esenciales en el proceso de fabricación de los moldes.

#### Cajas de Moldeo

Las cajas de moldeo están formadas por componentes que pueden unirse entre sí y para garantizar los cierres. Para un objeto simple, con un lado plano, se llenará la parte inferior de la caja (que está sellada en la parte inferior) con arena para darle forma. [15]

### 3.8.7. Sistema de colada y alimentación

El sistema de colada o llenado está constituido por un conjunto de componentes y conductos que posibilitan la transferencia del metal líquido desde la olla de vaciado hasta el área de impresión de la pieza ubicada dentro del molde.

La función primordial de un sistema de colada es regular el flujo del metal líquido que ingresa a la cavidad del molde a una velocidad específica con el objetivo de evitar fallas en el metal solidificado, como se muestra en la figura 3.22. [16]

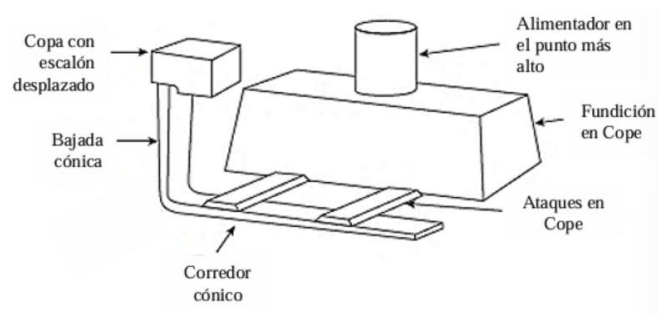


Figura 3.20. Sistema de colada y alimentación.[16]

### 3.9. Defectos de fundición

Las líneas de moldeo, tapado, fusión, tratamiento térmico y acabado integran el proceso productivo. En las que pueden surgir fallos en las piezas fundidas mientras se trabaja en las líneas de producción.

#### Causas de los defectos de fundición.

**Pieza metalizada:** Pobre limpieza de las callejuelas y el horno cuando se funde el material, mala pintura de los moldes en la zona de tapado. Análisis químico que no cumple con las especificaciones: Un mantenimiento y una calibración deficientes del espectrómetro.

**Rotura de alma:** Cubrir los moldes de forma incorrecta, con un peso excesivo en ellos.

**Desfase:** Deficiente cobertura de los moldes y falta de peso en ellos.

**Dureza fuera de estándar:** Composición química no estándar y tratamiento térmico inadecuado.

**Fisura:** Temperatura de vaciado del material o tiempo de tratamiento térmico excesivos.

**Gas-porosidad:** Temperatura de vaciado del material que se encuentra fuera de las especificaciones o del rango establecido.

**Fuga de metal:** Falta de pesas en los moldes durante el momento de cubrir.

**Medida fuera de plano:** Instrumentos de medición que no están calibrados correctamente y deficiente control dimensional en la zona de control de calidad.

**Inclusión de escoria:** El mal estado de las calderas y los hornos, así como la incorrecta escoriación del material en el proceso de fundición.

**Modelo incorrecto:** Deficiente codificación de planos por la sección de diseño.

**Molde roto:** Molde con un periodo de fraguado excesivo, sobrecarga en el molde.

**Pieza incompleta:** Falta de conocimiento del plano, mala coordinación entre las secciones de control de calidad y moldeo.

**Rechufe:** Cantidad de manguitos que no cumplen con las especificaciones, temperatura del material fuera del rango. [17]

### **3.10. Mecanizado**

El mecanizado es un procedimiento esencial en la manufactura que consiste en eliminar virutas para dar forma a la pieza. Para establecer la eficacia y la calidad del proceso son esenciales los parámetros de procesamiento, por ejemplo, la profundidad de corte, la velocidad de avance y la velocidad de corte. La optimización de estos parámetros puede disminuir de manera notable el tiempo que toma el procesamiento, incrementar la calidad superficial y bajar los gastos de producción.[18]

#### **3.10.1. Proceso de mecanizado**

Un torno es una herramienta motorizada que se utiliza para crear cortes cónicos en diversos materiales, como metal o madera, eliminando restos. Como se ilustra en la Figura 3.24, la materia prima se mantiene fija mientras gira alrededor de su eje, al tiempo que la herramienta de corte se acerca a ella de manera paralela o perpendicular al eje de rotación con el fin de quitar el material y dar la forma deseada.

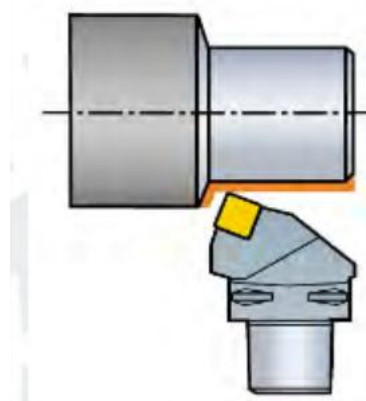


Figura 3.21. Principio de torno.[19]

Para explicar los tipos de operaciones que se pueden realizar en un torno es importante mencionar los ejes de la máquina.

Los tornos comunes cuentan con dos ejes primordiales: el eje Z, que es paralelo al eje en torno al que rota la pieza de trabajo, y el eje X, que se encuentra perpendicular a este último. Esto queda claramente ilustrado en la Figura 3.25.

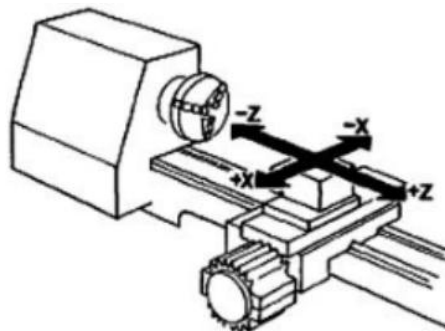


Figura 3.22. Ejes presentes en la máquina.[19]

Las operaciones que se pueden realizar en el torno dependen de los factores de corte. En total son tres:

**Velocidad de corte (m/min):** Se refiere a la rapidez tangencial del extremo de la pieza que toca el utensilio de corte. Este es uno de los factores más importantes que determinan la duración de vida de la herramienta. La operación se lleva a cabo más rápidamente con una velocidad de corte mayor; no obstante, el desgaste de la herramienta aumenta. El valor de la pieza depende del diámetro que tenga y de la rapidez con la que rote.

**Velocidad de Avance (mm/rev):** Se refiere a la velocidad relativa entre el avance y la pieza. Eso determina la formación de viruta y el acabado deseado en el producto final. Cada herramienta puede funcionar dentro del rango de velocidades de avance que el fabricante indica

en su catálogo. El valor se puede calcular multiplicando la velocidad de rotación de la pieza por el avance por revolución.

**Profundidad de corte (mm):** Es la distancia a la que entra el cuchillo en el objeto de trabajo. Además, se puede calcular como la mitad de la diferencia entre el diámetro sin mecanizar y el diámetro de la pieza después de que ha sido mecanizada. Como se mencionó antes, todas las operaciones de mecanizado en un torno implican masas rotativas como cilindros o conos. Las operaciones que se llevan a cabo son las siguientes:

**Refrentado:** Generalmente, esta es la primera operación que se realiza. Su finalidad es limpiar y dejar una superficie recta en el frente del producto. En este caso, la velocidad de avance es perpendicular al eje de rotación y la profundidad de corte se reduce ( $\approx 1$  mm).

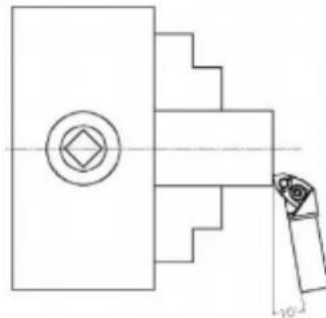


Figura 3.23. Proceso de refrentado.[19]

**Cilindrado:** La pieza se forma moviendo la herramienta de corte a lo largo del eje Z para cambiar el diámetro de la pieza. Este proceso puede ocurrir tanto externa como internamente. Si el propósito del procesamiento es eliminar material rápidamente, se trata de un proceso de desbaste. El cual utiliza valores elevados de avance y profundidad de corte, dando como resultado una superficie muy rugosa. Sin embargo, si se trata de una operación de acabado, se utilizan valores de profundidad de corte y velocidad de avance más bajos para obtener una superficie lisa de la pieza.

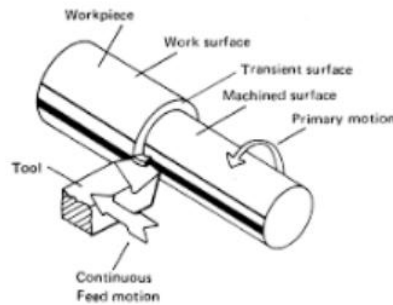


Figura 3.24. Proceso de cilindrado.[19]

### 3.11. Software CFD

Hoy en día, el análisis CFD se emplea en la etapa de construcción y diseño de distintas clases de bombas. La CFD también puede ser útil para el estudio de fenómenos inestables y dinámicos, como la interacción rotor-estator. Su utilización disminuye de manera significativa los costos de desarrollo de una bomba nueva. [20]

Con la ayuda del enfoque CFD, los complejos flujos internos en los impulsores de bombas de agua, que aún no se comprenden completamente, pueden predecirse bastante bien, para acelerar el procedimiento de diseño de la bomba. Por lo tanto, el CFD es una herramienta importante para los diseñadores de bombas.[21]

CFD emplea tres ecuaciones para resolver el comportamiento de los fluidos: la ecuación de conservación de energía, la de continuidad y la del movimiento total.[22]

### 3.12. Microestructura de los metales y estudios metalográficos.

La microestructura ejerce una gran influencia en las prestaciones y usos de metales y aleaciones, y por eso el análisis metalográfico es tan relevante, puesto que posibilita la inspección y el control de calidad y cumplimiento de especificaciones para asegurar que se satisfagan los requerimientos solicitados en la industria. El examen metalográfico también tiene otros usos significativos, como el análisis de fallas y la investigación y desarrollo.[23]

#### 3.12.1. Muestras para la metalografía

Las muestras o especímenes de prueba son extraídas de una sección cortada del material de hierro colado, en un sitio determinado, acordado entre el fabricante y el cliente.[23]

#### Preparación de la muestra

En primer lugar, es fundamental cortar un trozo del metal de la sección que nos interesa. Con fines prácticos, las medidas de esta sección deben variar entre 12 y 25 mm<sup>2</sup> (0,5 a 1,0 inch<sup>2</sup>), o alrededor de 12 a 25 mm de diámetro si la muestra es en forma de cilindro. La muestra debe ser lo más baja posible para que su manejo durante el proceso de pulido sea más fácil.

Es fundamental escoger un método de corte que no modifique la estructura del metal a lo largo del procedimiento. Los métodos más frecuentes para conseguir la muestra abarcan:

- Aserrado: Puede hacerse manualmente o mediante máquinas lubricadas. Este procedimiento es fácil, veloz y eficiente.
- Corte con hoja abrasiva: produce una superficie suave que, con frecuencia, está lista para un pulido fino. Este método de seccionamiento es generalmente más veloz que el aserrado.
- Uso de cizallas: Los cortadores de cizalla son herramientas de corte que pueden cortar materiales en forma de alambre, chapa, placa o varilla entre dos cuchillas opuestas.

Cada uno de estos métodos tiene características específicas que los hacen adecuados para diferentes tipos de muestras y requisitos de preparación.

Para concluir la preparación, es necesario frotar la muestra en lijas comunes de carburo de silicio (SiC) con un grano más grueso (#100) hasta llegar a uno más fino (#1500-2000), empleando agua como lubricante. Como se muestra en la Figura 3.27, este proceso debe tomar entre 15 y 45 segundos por cada lija. Este procedimiento asegura que la superficie de la muestra esté lisa y sin rayas, lo que es fundamental para conseguir una imagen nítida y clara cuando se fotografía bajo el microscopio.[23]

Surface	Lubricant	Abrasive Type/Size ANSI (FEPA)	Time sec.	Force <sup>A</sup> N(lbf)	Platen RPM <sup>B</sup>	Rotation
Planar Grinding paper/stone	water	120-320 (P120-400) grit SiC/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15-45	20-30 (5-8)	200-300 <sup>C</sup>	CO <sup>D</sup>
Fine Grinding paper	water	240 (P220) grit SiC	15-45	20-30 (5-8)	200-300	CO
paper	water	320 (P500) grit SiC	15-45	20-30 (5-8)	200-300	CO
paper	water	600 (P1200) grit SiC	15-45	20-30 (5-8)	200-300	CO
Rough Polishing low/no nap cloth	compatible lubricant	6µm diamond	120-300	20-30 (5-8)	100-150	CO
Final Polishing med./high nap cloth	compatible lubricant	1µm diamond	60-120	10-20 (3-5)	100-150	CO
synthetic suede <sup>E</sup>	water	0.04µm colloidal silica or 0.05µm alumina	30-60	10-20 (3-5)	100-150	CONTRA <sup>F</sup>

Figura 3.25. Métodos de preparación de muestras metálicas para metalografía.[23]

## **Pulimento**

Esta fase se lleva a cabo con paños sólidos ubicados en platos rotativos circulares. Se colocan pequeñas dosis de abrasivos, típicamente polvo fino de diamante industrial, sobre estos.[24]

## **Ataque químico**

Hay una gran cantidad de ataques químicos que se emplean comúnmente en distintas situaciones y metales. Por lo general, el ataque se realiza por medio de inmersión o frotado con algodón que ha sido sumergido en el líquido seleccionado. Este algodón es entonces utilizado para frotar la zona que será observada durante unos segundos, hasta que aparezca la estructura o defecto. Para la mayoría de los metales ferrosos, uno de los más utilizados es el NITAL (una combinación de ácido nítrico y alcohol).[24]

## **Microscopia**

El microscopio metalográfico es la herramienta principal para llevar a cabo un examen metalográfico, ya que permite analizar una muestra con aumentos de entre 50 y 2000x. El microscopio metalográfico funciona utilizando la luz que es reflejada por los metales y las aleaciones, debido a que estos no son transparentes. Por lo tanto, para poder observar la muestra, es imprescindible pulirla y preparar una muestra hasta que la superficie tenga un acabado similar al de un espejo.[24]

## **4.MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS**

Los datos necesarios para el impulsor se recogen a partir de trabajos anteriores, herramientas informáticas y literatura esencial. Para diseñar la plantilla del impulsor y llevar a cabo su manufactura, se emplearon los materiales y equipos que aparecen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Equipos y materiales utilizados.

Equipos y materiales	
HARDWARE	SOFTWARE
<ul style="list-style-type: none"><li>• Laptop</li><li>• Regla</li><li>• Impresora 3D</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Autodesk Inventor 2025</li><li>• Autodesk CFD 2025</li></ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Hierro fundido</li> <li>• Horno de cubilote</li> <li>• Cepillo de acero <ul style="list-style-type: none"> <li>• Torno.</li> </ul> </li> <li>• Microscopio <ul style="list-style-type: none"> <li>• Lija</li> </ul> </li> <li>• Agua destilada <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alcohol</li> <li>• Alumina</li> <li>• Nital</li> </ul> </li> </ul>	
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--

#### 4.1. PROCESO DE DISEÑO

##### Ingeniería inversa

Es fundamental que el productor establezca sus necesidades específicas antes de comenzar un proyecto de ingeniería inversa. ¿El productor desea replicar el componente tal como fue producido, pero con fallas, deterioro, etcétera? Estudie por qué no funciona un componente, descubra la razón de que una estructura haya fallado o replique una herramienta previamente existente. Un ingeniero o un diseñador industrial pueden elaborar un modelo tridimensional que sea idéntico al original, modificarlo y combinarlo con otros elementos cuando lo requiera la situación. Por otra parte, el productor podría querer entender la finalidad del diseño; dicho de otro modo, en este caso, la ingeniería inversa no replicará el daño o el defecto de la pieza. Por otro lado, se rehace con exactitud el modelo 3D de la pieza y se acomodan todos los parámetros del objeto. Después, los productores tienen que elegir la tecnología de medición 3D para recoger datos, considerando el entorno y el uso.

## Etapa 1

Para realizar el proyecto y obtener las medidas y los moldes necesarios para reproducir la pieza, se emplearon primero las mismas dimensiones de los alabes de la pieza anterior, así como la misma plantilla que sirve para diseñar en 3D mediante el programa Autodesk Inventor. Esto nos proporcionó una idea del nuevo diseño y su apariencia, tal como se observa en la Figura 4.1.

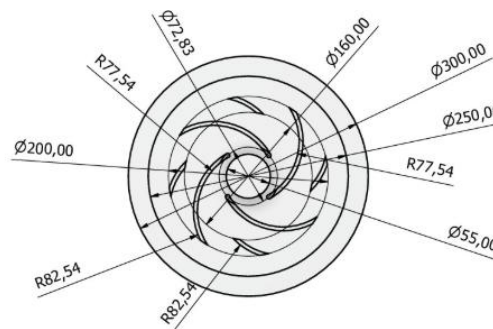


Figura 4.1. Ingeniería inversa.

## Etapa 2

Lo que sigue es determinar la distancia necesaria para añadir los nuevos alabes, lo cual permitirá dibujarlos y crear diferentes moldes y planos en el inventor, como se observa en la Figura 4.2.

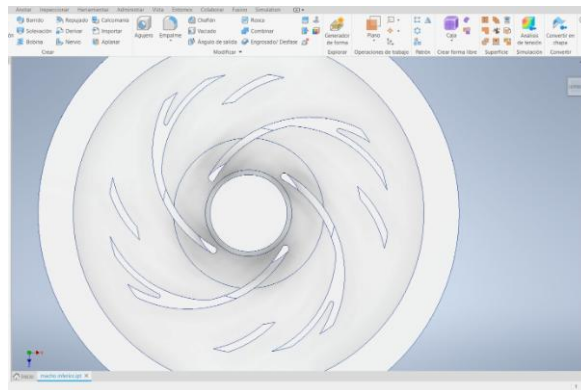


Figura 4.2. Rediseño del impulsor.

### 4.1.1. Proceso de manufactura

Los tipos de manufactura utilizados son:

#### Discretos

Se considera el proceso de manufactura de la fundición, por lo que se toman en cuenta los procesos discretos, ya que estos aluden a algunos de los más complicados. El proceso efectivo

puede fluctuar desde unas pocas configuraciones hasta las que se hicieron en el diámetro del impulsor.

### Continuos

El procedimiento es constante porque se emplean materias primas, que pueden ser gases, polvos o líquidos relacionados con la minería, y por lo tanto requieren un mayor cuidado en el trabajo.


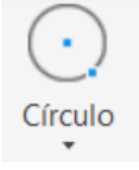

### Manufactura en 3D

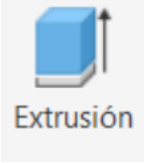
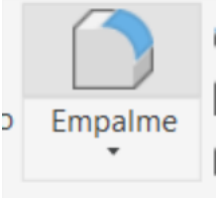

Indica la utilización de tecnología para sustituir el trabajo humano por uno más preciso, como sería reemplazar el tallado de moldes de madera por impresoras en tres dimensiones. Además de su uso habitual, que consiste en la impresión de adornos o muñecos, las impresoras también sirven para imprimir diversos tipos de materiales, entre los cuales están los plásticos termoendurecibles y los termoplásticos.

#### 4.1.2. Herramientas utilizadas en inventor

Las herramientas de inventor que aparecen en la tabla 4.2 fueron empleadas para fabricar la pieza.

Tabla 4.2. Barra de herramientas utilizadas

Paso 1		La línea nos posibilita la creación de segmentos de distintas dimensiones, como los perpendiculares, entre otros.
Paso 2		Círculo que nos posibilita trazar círculos con diámetros o radios variados que están en la barra de herramientas.
Paso 3		Se ocupó para las partes específicas del impulsor como en la parte del macho.

Paso 4		Boceto utilizando la herramienta de extrusión, que está disponible en la barra de herramientas del modelo 3D.
Paso 5		Además, se utilizó la herramienta de Empalme, que se encuentra en la barra de herramientas del Modelo 3D y permite crear ángulos entre dos superficies planas adyacentes.
Paso 6		Para crear el macho, se emplearon las mismas herramientas mencionadas anteriormente, pero se añadió una más para poder construir los álabes del impulsor. Debido a que estos tienen distintas alturas, fue preciso realizar un boceto en el plano xy y utilizar la herramienta Revolución de la barra de herramientas Modelo 3D. Esta herramienta posibilita la extrusión de una figura que puede rotar 360 grados.

#### 4.1.3. Elaboración del molde del Impulsor

Para iniciar la simulación del impulsor y tener la capacidad de imprimirlo en 3D, se llevaron a cabo los pasos subsecuentes.

#### Piezas realizadas en inventor para la fundición del impulsor

Las piezas se dividieron en dos partes: una para fabricar el macho y la otra para la parte exterior. Las partes superior e inferior se dividen en dos componentes; el diseño de estos debe ser detallado, sobre todo en la cara interna del componente, porque es crucial para los álabes. Esto se conoce como la elaboración del macho.

**Para la producción del macho, es necesario que se respeten ciertas especificaciones:**

- 1.- Es necesario llevar a cabo los álabes impulsores con precisión, ya que son la parte más importante que se quiere reproducir.
- 2.- La parte interna de la tapa del impulsor que conecta con los álabes debe ser idéntica a la del impulsor original, ya que es en ese lugar donde se forman las curvas. Por el contrario, no es indispensable que la parte externa de la tapa tenga el mismo diseño que el impulsor, ya que esta no se considera en el momento de crear el molde de arena.
- 3.- Dado que la parte del molde correspondiente a la estructura del impulsor debe embonar allí, es necesario reservar un espacio en el molde para los álabes.

**Creación de los componentes estructurales del impulsor**

Para su fabricación, es necesario cumplir con ciertas especificaciones. La parte superior e inferior se separan en dos partes:

- 1.- Es necesario que la parte de arriba se diseñe con una estructura igual a la del impulsor, a excepción de donde se encuentran los detalles específicos del impulsor que se llevan a cabo mediante maquinado. Esto es así porque en la fundición no se obtienen las medidas del impulsor tal y como fueron especificadas, pero sí pueden controlarse con el maquinado. También es necesario sobredimensionar para contar con la sobremedida requerida para el maquinado.
- 2.- En la parte de abajo de la estructura, como los detalles no son muy complicados, se traza de acuerdo con las dimensiones del impulsor. Se lleva a cabo un sobredimensionamiento para proporcionar un acabado final de calidad, lo que hace posible la elaboración de los últimos detalles a través del mecanizado.
- 3.- Para poder conectar con la parte inferior del macho, es necesario que se coloque un componente entre el núcleo de las dos partes de la estructura del impulsor que tenga el mismo grosor que los álabes, como se ilustra en la Figura 4.3.

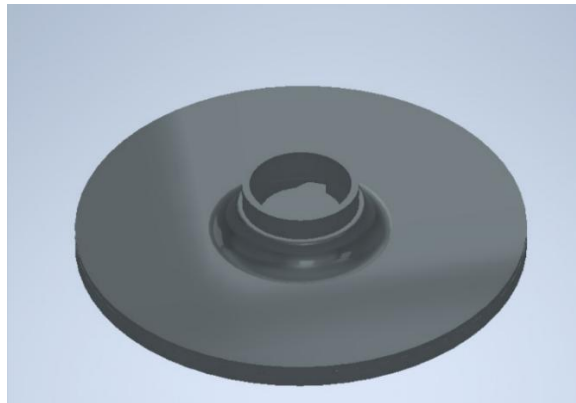


Figura 4.3. Estructura del impulsor.

#### 4.1.4. Impresión del macho inferior

La impresora 3D ELEGOO En cuanto a sus dimensiones generales, la impresora presenta un largo aproximado de 540 mm, un ancho de 520 mm y una altura de 640 mm, con un peso cercano a 9,7 kg, lo que le confiere una estructura estable sin comprometer su portabilidad.

El área útil de impresión de las impresoras ELEGOO es de aproximadamente 220 mm de largo, 220 mm de ancho y 250 mm de altura, permitiendo la fabricación de piezas funcionales con geometrías complejas y buena repetibilidad dimensional. Estas características hacen que las impresoras ELEGOO sean adecuadas para aplicaciones académicas, prototipado rápido y desarrollo de componentes utilizados en procesos de fundición y manufactura el cual nos permitió desarrollar la pieza completa y no por partes el cual nos facilitó más rápido la obtención de la plantilla, este modelo de impresora 3D se observa en la figura 4.4.



Figura 4.4. Impresora 3D ELEGOO.

## 4.2. PROCESO DE FUNDICION

La mezcla de arena elaborada se compacta en torno al patrón, que es el modelo de la pieza a fabricar, usando condiciones controladas de presión y temperatura para garantizar que el molde mantenga su forma durante la fundición. La arena se presiona de manera uniforme alrededor de la plantilla en este periodo, tomando la forma geométrica que tiene el hueco del molde deseado.

En ciertos casos, el diseño de la pieza fundida incluye cavidades internas o conductos. Para su formación, se utilizan machos de arena, que se producen a partir de combinaciones de arena con propiedades parecidas a las del molde. Estos machos ocupan estratégicamente su lugar en el conjunto de moldeo para crear los canales internos requeridos en la pieza. Después, las dos partes del molde se combinan, el metal fundido se vierte en la cavidad y se deja que se endurezca.

Cuando termina el proceso de solidificación, la arena que compone el molde se quita y se separa hasta que la pieza fundida queda totalmente liberada. Por último, se realizan las operaciones de acabado, que pueden involucrar procesos de mecanizado y rectificado. Estas operaciones tienen como finalidad obtener las dimensiones y condiciones superficiales necesarias.

#### 4.2.1. Material del impulsor

Se tiene en cuenta las características de fundición del bronce-aluminio y hierro fundido para el cálculo de parámetros de fundición para obtener un mejor control en el proceso de fundición, tal y como se muestra en la tabla 4.3:

Tabla 4.3. características de fundición.

	<b>Bronce aluminio</b>	<b>Hierro fundido</b>
Temperatura de fusión	1,030°C - 1,050°C	1,150°C - 1,250°C
Temperatura del horno	1,150°C - 1,220°C	1,300°C - 1,450°C
Contracción lineal	1.8% - 2.2%	0.8% - 1.3%
Fluidez	Moderada	Excelente
Riesgo de oxidación	Muy alto	Bajo
Gasificación	Alto	moderado

La comparación entre el aluminio de bronce y el hierro fundido demuestra que la alteración del material afecta directamente las variables críticas del procedimiento de fundición, lo que requiere la recalibración de los parámetros tecnológicos para garantizar la calidad final del impulsor.

### **4.3. Datos necesarios para la calidad de la pieza**

#### **4.3.1. Peso de la pieza**

Es de suma importancia para proyectar una tecnología conocer el peso de la pieza fundida; este dato es imprescindible para calcular después el sistema de alimentación, mazarotas, contrapesos, balance del metal, rendimiento y otros elementos. Para determinar el peso de una pieza, primero se divide el plano de esta en figuras geométricas y luego se calcula el volumen de cada figura.

$$G = V \cdot p \tag{4.1}$$

Donde:

G= peso de la pieza. (g)

V= volumen total. (cm<sup>3</sup>)

P= peso específico del material. (g/cm<sup>3</sup>)

#### **4.3.2. Contracción lineal**

Las modificaciones en las dimensiones lineales de la pieza, a diferencia de las que tenía el modelo en el molde antes de llenarlo con metal fundido, se denominan contracción lineal. La dimensión lineal, que normalmente se expresa en porcentaje, se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\varepsilon L = \frac{Lm - Lp}{Lp} \cdot 100 \tag{4.2}$$

Donde:

Lm= dimensiones del modelo con el cual se formará la pieza mm.

lp =dimensiones de la pieza sólida mm.

Si en la aleación sólida ocurren cambios alotrópicos, la contracción lineal se divide en períodos. Las aleaciones Fe - C se dividen en tres: a) Contracción preperlítica b) Dilatación perlítica (durante el cambio de la perlita) c) Contracción postperlítica.

### 4.3.3. Fuerza de flotación del macho

Esencial para un impulsor cerrado. Los machos que constituyen los álabes internos tienden a flotar en la entrada de hierro líquido. Esta fórmula determina la fuerza (P2) que el metal ejerce en dirección ascendente. Si no se realiza el cálculo, los machos se desplazarán, los álabes tendrán espesores desiguales y la bomba vibrará o fallará.

$$P_2 = G \left( \frac{\gamma'}{\gamma} - 1 \right) - g \quad (4.3)$$

Donde:

G= Peso del macho sin portada. (g/cm<sup>3</sup>)

g= Peso de las portadas. (g/cm<sup>3</sup>)

y'= Peso específico del fundido. (g/cm<sup>3</sup>)

y= Peso específico del macho. (g/cm<sup>3</sup>)

### 4.3.4. Área de soporte de los machos

Una vez calculada la fuerza de flotación (P2) con la ecuación anterior, esta fórmula te dice qué área (S2) deben tener las "portadas" (apoyos) del macho para que no aplasten la arena del molde. Esto evita que el macho se hunda o se desplace, garantizando la geometría de los canales del impulsor.

$$S_2 \geq \frac{P_2}{\sigma_c} \quad (4.4)$$

Donde:

S2= superficie de las portadas superior. (cm<sup>2</sup>)

P2= Reacción a la presión del metal líquido en la base superior de la portada. (kg)

cc - Para moldes húmedos 0,26 [Kg/Cm<sup>2</sup>], para moldes secos 2,5 [Kg/Cm<sup>2</sup>].

#### 4.3.5. Carga de coque

Esta ecuación determina la altura óptima de la cama de coque (hdt) en función de la presión del aire (p). Esto asegura que el hierro alcance la temperatura correcta y no se oxide excesivamente.

$$hdt = 40\sqrt{p} \quad (4.5)$$

Donde:

hdt= Altura de la carga de coque de las toberas hacia arriba. (mm)

p= presión de aire; mm por columna de agua.

40= Coeficiente empírico.

#### 4.3.6. Velocidad de separación de inclusiones

Las inclusiones no metálicas son los elementos de los metales (Fe, Mn, Si, entre otros) que interactúan con los no metales para generar sulfuros, nitruros, óxidos y otros compuestos. También se incluyen todos aquellos componentes que forman parte de la estructura de la aleación sin integrarse a ella, como los residuos de escorias, la arena de moldeo o materiales refractarios.

Las inclusiones no metálicas tienen un impacto negativo en las características de la aleación. Esto es porque una concentración elevada de estas disminuye el límite de fatiga de la aleación, debilita los enlaces intergranulares y, si son agudas, concentran tensiones; lo mismo sucede cuando están compuestas por nitruros de vanadio, titanio, zirconio o similares. Cuando se enfoca en la periferia de la pieza, su maquinabilidad disminuye.

$$V = \frac{2}{g} \cdot g \cdot \frac{r^2}{\eta} \cdot (p_{aleac} - p_{inclus}) \quad (4.6)$$

Donde:

V= velocidad de separación de inclusiones. (m/s)

R = Radio de inducción. (m)

$\eta$  = viscosidad cinemática. ( m<sup>2</sup>/s)

$\rho_{aleac}$  = densidad de aleación. (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho_{includ}$  = densidad de inclusión. (kg/m<sup>3</sup>)

Esta ecuación ayuda a entender cuánto tiempo se debe dejar reposar el metal o cuán fluida debe ser la escoria para que las impurezas floten y puedan ser retiradas antes de verter el metal en el molde.

#### 4.3.7. Composición de la mezcla de machos

Estos se fundamentan en el proceso de derretido que ocurre cuando se calientan los machos y los moldes para realizar su acción aglutinante. Al derretirse, crean una película líquida alrededor del grano que se solidifica al enfriarse, lo que proporciona resistencia a la mezcla. En Cuba, su trabajo más importante consiste en soplar las mezclas de vidrio líquido con CO<sub>2</sub>. Estas mezclas pasan por un proceso que hace que pierdan H<sub>2</sub>O y Na<sub>2</sub>O, lo que da lugar a un sólido aglutinante conocido como gel de silicio. El módulo es el parámetro más relevante de estas mezclas.

$$M = \frac{SiO_2}{Na_2O} \cdot 1.032 \quad (4.7)$$

Donde:

%SiO<sub>2</sub> = Porcentaje de dióxido de silicio.

%Na<sub>2</sub>O = Porcentaje de óxido de sodio.

1.032 = Relación entre los pesos moleculares del SiO<sub>2</sub> y Na<sub>2</sub>O.

Para fundición el módulo se usa entre 2 y 3, en dependencia del valor de M variara la resistencia mecánica según el tiempo de soplado aplicado.

#### 4.3.8. Presión crítica de penetración

Para tener una eficiencia hidráulica, el impulsor requiere de una superficie plana. El tamaño del poro de la arena (r), la tensión superficial y el ángulo de mojado están vinculados en esta

ecuación. Es útil para escoger el tamaño del grano de arena correcto y así prevenir que el hierro líquido se introduzca en la arena y produzca una superficie áspera.

$$P = \frac{2 \cdot \delta \cdot \cos\theta}{r}$$

(4.8)

Donde:

P= presión crítica. (N/m<sup>2</sup>)

δ= tensión superficial. (N/m)

r= radio del poro. (m)

La selección de una correcta granulometría es de gran importancia, debido a que esta incide directamente sobre la calidad superficial de la pieza obtenida del proceso de fundición.

En la siguiente figura 4.4 se presenta el índice para la clasificación de tipos de arena:

ARENA	AFS	En micrómetros
Muy Fina	110 - 140	140 - 110
Fina	70 - 110	230 - 140
Media	55 - 70	300 - 230
Gruesa	45 - 55	370 - 300
Muy Gruesa	25 - 45	700 - 370

Figura 4.5. Clasificación de tipos de arena

En la siguiente figura 4.5, se presenta la relación entre el índice de finura y los materiales ideales para fundir de acuerdo con este parámetro:

METALES	ÍNDICE DE FINURA (según AFS)
Acero	40 a 65
Fundiciones ferrosas	70 a 110
Aleaciones de cobre	100 a 120
Aleaciones ligeras	100 a 140

Figura 4.6. Índice de finura de la arena.

#### 4.3.9. Balance de carga del horno

Para obtener la composición exacta del hierro fundido necesaria para la bomba. Se usará esta lógica para calcular cuántos kg de chatarra, arrabio y ferroaleaciones (QX) necesitas cargar en el horno para obtener la masa total líquida requerida (QK).

$$Q_k = \frac{Q_x}{100} \quad (4.9)$$

Donde:

Qk= masa total líquida requerida. (kg)

Qx= masa de cada componente de carga. (kg)

#### 4.3.10. Sobremedida de maquinado

El impulsor tiene zonas críticas que deben ser maquinadas en torno. Esta relación básica te recuerda que al diseño de fundición (Y) debes sumarle el espesor de sobremedida (Z) a la dimensión final del plano (X) para garantizar que haya material suficiente para el mecanizado.

$$Y = X + Z \quad (4.10)$$

Donde:

X= Medida establecida en el diseño de la pieza. (mm)

Y= medida alterada al adicionársele la sobre medida de maquinado. (mm)

Z= valor de la sobremedida de maquinado. (mm)

#### 4.3.11. Tiempo de enfriamiento

Para estimar el tiempo de enfriamiento se utiliza la ley de enfriamiento de Newton que permite estimar el tiempo de enfriamiento hasta la temperatura ambiente de una pieza fundida en función de su volumen y superficie, siendo fundamental en el diseño de procesos de fundición.

$$T(t) = T_{\infty} + (T_0 - T_{\infty})e^{-\frac{hA}{\rho V \cdot c_p}t} \quad (4.11)$$

Donde:

$T_0$ : temperatura inicial al inicio del enfriamiento (normalmente al desmolde o al final de solidificación).

$T_\infty$ : temperatura ambiente. ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_f$ : temperatura final deseada ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$\rho$ : densidad del metal ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c_p$ : calor específico del hierro fundido gris. ( $\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$ )

$V$ : Volumen. ( $\text{cm}^3$ )

$A$ : Área expuesta. ( $\text{cm}^2$ )

$h$ : coeficiente de convección

#### **4.3.12. Proyección de los machos**

Las dimensiones del impulsor son 33.5 mm por 300 mm. El macho se posicionará en una posición vertical, con forma de cilindro.

#### **4.3.13. Determinación de la caja de moldeo**

La distancia entre la pieza y los bordes de la caja determina el tamaño de las cajas:  $a = 50$  mm,  $b = 194$  mm,  $B = 100$  mm,  $c = 34$  mm y  $K_1 = 60$  mm. La caja inferior tiene unas dimensiones de 424 mm x 370 mm x 424 mm, y la superior mide 424 mm de largo, 194 mm de ancho y 424 mm de alto. A continuación, se normalizan las dimensiones, así que se emplearán la caja inferior con medidas de 350 x 350 x 350 (mm) y la superior de 350 x 200 x 350 (mm). Se pondrá un componente porque las medidas de la caja normalizada no exigen que el procedimiento de moldeo gaste arena extra.

### **4.4. Procedimiento de moldeo**

Para entender el procedimiento de fundición, es necesario conocer la forma en que se elabora el molde y cuáles son los elementos relevantes para hacer una fundición de calidad. Los factores más importantes son:

#### **4.4.1. El molde**

La llamada caja de moldeo, que está compuesta por dos partes: una base inferior y una tapa superior, se crea a partir de los moldes producidos mediante impresión 3D. Dos secciones están aseguradas en una posición apropiada mediante unos pernos localizados en los lados opuestos de la base, que se introducen en los agujeros situados en las esquinas laterales de la tapa. Para realizar el molde, el primer paso es poner la pieza en la arena para reproducir su forma geométrica. Después, se coloca la tapa sobre la placa de manera que los pernos estén mirando hacia abajo, como se muestra en la Figura 4.6.



Figura 4.7. Moldes realizados.

#### **4.4.2. Moldeo en verde**

El molde es una cavidad cuya forma geométrica replica la figura de la pieza que se someterá al procedimiento de fundición. La arena empleada en la fundición está formada principalmente por sílice ( $\text{SiO}_2$ ) o mezclada con otros minerales. Este material tiene que mostrar propiedades refractarias apropiadas, las cuales se evidencian en su habilidad para soportar altas temperaturas sin sufrir degradación o fusión. Además, el tamaño de los granos, la forma de los granos y la distribución granulométrica dentro de la mezcla son otras propiedades importantes de la arena para fundición.

#### **4.4.3. Material de fundición**

Los materiales de fundición para el impulsor de hierro fundido son parte de un grupo de aleaciones compuestas por carbono y silicio, siendo estos dos elementos los componentes principales. Se distinguen por su alta resistencia y su notable capacidad para resistir la corrosión, en particular en agua salada y ambientes parecidos. Es, además, resistente a la corrosión, lo cual lo hace más durable que otros materiales.

#### 4.4.4. Temperatura del metal líquido

Cuando un metal se derrite, pasa de ser sólido a ser líquido. Esto se consigue sometiendo el metal a una temperatura elevada, que varía en función del tipo de metal. Este es el instante preciso en que el metal empieza a fundirse, o sea, cuando se transforma de estado sólido a estado líquido. Como se puede ver en la figura 4.7, por ejemplo, el hierro tiene un punto de fusión aproximado de 1150-1350 °C.

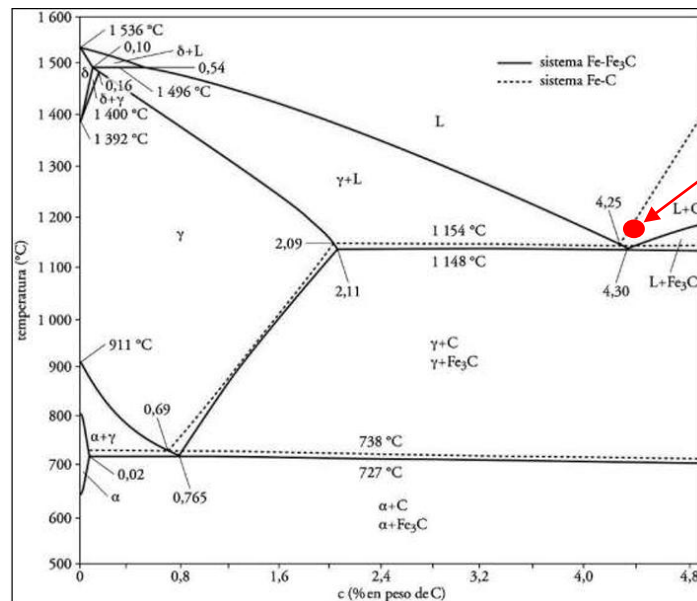


Figura 4.8. Diagrama de hierro-carbono.[25]

#### 4.5. Proceso de fundición

La figura 4.9 ilustra el hecho de que, dado que el horno de cubilote es fijo, se requiere un recipiente transportador para contener el material fundido y facilitar su manipulación para ser vertido en los moldes de arena. Este horno se empleó para la fundición de material hierro fundido a temperaturas entre 1400 °C y 1500 °C.



Figura 4.9. Horno de cubilote.

#### **4.5.1. Proceso de enfriamiento**

La solidificación y enfriamiento del impulsor cerrado es vista como un paso crucial en el proceso de fundición, pues determina la microestructura final y afecta la aparición de fallas como grietas térmicas, porosidad por contracción, distorsiones dimensionales y rechupes. El enfriamiento se lleva a cabo según un esquema de enfriamiento en molde que emplea arena seca, con el objetivo de conseguir una extracción térmica más uniforme y disminuir los choques térmicos.

Cuando el vertido se ha terminado, la pieza se deja en el molde por 24 horas para que la solidificación se complete y los gradientes térmicos disminuyan de manera gradual. Esta práctica se implementa a causa de la geometría del impulsor (tapa, álabes y cubo con espesores variables), que puede ocasionar contracciones no uniformes y zonas calientes si el desmoldeo se lleva a cabo demasiado pronto.

#### **4.5.2. Remoción de la pieza fundida**

Se trata de extraer la pieza solidificada del molde una vez que se ha enfriado lo bastante. En el caso de los moldes desechables, para suprimir la pieza es preciso quebrar el molde de arena. El proceso puede realizarse de forma manual o a través de máquinas que vibran o se desplazan. Cuando se cuele un molde, este se abre para que sea más fácil sacar la pieza.

#### **4.5.3. Limpieza de la pieza fundida.**

Con el fin de eliminar los restos de lijado y optimizar el acabado del objeto, se utilizaron las técnicas más comunes:

##### **Cepillo de Acero.**

Cubetas o tambores abrasivos con fundición que limpian las partes sueltas al raspárselas. Limpieza con agua a alta presión y una combinación de agua y arena.

#### **4.6. PROCESO DE MECANIZADO**

El maquinado torneado es el procedimiento mecanizado que se emplea para eliminar material del impulsor con la finalidad de darle forma y hacerla funcional. Este procedimiento produce una viruta en el material original de cualquier pieza semielaborada, lo cual implica la eliminación de un fragmento del material para obtener una forma particular al final.

#### 4.6.1. Tecnología de maquinado

Para la fabricación o restauración de componentes y equipos, se necesita llevar a cabo un proceso de manufactura, que es una secuencia de operaciones. El proceso de producción puede incluir diversas etapas, entre las que se encuentran: la preparación de los componentes de trabajo, el posterior procesamiento (por ejemplo, el maquinado o el tratamiento térmico) y la supervisión de calidad. Algunas de estas actividades son procesos técnicos; otras no lo son.

El proceso de producción comprende el proceso tecnológico, que incluye las acciones necesarias para modificar la condición de la pieza producida y su inspección subsiguiente. La fundición, el moldeo, el mecanizado, el tratamiento térmico, la soldadura, el ensamblaje y la verificación de calidad de las piezas son algunos ejemplos de los procesos que abarca la ingeniería. Se puede hacer el mecanizado con una variedad de metales mucho más extensa. En términos generales, se puede procesar cualquier tipo de material sólido. En el caso de las mezclas o los plásticos, es posible realizar el procesamiento, pero con mayor sensibilidad y precaución.

#### 4.6.2. Pasos de mecanizado

**Paso 1:** Se coloca el impulsor en la base y se fija al mandril del torno, que está entre el eje principal y la mesa.

**Paso 2:** Se enciende el torno y se hace girar el mandril.

**Paso 3:** Los coches se trasladan desde la cuchilla hasta el impulsor base.

**Paso 4:** Como muestra la Figura 4.10, el carro auxiliar mueve la cuchilla para moldear la pieza base de acuerdo con lo que se desea.



Figura 4.10. Mecanizado de torneado.

### 4.6.3. Ecuación de refrentado

Sostenemos que esta es una de esas actividades que se lleva a cabo primero, antes de las demás que le siguen. En esencia, significa procesar la parte frontal de las partes. A través de las siguientes expresiones matemáticas:

Considerando que la L en el refrentado se determina mediante la fórmula siguiente:

$$L = e_1 + R + e_2 \quad (4.12)$$

Donde:

R = Radio exterior de la pieza (mm).

$e_1$  = Margen de aproximación (mm).

$e_2$  = Margen de salida (mm)

$$T_r = \frac{L}{a_v \cdot N} \quad (4.13)$$

Donde:

$T_r$  = Tiempo de refrentado. (min)

L = Trayectoria de la herramienta a velocidad de refrentado (mm).

N = Velocidad de giro de la pieza (rpm).

$a_v$  = Avance de la herramienta por vuelta (mm).

### 4.6.4. Ecuación de cilindrado y mandrinado

El objetivo de este proceso es mecanizar la superficie exterior de la pieza y disminuir su diámetro. El cortador se desplaza en una dirección perpendicular al eje de giro. El mandrinado es el proceso que consiste en cilindrado la zona interna de un componente. Considerando que L se determina con la fórmula siguiente para el mandrinado y el cilindrado:

$$L = l + e_1 \rightarrow \text{que cumple } e_1 = (p \cdot \tan G)$$

$$L = l + (p + \tan G)$$

(4.14)

Donde:

L= Longitud de pieza a torneear por pasada (mm).

$e_1$  = Margen de aproximación (mm).

p = Profundidad de pasada (mm).

G = Ángulo de la arista principal de la cuchilla.

$$Tc = \frac{L}{av \cdot N}$$

(4.15)

Donde:

Tc= Tiempo de cilindrado. (min)

L = Trayectoria de la herramienta a velocidad de cilindrado (en mm).

N = Velocidad de giro de la pieza (en rpm).

$av$  = Avance de la herramienta por vuelta (en mm).

#### **4.7. PROCESO METALOGRAFICO**

Para identificar los fallos en las microestructuras de la pieza manufacturada, se lleva a cabo un análisis metalográfico. Se comparan los resultados con la pieza original. Para ello, se hicieron dos cortes pequeños en el impulsor defectuoso fabricado. De estos cortes surgen dos partes: una donde hay más defectos y otra donde la fundición fue adecuada, tal como se muestra en la Figura 4.10.



Figura 4.11. Corte del impulsor defectuoso.

#### **4.7.1. Equipos y materiales para la metalografía**

##### **4.7.1.1. Equipos**

- Jeringa de 10 ml.
- Par de guantes quirúrgicos.
- Algodón.
- Microscopio.

##### **4.7.1.2. Materiales**

- Lijas No. 100, No. 220, No. 360, No. 600, No. 1000, No. 1200.
- Alúmina.
- Nital.

#### **4.7.2. Pasos para el análisis metalográfico**

##### **Paso 1:**

Lo primero que se realiza es la extracción de las muestras que se va a utilizar e identificar la orientación en la que se va a pulir el material, como se observa en la Figura 4.11.



Figura 4.12. Extracción de las muestras.

### **Paso 2:**

El siguiente paso es realizar un desbaste para dejar visible la superficie de las muestras, suprimiendo cualquier cosa que pueda interferir en su examen. De este modo, también conseguimos una superficie plana con ligeras rugosidades. Para ello, se frota cada muestra sobre una serie de papeles abrasivos (lijas) de menor a mayor finura, como se ilustra en la Figura 4.12.



Figura 4.13. Papel abrasivo (lija).

Cuando se logra un rayado uniforme en una de las lijas, es necesario rotar la muestra  $90^\circ$  con el fin de tener un mejor control visual del nuevo desbaste. Se considera que cada fase del proceso ha terminado cuando las huellas dejadas por el uso de papel abrasivo en la etapa anterior han desaparecido completamente. Las operaciones de desbaste pueden llevarse a cabo manualmente o por medio de máquinas mecánicas, llamadas lijadoras o desbastadoras, las cuales facilitan la mejora de la eficacia y homogeneidad del acabado en la superficie.

Para impedir que surjan ralladuras de gran tamaño que podrían ser difíciles de eliminar y evitar calentamientos que pueden alterar la estructura del material, como se ve en la Figura 4.13, es crucial llevar a cabo este paso en húmedo.



Figura 4.14. Desbaste de las muestras.

### Paso 3:

El pulido se lleva a cabo después; su propósito es quitar las marcas producidas por el desbaste y conseguir una superficie especular (similar a un espejo). Existen diferentes tipos de abrasivos que se pueden emplear, como polvo de diamante, alúmina o óxido de magnesio. La alúmina de  $0.06 \mu\text{m}$  se emplea en este caso, tal como lo indica la Figura 4.14. Respecto a los paños de pulido, hay de seda, nylon, algodón y otros materiales. Tal como se ilustra en la Figura 4.15.



Figura 4.15. Alúmina para pulir.



Figura 4.16. Paño de pulir.

#### **Paso 4:**

Las muestras deben ser limpiadas tras cada fase; normalmente, se las mantiene húmeda y se las frota con algodón. Luego de que estén limpias, se limpian con alcohol y se secan velozmente con aire caliente. La Figura 4.16 muestra que, cuando las muestras están completamente secas, no se presenta rugosidad a simple vista.



Figura 4.17. Muestras totalmente limpias.

#### **Paso 5:**

Cuando la superficie está completamente pulida, se lleva a cabo un ataque para mostrar la microestructura del material. Normalmente se hace un ataque químico con Nital, que es una combinación de ácido nítrico y alcohol. Este compuesto nos permite oscurecer la perlita y brindar contraste a esta última, con el fin de distinguir las fronteras de perlita y diferenciar entre ferrita y martensita.[24], Se añaden entre una y dos gotas de nital a las muestras y se aguarda 10 minutos para que la reacción con el nital sea más visible al poner las muestras en el microscopio, tal como se muestra en la figura 4.18. Después de ese tiempo, se lavan bien las muestras con agua y se secan con aire caliente. Cuando estén completamente secas, podremos

percibir leves modificaciones y sabremos que están listas para el análisis metalográfico en el microscopio (ver Figura 4.17).



Figura 4.18. Ataque químico con nital.



Figura 4.19. Muestras después del ataque químico.

### **Paso 6:**

Por último, se coloca las muestras una por una en el microscopio y ajustamos hasta poder observar la microestructura del material y realizar el análisis de dicha estructura, como se muestra en la Figura 4.20.



Figura 4.20. Observación de la microestructura de las muestras.

## 5. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Para comprender plenamente el proceso de manufactura y llegar a las conclusiones sobre los aspectos que deben cumplirse en el procedimiento elegido, es imprescindible llevar a cabo una recopilación de datos. El análisis del impulsor elaborado, diseñado para tener una vida útil de larga duración, no resultó así debido a la falta de conocimiento del personal responsable de las instalaciones.

El impulsor es la parte central de una bomba, pues es la única componente que se mueve; este transfiere al líquido que está siendo extraído la potencia de su rotación.

Las partes que componen el impulsor son las siguientes: alavés, ojo, disco, gualdera, voluta y eje.

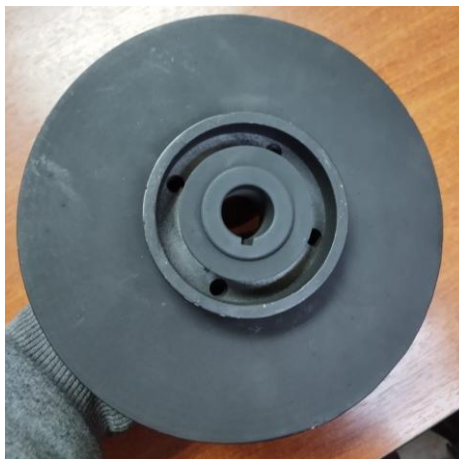


Figura 5.1. Impulsor elaborado.

El deterioro del impulsor puede ser causado por el incorrecto mantenimiento de la bomba, si no se emplean las herramientas apropiadas para ello. Asimismo, está vinculado con la concentración de partículas que simboliza la pérdida de material, que sigue una tendencia lineal y decreciente, como se muestra en la Figura 5.1.



Figura 5.2. Impulsor de bronce-aluminio dañado.

### 5.1. ANALISIS DE DISEÑO DE LA PLANTILLA

Se emplea la ecuación 4.10 para calcular la sobredimensión de las dimensiones, añadiendo a las dimensiones de las piezas. La tabla 5.1 muestra cómo quedarían estas últimas.

Tabla 5.1. Tabla de sobredimensión de la plantilla y caja de machos.

	Dimensiones	Sobredimensiones
Diámetro de la pieza de tapa superior	41 mm	42.5 mm
Altura de la tapa superior	45 mm	46.5 mm
Diámetro de la tapa de abajo.	200 mm	202.5 mm
Altura de la tapa de abajo.	22 mm	23.5 mm
Diámetro de la pieza del macho.	300 mm	303.5 mm

La representación del impulsor en el software inventor y el impulsor ya impreso en una impresora 3D de color negro se encuentran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2. Impulsor simulado e impreso en 3D.

Pieza diseñada	pieza impresa en 3D
Pieza inferior del macho y alabes el cual realizamos modificaciones y aumento en las hélices.	Macho inferior impresa en 3D.
	

Se realizo estas modificaciones para evitar el desgaste en los alabes, una mejor circulación del fluido y evitar cavitaciones y perdidas por los remolinos que se generar normalmente en este tipo de impulsores.

## 5.2. ANALISIS DE ESFUERZO EN LOS MOLDES DEL IMPULSOR

Las personas de entre 20 y 29 años, hombres y mujeres, son las que poseen la mayor fuerza media en sus manos. Entre las personas de 20 a 29 años, la fuerza media de agarre es de 46 kg en los hombres y de 29 kg en las mujeres.

### 5.2.1. Simulación de esfuerzo del macho inferior

Los valores representados en la figura 5.3 son valores de esfuerzo máximo de 0,5069 MPa y mínimo de 0 MPa de Von Mises.

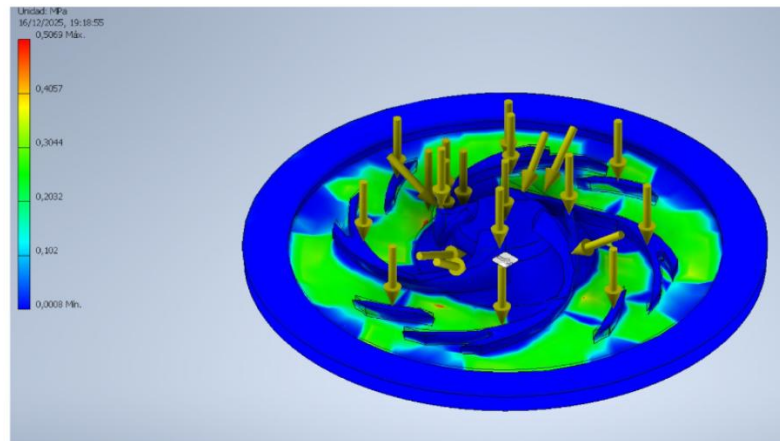


Figura 5.3. simulación del macho inferior.

La figura 5.3 revela un valor mínimo próximo a 0 MPa y uno máximo de 0,5069 MPa. Se puede apreciar que los valores más altos se encuentran en las zonas de transición geométrica, como son los empalmes entre álabes y el cuerpo principal, además de las áreas cercanas al cubo, donde se redistribuye la carga aplicada. En términos generales, el grado de Von Mises permanece bajo en la mayoría de los componentes, lo que señala que el macho inferior opera con un régimen de esfuerzos localizados y moderados.

### 5.2.2. Simulación de la primera y tercera tensión en el macho inferior.

#### Primera Tensión Principal:

Valores máximos de esfuerzo normal que se muestran en la figura 5.4 son:

Max: 0,4905 MPa

Min: -0,9864 MPa

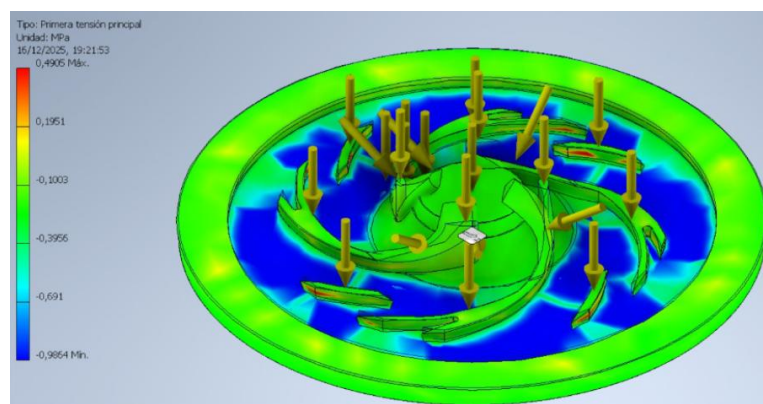


Figura 5.4. Simulación de la primera tensión principal.

En la simulación, se alcanza un valor máximo de 0,4905 MPa, que se manifiesta de manera localizada en áreas con cambios geométricos, sobre todo en las transiciones entre álabes y el

cuerpo del macho. La baja magnitud y puntualidad de la tracción, que no pone en riesgo la integridad estructural del macho, se demuestra con el valor mínimo de  $\sigma_1$ , que es -0,9864 MPa. Esto muestra que gran parte del macho está bajo un régimen de compresión más que de tracción.

### **Tercera tensión principal:**

Los valores mínimo y máximo de esfuerzo que se muestra en la figura 5.4, pero en compresión.

Max: 0,227 MPa

Min: -1,332 MPa

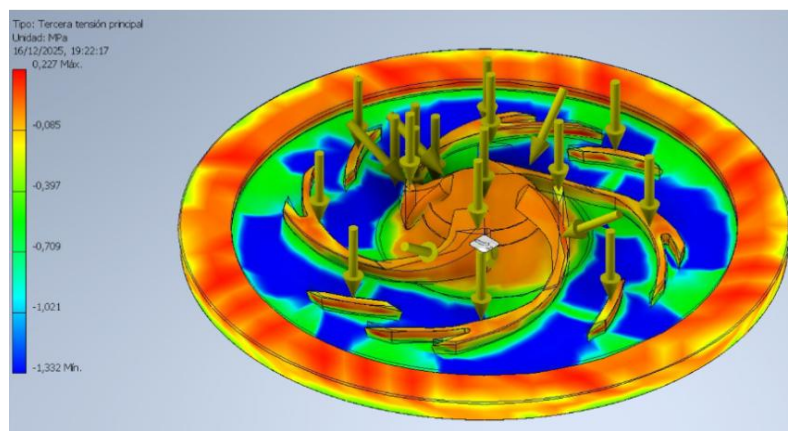


Figura 5.5. simulación de tercera tensión superficial.

La información revela un mínimo de -1,332 MPa, lo cual confirma que el macho inferior opera mayormente en una condición de compresión predominante. Esta se concentra en las zonas donde se transmiten las reacciones de soporte y en los sectores próximos al cubo y al anillo exterior, que funcionan como áreas para la distribución de la carga. El valor más alto de  $\sigma_3$ , que es 0,227 MPa, muestra áreas donde la compresión se reduce e incluso llega a un estado neutro, mientras que las zonas en las que la compresión máxima tiene lugar continúan siendo críticas.

### **Desplazamiento de la pieza:**

Es el valor máximo de desplazamiento que puede sufrir la pieza, la cual se puede observar en la figura 5.6.

Max: 0,003928 mm

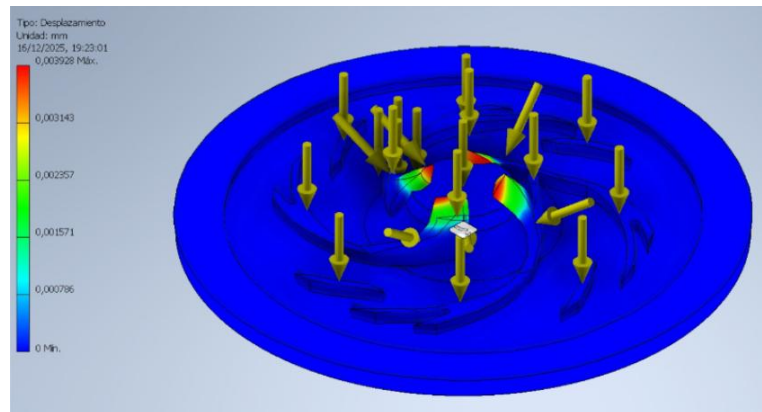


Figura 5.6. Simulación del desplazamiento máximo de la pieza.

La deformación máxima que puede sufrir el macho en las condiciones simuladas de carga se revela a través del análisis de desplazamientos. La máxima distancia recorrida es de 0,003928 mm. Este valor es muy bajo, lo que indica una gran rigidez del macho inferior y sugiere que el componente conserva su estabilidad dimensional durante el proceso. Esto disminuye la posibilidad de alteraciones geométricas que puedan perjudicar la precisión del molde o provocar desviaciones en los canales creados por el macho.

### 5.2.3. Simulación de funcionamiento del impulsor fabricado en hierro fundido

El análisis de la simulación del impulsor hecho de hierro fundido revela un comportamiento hidráulico positivo, caracterizado por una distribución más homogénea de las velocidades y valores un poco más altos que los que presenta el impulsor de bronce. La rugosidad superficial del hierro fundido es menos pronunciada, lo que favorece el traslado del fluido y disminuye las pérdidas por fricción, incrementando así la eficiencia hidráulica de todo el sistema.

En el área de velocidades, se nota que, desde el ojo del impulsor hacia la periferia, el fluido es acelerado con más uniformidad, lo cual ayuda a estabilizar mejor el flujo. Las componentes de velocidad muestran transiciones suaves, lo que sugiere una menor cantidad de alteraciones internas.

La presión producida por el impulsor de hierro fundido logra niveles más altos y permanece más constante a lo largo del periodo de simulación, lo cual indica una conversión más eficiente de la energía mecánica en energía hidráulica. El comportamiento descrito es típico de materiales que tienen propiedades superficiales superiores y una resistencia al flujo más baja; la figura 5.7 ilustra todo esto.

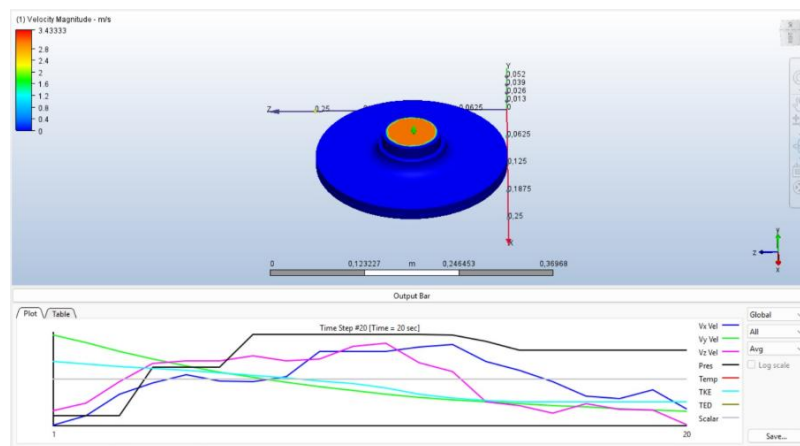


Figura 5.7. Simulación del impulsor fabricado en hierro fundido.

La energía cinética turbulenta es menor que la del impulsor de bronce, lo que indica un régimen de flujo más organizado y con menos pérdidas de energía. Esto resulta en una eficiencia hidráulica más alta y un desgaste del impulsor más bajo a largo plazo.

#### 5.2.4. Simulación de funcionamiento del impulsor fabricado en bronce aluminio

El examen del campo de magnitud de velocidad revela que las cifras más altas se agrupan en el ojo del impulsor, llegando a cerca de 3,34 m/s, lo que señala una aceleración apropiada del fluido en el área de entrada. Este comportamiento es típico de la operación centrífuga y verifica que la geometría del impulsor posibilita que el fluido sea admitido correctamente.

La velocidad del fluido va disminuyendo de manera gradual desde el centro hacia la periferia del impulsor, y se pueden observar valores bajos y relativamente homogéneos en casi toda la superficie. Esta distribución indica que el flujo es dirigido de forma controlada, sin la existencia de áreas críticas de recirculación o divisiones bruscas. Sin embargo, la rugosidad más elevada de la superficie del bronce propicia un incremento en las pérdidas por fricción, lo que justifica el descenso progresivo de la velocidad con respecto a materiales más lisos.

El componente radial es el que más predomina a lo largo del proceso, según el análisis de los componentes de velocidad, lo que verifica cómo opera la bomba centrífuga. La parte axial muestra cambios moderados con el tiempo, lo que señala que el flujo se estabiliza en el interior del impulsor. Este comportamiento es positivo porque evita alteraciones significativas que podrían influir en el desempeño hidráulico del sistema.

La simulación revela que la presión aumentó de manera gradual al principio, luego se estabilizó y finalmente disminuyó hacia el final del periodo analizado. Este resultado muestra que el impulsor tiene la capacidad de ejercer presión correctamente; no obstante, la disminución

observada podría vincularse a las pérdidas hidráulicas inherentes al material y a la disipación energética provocada por la fricción interna. No obstante, no se producen picos de presión repentinos, lo cual disminuye la posibilidad de cavitación durante el funcionamiento; esta evaluación completa se muestra en la figura 5.8.

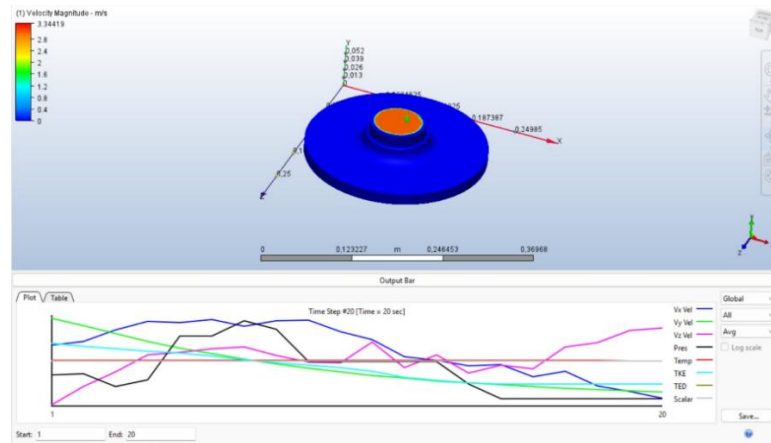


Figura 5.8. Simulación del impulsor fabricado en bronce.

### 5.3. MATERIAL DE FUNDICIÓN

#### 5.3.1. Hierro fundido

- Presenta una buena resistencia mecánica y elevada rigidez, lo que lo convierte en un material ampliamente utilizado en componentes industriales sometidos a cargas moderadas y condiciones de operación continuas.
- El hierro fundido tiene una menor resistencia a la corrosión en comparación con aleaciones como el bronce al aluminio o el acero inoxidable, puede presentar un desempeño aceptable cuando se emplean recubrimientos protectores o se utiliza en ambientes con agua dulce o fluidos poco agresivos.
- La duración del hierro fundido puede variar entre 4 y 5 años en condiciones de contacto continuo con fluidos, dependiendo del tratamiento superficial, la calidad del material y las condiciones de operación.

#### 5.3.2. Temperatura de fundición

Con la figura 5.9 se realiza el análisis para determinar la temperatura del horno para la fundición del hierro.

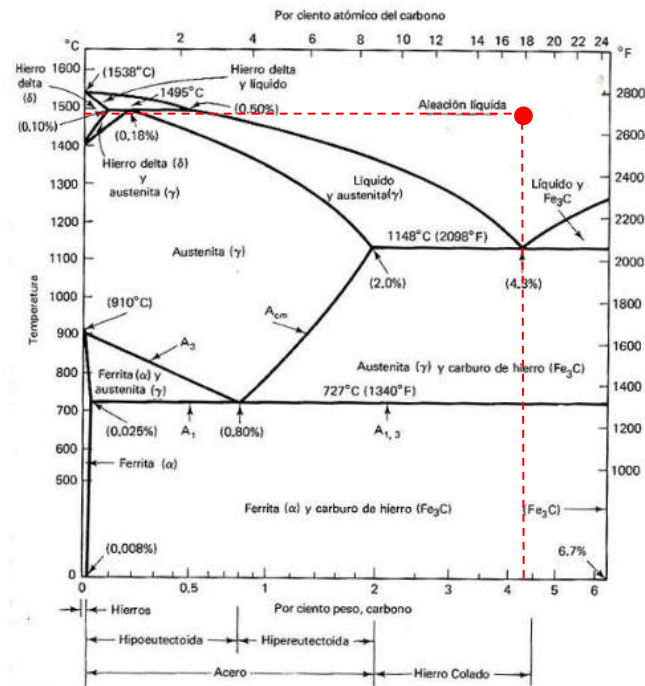


Figura 5.9. diagrama hierro carbono.

El diagrama muestra que el punto de fusión del hierro con un porcentaje de carbono de 4.3% empieza a partir de 1148 °C, teniendo en cuenta este valor, la temperatura del horno será 1480 °C para evitar partículas de granos solidos internos y solidificación al momento de verter en el molde. Se recomienda por encima de la temperatura línea liquida de 20 a 25 °C

#### 5.4. ANALISIS DE LA TECNOLOGIA DE FUNDICION

La tabla 5.3 muestra la resolución de las ecuaciones que son necesarias para tener un mejor control en la tecnología de fundición en el hierro fundido.

Tabla 5.3. Análisis de la tecnología de fundición.

Análisis de la tecnología de fundición.			
	Datos	Número de Ecuación	Resultado
<b>Peso de la pieza.</b>	Donde: $V = 366,190 \text{ (cm}^3\text{)}$ $P = 7150 \text{ kgf/m}^3$	Ecuación 1.	$G = 2,618 \text{ (kg)}$

<p><b>Determinación de la contracción E (%)</b></p>	<p>Donde:</p> <p>E= Contracción de fundición</p> <p>Lm= 0.01917</p> <p>Lp= 0.019</p>	<p>Ecuación 2.</p>	<p>E (%) = 0,89.</p>
<p><b>Fuerza de Flotación del Macho.</b></p>	<p>Donde:</p> <p>G= 0,585 (kg)</p> <p>g= 0,12 (kg)</p> <p>y'= 7150 (kg)</p> <p>y= 1600 (kg)</p>	<p>Ecuación 3.</p>	<p>P2= 1,909 (kg)</p>
<p><b>Área de Soporte de los Machos.</b></p>	<p>Donde:</p> <p>S2= 7,3(cm<sup>2</sup>) [ 10(cm<sup>2</sup>)</p> <p>P2= 1,909 (kg)</p> <p>c= 0,26 [Kg/Cm<sup>2</sup>], 2,5 [Kg/Cm<sup>2</sup>].</p>	<p>Ecuación 4.</p>	<p>S2= 7,3(cm<sup>2</sup>) [ 10(cm<sup>2</sup>)</p>
<p><b>Cálculo de la Carga de Coque</b></p>	<p>Donde:</p> <p>hdt= 748(mm)</p> <p>p= 350 (mm)</p> <p>40= Coeficiente empírico.</p>	<p>Ecuación 5.</p>	<p>hdt= 748(mm)</p>
<p><b>Composición de la Mezcla de Machos.</b></p>	<p>Donde:</p> <p>%SiO<sub>2</sub>= 70%</p> <p>%Na<sub>2</sub>O= 30%</p>	<p>Ecuación 7.</p>	<p>M= 2,41</p>

	1.032= Relación entre los pesos moleculares del SiO <sub>2</sub> y Na <sub>2</sub> O.		
<b>Balance de Carga del Horno.</b>	<p>Donde:</p> <p>Q<sub>k</sub>= 3,54 (kg)</p> <p>Q<sub>Re</sub>= 1,77(kg)</p> <p>Q<sub>Ch</sub>=1,06(kg)</p> <p>Q<sub>ARRB</sub>= 0,71(kg)</p>	Ecuación 9.	Q <sub>k</sub> = 3,54 (kg)
<b>Sobremedida de maquinado.</b>	<p>Donde:</p> <p>Diámetro tapa superior (Y1):</p> <p>X= 300 mm</p> <p>Z= 3.5 mm</p> <p>Altura tapa superior (Y2):</p> <p>X= 45 mm</p> <p>Z= 1.5 mm</p> <p>Diámetro tapa de abajo (Y3):</p> <p>X= 200 mm</p> <p>Z= 2.5 mm</p> <p>Altura tapa de abajo (Y4):</p> <p>X= 22 mm</p> <p>Z= 1.5 mm</p>	Ecuación 10.	<p>Y1= 303.5 mm</p> <p>Y2= 46.5 mm</p> <p>Y3= 202.5 mm</p> <p>Y4= 23.5 mm</p> <p>Y5= 302.5 mm</p>

	Diámetro pieza del macho (Y5):  $X = 300 \text{ mm}$  $Z = 2.5 \text{ mm}$		
--	-------------------------------------------------------------------------------------------	--	--

Los parámetros calculados evidencian que la tecnología de fundición empleada para la fabricación del impulsor en hierro fundido presenta condiciones técnicas adecuadas para controlar el proceso y garantizar la calidad final de la pieza. El peso de la pieza permite estimar con precisión la cantidad de metal necesario y mejorar el rendimiento del material durante la colada. La contracción de fundición determina la compensación dimensional que debe incorporarse en el modelo para evitar errores geométricos después de la solidificación. La fuerza de flotación del macho y el área de soporte verifican que el sistema de sujeción diseñado es suficiente para mantener la estabilidad del macho frente al empuje del metal líquido, evitando desplazamientos internos y defectos dimensionales. De igual manera, el cálculo de la carga de coque permite establecer condiciones térmicas apropiadas en el horno para lograr una fusión eficiente y uniforme. La composición de la mezcla de machos garantiza resistencia mecánica y estabilidad térmica, favoreciendo la correcta formación de cavidades internas. Finalmente, la sobremedida de maquinado asegura que la pieza fundida disponga del material adicional necesario para alcanzar las dimensiones finales requeridas mediante operaciones de mecanizado. En conjunto, estos resultados demuestran que la tecnología de fundición analizada permite reducir defectos, mejorar la repetibilidad del proceso y asegurar la funcionalidad del impulsor fabricado.

#### **5.4.1. Velocidad de separación de inclusiones**

Observación de la ecuación 4.6 según la figura 5.9.

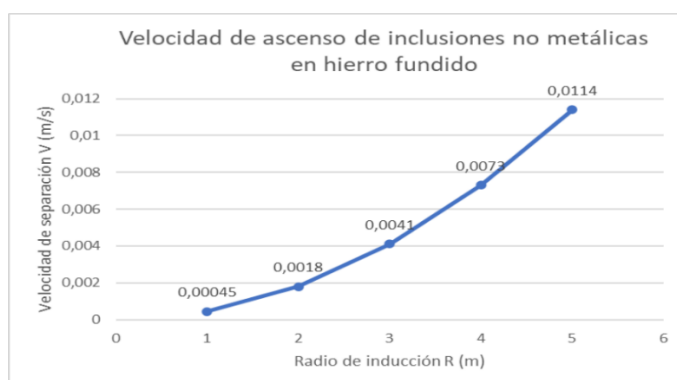


Figura 5.10. Velocidad de separación de inclusiones.

El incremento de la fuerza de empuje que se ejerce sobre inclusiones más grandes, que logra sobrepasar con más facilidad las fuerzas de resistencia viscosa del hierro fundido, es lo que explica este comportamiento no lineal. En consecuencia, las inclusiones de mayor radio suben más rápido hacia la superficie del baño metálico, lo que ayuda a que se eliminen antes de la solidificación.

Estos hallazgos sugieren, desde una perspectiva metalúrgica, que las inclusiones no metálicas más grandes tienen una eficiencia de separación más alta, lo que ayuda a mejorar la limpieza del metal y, por consiguiente, las propiedades mecánicas del hierro fundido. Por otro lado, las inclusiones más pequeñas tienen una velocidad de ascenso más lenta y pueden quedar atrapadas en el material, lo que provoca discontinuidades internas que perjudican la calidad del producto final.

#### 5.4.2. Presión crítica de penetración.

Observación de la ecuación 4.8 según la figura 5.10.

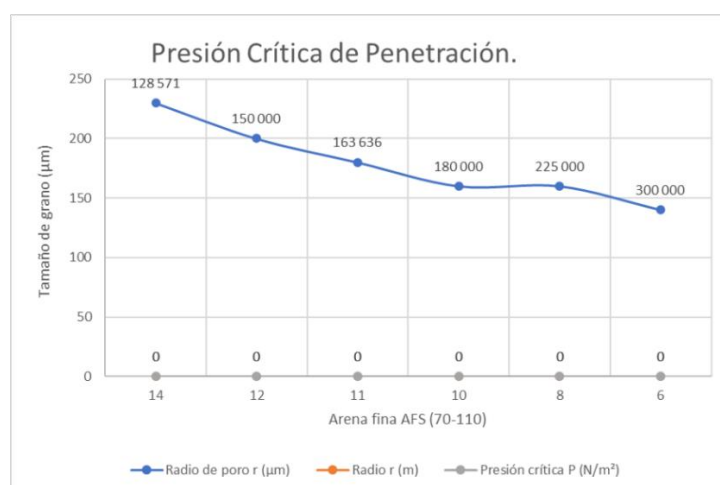


Figura 5.11. Presión crítica de penetración.

Los resultados adquiridos, desde la perspectiva de la metalurgia y la tecnología, demuestran que el tamaño de grano de la arena para moldeo, definido a través del índice AFS, es un parámetro esencial en el control de la presión crítica de penetración del metal fundido. El balance ideal entre la permeabilidad del molde, que se requiere para evacuar los gases de manera eficiente durante la colada, y la resistencia mecánica de la matriz arenosa, que es esencial para evitar que el metal líquido penetre en los intersticios del molde, se logra con una selección correcta de la granulometría de arena. Por lo tanto, el cálculo apropiado del índice AFS impacta directamente en la disminución de los defectos superficiales, como son las adherencias y la penetración metálica, además de optimizar la calidad a nivel superficial, dimensional y estructural de las piezas de hierro fundido producidas.

### 5.5. CAJA DE MOLDE

La figura 5.11 muestra cómo queda la arena después de ser insertada en el molde metálico.



Figura 5.12. Caja de molde para el impulsor.

Por normativa sus dimensiones son:

- Dimensiones de los bordes de la caja:  $a = 50 \text{ mm}$ ,  $b = 194 \text{ mm}$ ,  $B = 100 \text{ mm}$ ,  $c = 34 \text{ mm}$
- La caja inferior tiene unas medidas de  $424 \times 370 \times 424 \text{ (mm)}$ , mientras que las de la superior son  $424 \times 194 \times 424 \text{ (mm)}$ .
- Posteriormente, se normalizan las dimensiones; por lo tanto, se utilizará la caja inferior de  $350 \times 350 \times 350 \text{ (mm)}$  y la superior de  $350 \times 200 \times 350 \text{ (mm)}$ .

Las placas que se observan en la Figura 5.11. son conocidas como espicher y sirve para dar soporte y reforzar el molde al momento de verter el metal líquido y evitar que se rompa el molde.

### 5.6. TIEMPO DE ENFRIAMIENTO

En varias fases del procedimiento, se calienta la pieza que está siendo trabajada. Esto puede tener un impacto sobre la estructura y las dimensiones del material. Para descartar la posibilidad de sobrecalentamiento, se requiere un tiempo de enfriamiento.

### 5.6.1. Cálculo de tiempo de enfriamiento

Utilizando la ecuación 4.11 se observa en la figura 5.12 la curva de enfriamiento estimada en el molde.

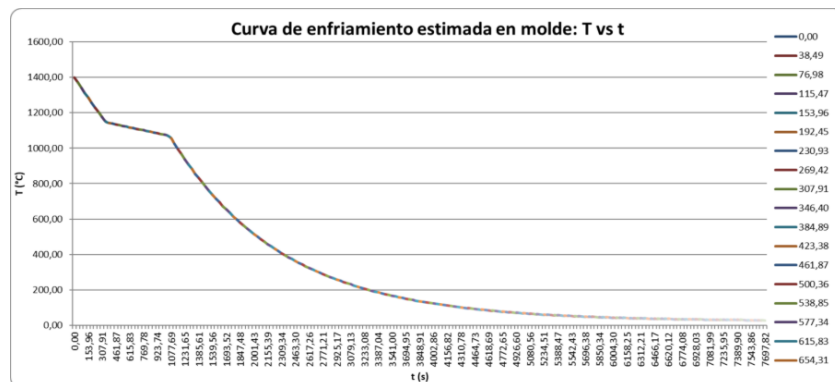


Figura 5.13. Curva de enfriamiento estimada.

Se escoge  $t \approx 7700$  s porque es el momento en que la curva comienza a comportarse asintóticamente y la disminución de temperatura por unidad de tiempo se vuelve mínima. Por lo tanto, alargamos el periodo más allá de ese instante sin obtener una mejora proporcional en el enfriamiento, aunque sí aumentemos el ciclo del proceso. Transformando esta duración seleccionada, obtenemos un tiempo de enfriamiento de cerca de 2 horas y 10 minutos.

## 5.7. REMOCIÓN DEL MATERIAL

### 5.7.1. Desmoldeo del material

El procedimiento de desmoldeo de las piezas fundidas implica la separación, mediante vibración en una pantalla vibratoria, de la arena de moldeo de la fundición que se encuentra dentro del molde.

Así, se dividen de una parte:

- La pieza fundida, que continuará con los demás procedimientos de producción.
- Por otro lado, las arenas que formaban los moldes y que se usarán para la recuperación, como se muestra en la figura 5.13.



Figura 5.14. Remoción del material.

## 5.8. ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL IMPULSOR FUNDIDO

### 5.8.1. Análisis macroestructural

En el área del cubo central se puede ver una cavidad irregular que resulta de la contracción del metal al solidificarse. Este defecto, que se conoce como rechupes o porosidad por contracción, señala una alimentación del metal líquido deficiente, la cual puede estar vinculada a un diseño de mazarotas inapropiado o a una solidificación no direccional. También se pueden observar puntos oscuros esparcidos en la superficie del impulsor, que corresponden con inclusiones de escoria que quedan atrapadas en la matriz metálica. Estos defectos son provocados por no limpiar bien el metal fundido o por excesiva turbulencia durante el llenado del molde; esto último queda reflejado en la figura 5.14.



Figura 5.15. Rechupes e inclusiones en el impulsor.

Otros defectos presentes son las fisuras que cruzan el cuerpo del impulsor. Estas surgen en la última fase de solidificación, cuando el material no ha alcanzado suficiente resistencia mecánica para tolerar las tensiones térmicas. Asimismo, se nota metal incompleto y superficies irregulares, lo cual señala una disminución de la fluidez del metal fundido; esto puede estar relacionado con una temperatura de fusión baja, como se ilustra en la Figura 5.15.



Figura 5.16. Grietas de solidificación.

Finalmente, se pueden ver proyecciones de metal muy grandes e irregulares que emergen de los bordes. Esto ocurre porque las dos partes del molde, la tapa y la caja, no cerraron bien o se elevaron durante el vertido por falta de peso sobre la caja (presión metalostática), tal como se muestra en la Figura 5.16.



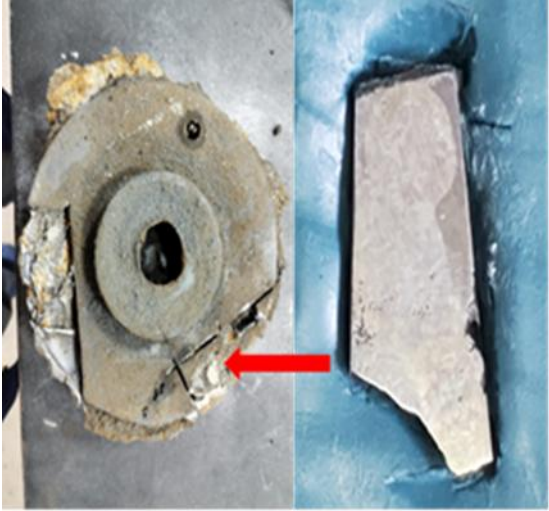
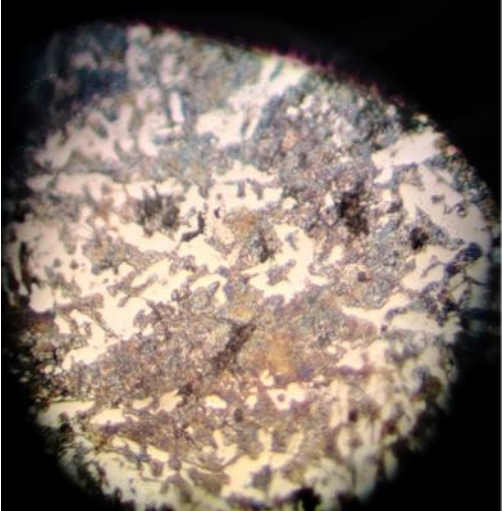

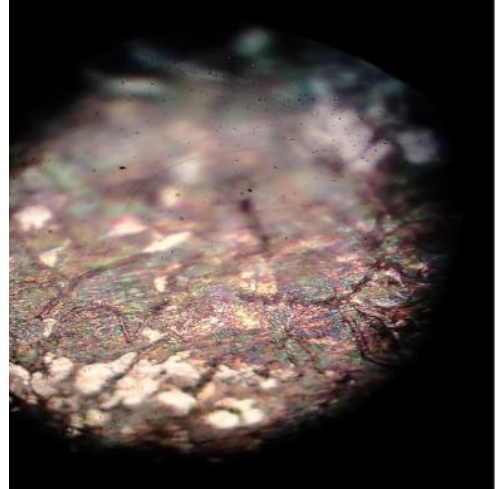
Figura 5.17. Proyección de metal irregulares en los bordes.

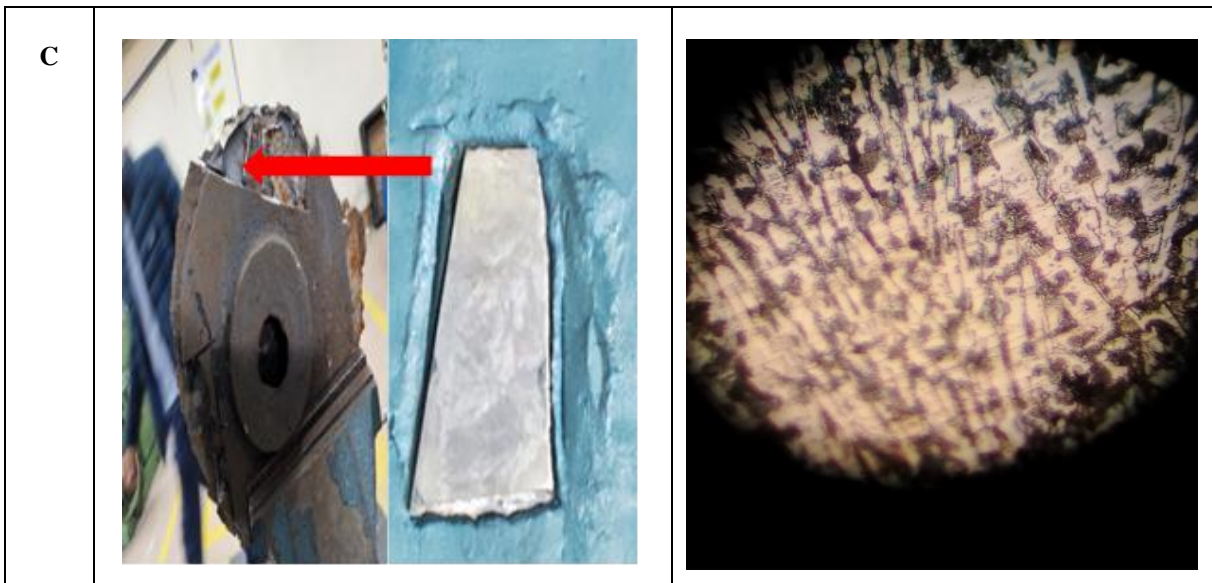
### 5.8.2. Análisis microestructural

En la siguiente tabla 5.5 se muestra el resultado del análisis metalográfico del cual se tiene las siguientes observaciones:

Tabla 5.4. análisis metalográfico.

	<b>Impulsor</b>	<b>Toma metalográfica</b>
	Parte con mayor fallo de fundición del impulsor:	Metalografía:

<p><b>A</b></p>	 <p>A photograph showing a circular metal component with a central hole. The component is heavily damaged, with a large section missing and a jagged crack. A red arrow points from the crack to a rectangular metal fragment shown to the right, which is a piece of the original part.</p>	 <p>A circular micrograph showing a complex, porous metal structure with a mix of light and dark regions, likely representing a specific microstructural feature or defect.</p>
	<p>Parte del impulsor original del motor:</p>	<p>Metalografía:</p>
<p><b>B</b></p>	 <p>A photograph showing the same circular metal component as in A, but now repaired. A metal patch is visible on the left side. A red arrow points from the patch to the rectangular metal fragment shown to the right, which is a piece of the original part.</p>	 <p>A circular micrograph showing a complex, porous metal structure with a mix of light and dark regions, likely representing a specific microstructural feature or defect.</p>
	<p>Parte con menores fallos de fundición del impulsor:</p>	<p>Metalografía:</p>



### Observaciones microestructurales (muestra A)

En la imagen metalográfica se distinguen claramente los siguientes rasgos:

- Constituyente oscuro, irregular y ramificado distribuido de forma no uniforme.
- Matriz clara continua que rodea a los constituyentes oscuros.
- Ausencia de grafito esferoidal (nodular) o en forma de hojuelas claramente definidas.
- Presencia de zonas con apariencia interconectada tipo red, típica de carburos.

### Identificación de los constituyentes metalográficos

#### a) Carburos de hierro (cementita – $Fe_3C$ )

- Se observan como fases oscuras, continuas y de morfología irregular.
- Forman una red eutéctica, característica de fundiciones con alto contenido de carbono combinado.
- Estos carburos confieren:
  - Alta dureza
  - Alta resistencia al desgaste
  - Muy baja tenacidad

#### b) Matriz perlítica / ledeburítica transformada

- La fase clara corresponde a una matriz perlítica (mezcla de ferrita + cementita) proveniente de la transformación de la austenita.
- En zonas con alta fracción de carburos, la estructura se asocia a ledeburita transformada, típica de enfriamientos relativamente rápidos.

#### **c) Ausencia de grafito libre**

- No se observan hojuelas de grafito (hierro gris).
- No se observan nódulos de grafito (hierro nodular).
- Esto indica que el carbono está mayoritariamente combinado en forma de carburos.

#### **Tipo de hierro fundido identificado**

Con base en la microestructura observada, el material corresponde a:

Hierro fundido blanco (White Cast Iron)

Justificación:

- Carbono presente en forma de cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ).
- Estructura ledeburítica (eutéctica hierro–cementita).
- Ausencia total de grafito.
- Microestructura típica de fundiciones utilizadas cuando se prioriza resistencia al desgaste sobre la tenacidad.

#### **4. Relación con la falla del impulsor**

El tipo de microestructura explica claramente el comportamiento del componente:

- ✓ Alta resistencia al desgaste abrasivo (adecuado para fluidos con sólidos).
- ✗ Alta fragilidad, lo que favorece:
  - Fractura súbita.
  - Grietas por impacto.
  - Fallas por concentradores de esfuerzo (como en la zona señalada).

La falla observada en el impulsor es coherente con un hierro fundido blanco, especialmente si:

- Hubo impactos hidráulicos.

- Existieron defectos de fundición (porosidad, segregación).
- Se presentaron cargas dinámicas o vibraciones.

## **5. Conclusión técnica**

La muestra A corresponde a un hierro fundido blanco, con microestructura predominantemente ledeburítica (cementita + perlita), caracterizada por alta dureza y baja tenacidad.

Este tipo de material, aunque resistente al desgaste, es propenso a fallas frágiles, lo que explica el daño observado en el impulsor.

### **Observaciones microestructurales (muestra B).**

A partir de la micrografía correspondiente a la muestra B, se identifican los siguientes rasgos característicos:

- Presencia de fases oscuras finas y bien distribuidas, sin formar redes continuas.
- Matriz metálica continua, con contraste moderado entre fases.
- Aparición de partículas claras aisladas, con morfología irregular, no interconectadas.
- Microestructura más homogénea y refinada en comparación con la muestra A.
- No se observan redes continuas de cementita ni zonas claramente ledeburíticas.

### **Identificación de los constituyentes metalográficos**

#### **a) Grafito en forma de hojuelas (laminar)**

- Se identifica como fases oscuras alargadas y finas, dispersas en la matriz.
- Morfología típica del grafito laminar tipo A–B, con buena distribución.
- Este tipo de grafito:
  - Mejora la maquinabilidad.
  - Reduce tensiones internas.
  - Aumenta la capacidad de amortiguamiento de vibraciones.

#### **b) Matriz predominantemente perlítica**

- La fase clara corresponde a una matriz perlítica (ferrita + cementita laminar).

- La perlita aporta:
  - Buena resistencia mecánica.
  - Resistencia moderada al desgaste.
- Se observa una estructura relativamente fina, indicativa de un control adecuado del enfriamiento.

**c) Carburos aislados (cementita secundario)**

- Algunas zonas claras más brillantes corresponden a carburos dispersos, no continuos.
- No forman redes, por lo que no generan fragilidad severa.
- Son típicos de hierros fundidos grises perlíticos utilizados en componentes hidráulicos.

**Tipo de hierro fundido identificado**

Con base en la microestructura observada, la muestra B corresponde a:

Hierro fundido gris perlítico

Justificación:

- Presencia clara de grafito laminar.
- Matriz perlítica continua, sin ledeburita.
- Ausencia de cementita en red.
- Microestructura balanceada entre resistencia y tenacidad.

**4. Relación con el comportamiento del impulsor**

La microestructura observada explica el mejor desempeño mecánico de esta zona del impulsor:

- ✓ Menor fragilidad frente a impactos y cargas dinámicas.
- ✓ Buena capacidad de amortiguamiento de vibraciones.
- ✓ Menor tendencia a la propagación rápida de grietas.
- ✗ Menor resistencia al desgaste extremo en comparación con un hierro blanco.

Esto concuerda con la observación macroscópica:

“Parte con menores fallos de fundición del impulsor”.

## 5. Conclusión técnica

La muestra B corresponde a un hierro fundido gris de matriz perlítica, con grafito laminar finamente distribuido, lo que explica su mejor comportamiento mecánico y la menor incidencia de fallos observados en el impulsor.

La coexistencia de zonas con hierro blanco (muestra A) y hierro gris (muestra B) sugiere un problema de control metalúrgico durante la fundición, posiblemente asociado a:

- Variaciones locales de velocidad de enfriamiento.
- Diferencias en la composición química.
- Espesores variables del impulsor.

## Observaciones microestructurales (muestra C)

De la micrografía metalográfica se identifican claramente los siguientes rasgos:

- Presencia dominante de grafito en forma de hojuelas gruesas y orientadas, con cierta direccionalidad.
- Matriz metálica clara y continua, con contraste marcado frente al grafito.
- Microestructura heterogénea, con zonas de mayor concentración de grafito.
- Ausencia de redes continuas de cementita.
- Orientación preferencial del grafito, típica de enfriamiento direccional o solidificación no uniforme.

## 2. Identificación de los constituyentes metalográficos

### a) Grafito laminar tipo C–D

- Se observa como hojuelas gruesas, alargadas y parcialmente alineadas.
- Este tipo de grafito suele aparecer:
  - En fundiciones con alto contenido de carbono equivalente.
  - En zonas de enfriamiento lento.
- Genera:

- Alta capacidad de amortiguamiento.
- Reducción significativa de la resistencia mecánica local.
- Mayor anisotropía del material.

b) Matriz ferrítica–perlítica

- La fase clara corresponde a una mezcla de ferrita y perlita.
- Mayor fracción de ferrita que en la muestra B.
- Consecuencias:
  - Menor dureza.
  - Mayor ductilidad local.
  - Menor resistencia al desgaste.

c) Ausencia de carburos continuos

- No se observa cementita en red.
- Indica una solidificación estable del carbono como grafito.

3. Tipo de hierro fundido identificado

Con base en la microestructura observada, la muestra C corresponde a:

Hierro fundido gris ferrítico–perlítico

Justificación:

- Presencia dominante de grafito laminar grueso.
- Matriz con fracción importante de ferrita.
- Ausencia de ledeburita y cementita continua.
- Microestructura típica de zonas menos solicitadas mecánicamente.

4. Relación con la falla observada

Aunque esta zona presenta menores defectos de fundición, su microestructura implica:

- ✓ Alta capacidad de disipación de vibraciones.
- ✓ Baja sensibilidad a tensiones térmicas.

- ✗ Baja resistencia mecánica local.
- ✗ Mayor susceptibilidad a desgaste y deformación plástica.

La fractura observada es consistente con sobrecargas locales o esfuerzos concentrados, más que con fragilidad extrema.

Comparación metalográfica de las muestras A, B y C en la tabla 5.6

Tabla 5.5. Comparación metalográfica.

<b>Característica</b>	<b>Muestra A</b>	<b>Muestra B</b>	<b>Muestra C</b>
Zona del impulsor	Mayores fallas de fundición	Menores fallas	Zona heterogénea / transición
Tipo de hierro fundido	Hierro fundido blanco	Hierro fundido gris perlítico	Hierro fundido gris ferrítico-perlítico
Forma del carbono	Combinado ( $Fe_3C$ )	Grafito laminar fino	Grafito laminar grueso
Microestructura	Ledeburítica	Perlítica homogénea	Ferrita + perlita
Cementita en red	Sí	No	No
Dureza relativa	Muy alta	Media-alta	Baja-media
Tenacidad	Muy baja	Media	Media-baja
Resistencia al impacto	Muy baja	Buena	Moderada
Resistencia al desgaste	Muy alta	Media	Baja
Tendencia a falla frágil	Muy alta	Baja	Media
Calidad metalúrgica	Deficiente	Buena	Aceptable
Condición de solidificación	Enfriamiento rápido	Enfriamiento controlado	Enfriamiento lento

### **Conclusión metalúrgica global**

El impulsor presenta una heterogeneidad metalúrgica significativa, con coexistencia de:

- Hierro fundido blanco (A) → extremadamente frágil.
- Hierro fundido gris perlítico (B) → comportamiento óptimo.
- Hierro fundido gris ferrítico–perlítico (C) → mecánicamente más débil.

Esta variación microestructural es indicativa de:

- Falta de control en la velocidad de enfriamiento.
- Posibles gradientes térmicos y de composición.
- Diseño geométrico del impulsor con espesores no uniformes.

### **Recomendación técnica**

Para impulsores de bombas centrífugas:

- Evitar completamente la formación de hierro blanco.
- Favorecer una matriz perlítica homogénea con grafito fino (tipo B).
- Controlar carbono equivalente, inoculación y enfriamiento.

### **5.8.3. Análisis microestructural final**

#### **Identificación del tipo de fundición**

La morfología predominante parece corresponder a:

#### **Fundición blanca**

Por la apariencia acicular/dendrítica clara y la red oscura interdendrítica, es más consistente con:

#### **Fundición blanca hipoeutéctica o cercana a composición eutéctica**

La microestructura observada sugiere mayor presencia de carburos → inclinación hacia **fundición blanca**.

#### **Microconstituyentes identificados**

##### **a) Cementita (Fe<sub>3</sub>C)**

- Apariencia: red blanca brillante continua o interdendrítica
- Alta dureza
- Frágil

- Responsable de alta resistencia al desgaste

**b) Perlita**

- Matriz con aspecto lamelar fino
- Mezcla eutectoide de:
  - Ferrita ( $\alpha$ -Fe)
  - Cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ )

Indica enfriamiento relativamente rápido.

**c) Posible ledeburita transformada**

Si la composición está cercana al eutéctico (4.3% C), puede observarse:

- Ledeburita primaria (austenita + cementita)
- Transformada a temperatura ambiente en:
  - Perlita + cementita

La morfología interdendrítica sugiere esta posibilidad.

**Características metalúrgicas del material**

Si corresponde a fundición blanca y la tabla 5.6 nos indica las características de esta:

Tabla 5.6. características del hierro fundido

Característica	Comportamiento
Dureza	Alta (450–650 HB aprox.)
Tenacidad	Baja
Resistencia al desgaste	Muy alta
Maquinabilidad	Muy baja

Por la ausencia visible de grafito laminar definido, se inclina más hacia **fundición blanca**.

**Estimación de concentración de carbono**

Sin análisis químico no puede determinarse con exactitud, pero metalográficamente puede estimarse:

**Si es fundición blanca hipoeutéctica:**

- 2.5 – 3.5 % C

**Si es eutéctica:**

- Aproximadamente 4.3 % C

Para impulsores resistentes al desgaste:

- Típicamente 2.8 – 3.6 % C
- Con posibles adiciones de Cr, Mo o Ni

La muestra presenta:

- Microestructura dendrítica
- Presencia significativa de carburos
- Matriz perlítica
- Ausencia de grafito nodular

Lo más probable es que se trate de:

**Hierro fundido blanco hipoeutéctico con matriz perlítica y red de cementita (ledeburítica transformada), como se muestra en la figura 5.17.**

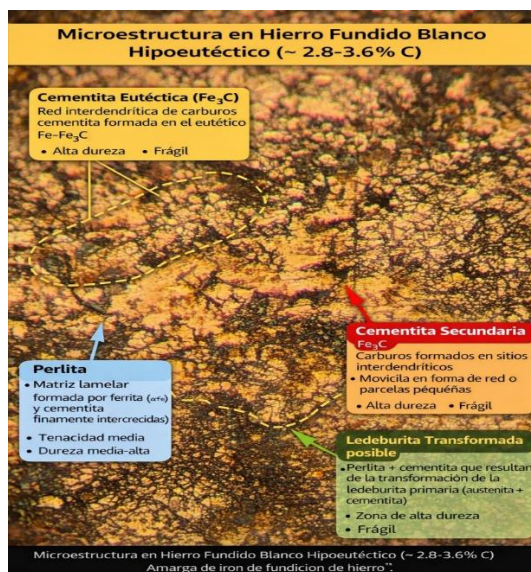


Figura 5.18. Microestructura en hierro fundido blanco.

La microestructura analizada corresponde a un hierro hipoeutéctico fundido en blanco, que se distingue por la presencia predominante de fases duras como la cementita secundaria, la cementita eutéctica y la ledeburita transformada, junto con una matriz perlítica. En conjunto, estos componentes le otorgan al material una dureza significativa y una resistencia alta al desgaste abrasivo. La cementita eutéctica brinda dureza y rigidez extremas; la cementita secundaria aumenta el endurecimiento en áreas interdendríticas; la ledeburita transformada afianza el carácter quebradizo y duro del material. Por su parte, la perlita funciona como matriz de soporte, lo que le da al interior de la estructura una resistencia mecánica intermedia. Por lo tanto, esta microestructura es apropiada para elementos que están expuestos a un desgaste y fricción intensos; sin embargo, sus desventajas son una tenacidad baja, fragilidad alta y maquinabilidad reducida.

## **5.9. MECANIZADO DEL IMPULSOR FUNDIDO**

La etapa final de todo el proceso global de fabricación de componentes fundidos es la terminación de las piezas, que implica procesar las piezas fundidas para alcanzar las medidas y tolerancias requeridas por el cliente. Las fundiciones más relevantes de mecanizado incluyen, entre otras, el torneado, la perforación, el rectificado y el mecanizado.

### **5.9.1. Mecanizado por arranque de viruta**

En el mecanizado, es importante enfatizar los procesos: comienza con un procedimiento intermedio que elimina el material de manera muy precisa y termina con uno final que lo quita de forma más controlada. Esto aumenta la precisión del mecanizado.

### **5.9.2. Mecanizado por torneado**

Es el tipo de mecanizado que se emplea con más frecuencia en la industria. La pieza permanece en el plato del torno, que realiza un movimiento de corte al rotar alrededor de ella; la hoja va avanzando y eliminando las secciones apropiadas del material. La pieza se sitúa en el plato del torno, que efectúa un movimiento de corte al girar alrededor de su eje; la hoja avanza y suprime las partes apropiadas del material. La tabla 5.4 que viene a continuación muestra el cálculo del tiempo de mecanizado para conseguir un acabado de mejor calidad.

Tabla 5.7. Cálculo de tiempo de mecanizado.

Cálculo de tiempo de mecanizado
---------------------------------

	Datos	Número de Ecuación	Resultado
Tiempo de refrentado	$R = 52$ (mm). $e_1 = 0,5$ (mm). $e_2 = 0,5$ (mm) $N = 600$ (rpm). $av$ $= 0,1$ (mm/rev).	Ecuación 10	$T_r = 0,54$ (min) <b><math>T_r = 0,54</math>(min)</b>
Tiempo de cilindrado y mandrinado.	$L = 28$ (en mm). $N = 600$ (rpm). $av$ $= 0,1$ (mm/rev).	Ecuación 12	$T_c = 0,46$ (min) <b><math>T_c = 0,46</math>(min)</b>

### Tiempo de montaje de la pieza

La pieza se sostiene solamente en un extremo, mientras que el opuesto está colgado sobre la bancada para permitir su mecanización. La instalación dura entre 5 y 10 minutos. Las pinzas de sujeción incluyen una abrazadera universal que puede tener entre tres y cuatro mordazas.

### Montaje de la cuchilla

Para quitar partes sobrantes del material, se requiere un tiempo de montaje de la herramienta de corte, como el cuchillo, que dura en torno a 10 minutos.

### Pasos para la chaveta del impulsor.

Se adquirió una cuchilla de 1/4 con el fin de obtener una cuchilla con las dimensiones 3 x 5 y así crear la chaveta del impulsor, que debe tener el mismo tamaño que la chaveta del impulsor original, como se ilustra en la Figura 5.17.



Figura 5.19. Mecanizado de la chaveta.

## 5.10. VALORACIÓN ECONÓMICA

Los gastos de ingeniería y materiales que supone llevar a cabo este proyecto se mostrarán en la tabla 5.7. Se podrá hacer una evaluación económica con estos datos para determinar la rentabilidad de la producción de este tipo de componentes.

Tabla 5.8. Costo de producción.

DETALLES	TIEMPO DE TRABAJO (h)	COSTOS POR HORA	COSTO TOTAL
Costo de la elaboración del molde del Impulsor.			
Diseño y mano de obra			\$300
Dibujo de la plantilla del impulsor (Inventor)	3	\$10	\$30

Impresión en 3D	15	\$2.25	\$33.75
Servicio de fundición			
Fundición del Impulsor	56		\$300
Servicio de mecanizado			
Mecanizado de los acabados de la pieza	8		\$50
<b>Costo total de la fundición del impulsor</b>			<b>\$713.75</b>

En la siguiente Tabla 5.8 se muestra el cálculo del TIR y VAN lo que nos ayuda a tener una mejor idea de la rentabilidad de la fabricación del impulsor cerrado y la Tabla 5.9 nos indica la tasa de descuento anual, inversión inicial el cual es el costo de producir dicha pieza, el ahorro anual.

Tabla 5.9. TIR y VAN

T	$(1+r)^t$	flujo de caja	flujo acumulado
0	0	-713,75	-713,75
1	1,08	335,69	-378,06
2	1,17	309,79	-68,28
3	1,27	285,89	217,61
4	1,38	263,83	481,44
5	1,49	243,48	724,92
6	1,62	224,69	949,61
7	1,75	207,36	1156,97

8	1,90	191,36	1348,33
9	2,06	176,60	1524,93
10	2,23	162,97	1687,90

Tabla 5.10. valores de inversión.

Tasa de descuento	8,36%
Inversión	713,75 usd
Ahorro anual	363,75 usd/año
Vida útil	10 años

Con base en la evaluación económica realizada para la fabricación del impulsor cerrado, considerando una inversión inicial de USD 713,75, una tasa de descuento del 8,36%, una vida útil de 10 años y un margen neto (ahorro) de USD 363,75 por impulsor, se determina que el proyecto es económicamente rentable y financieramente viable.

Tabla 5.11. VAN Y TIR

VAN	1687,90
TIR	39%
R B/C	2,36
Payback	1,69 años = 1 año 7 meses

Los resultados obtenidos en la Tabla 5.10 evidencian un Valor Actual Neto (VAN) de USD 1.687,90, lo cual confirma que, una vez descontados los flujos futuros, la alternativa genera un excedente positivo y crea valor. Asimismo, la Tasa Interna de Retorno (TIR) del 39% supera ampliamente la tasa de descuento utilizada, indicando un rendimiento superior al mínimo exigido. De igual manera, la relación Beneficio/Costo (B/C) de 2,36 demuestra que por cada



dólar invertido se recuperan USD 2,36 en beneficios actualizados, reforzando la conveniencia económica del proyecto.

En términos de recuperación de la inversión, el periodo de retorno es de 1,69 años, lo que evidencia una recuperación rápida del capital invertido. Adicionalmente, la rentabilidad por unidades indica que el proyecto alcanza el punto de equilibrio entre el segundo y el tercer impulsor, siendo que a partir del **tercer impulsor** se obtiene ganancia neta bajo el criterio descontado. En consecuencia, se concluye que la fabricación del impulsor bajo la tecnología propuesta no solo es rentable, sino que presenta una recuperación de inversión favorable y una rentabilidad sostenida, respaldando su implementación como alternativa técnica y económicamente justificable.

### 5.11. IMPACTO TECNOLÓGICO

Las características del hierro fundido muestran ventajas técnicas frente al bronce aluminio para la fabricación del impulsor, principalmente por su menor contracción lineal, mayor fluidez, menor riesgo de oxidación y mejor estabilidad durante el llenado del molde. Estas propiedades permiten un mejor control dimensional y una reproducción más precisa de la geometría de la pieza, aunque exigen recalcular parámetros críticos como temperatura de colada, diseño del sistema de alimentación, sobremedidas del modelo y condiciones de ventilación del molde. En consecuencia, el análisis de estas variables constituye la base para ejecutar la tecnología de fundición y reducir la aparición de defectos en la pieza final, como se observa en la tabla 5.12.

Tabla 5.12. acabado del impulsor en bronce-aluminio y hierro fundido

Impulsor bronce Aluminio.	Impulsor hierro fundido
	

## **5.12. IMPACTO AMBIENTAL**

Al disminuir defectos y reprocesos se reduce el desperdicio de metal, el consumo de arena y la energía asociada a coladas repetidas, lo que mejora la eficiencia del proceso. Sin embargo, el proceso de fundición también implica impactos propios: alto consumo energético y emisiones en la etapa de fusión, generación de arena usada y polvo por moldes desechables, y residuos/efluentes derivados de limpieza y mecanizado, que requieren manejo y control adecuados para minimizar su efecto.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. CONCLUSIONES**

- Estas herramientas posibilitaron la justificación técnica de que el cambio de plantilla no solo se debió a la variación del material, sino también a que era necesario conservar la funcionalidad del impulsor y su capacidad para ser manufacturado en hierro fundido.
- La elección de la tecnología de fundición más adecuada para producir el impulsor en hierro fundido demostró que este material tiene condiciones beneficiosas desde la perspectiva microestructural, física, mecánica y de resistencia, siempre que el procedimiento se controle correctamente. La evaluación de sus propiedades reveló que el hierro fundido es una opción técnicamente factible para la producción del impulsor, gracias a su adecuada resistencia al desgaste, colabilidad favorable, estabilidad estructural y viabilidad de producción a través del moldeo en arena.
- La realización del proceso de manufactura, fundición y maquinado posibilitó la verificación práctica de que era factible producir el impulsor cerrado para bomba centrífuga bajo las condiciones establecidas en la investigación. Los resultados obtenidos muestran que es posible lograr una pieza funcional con propiedades acordes a las exigencias del componente, gracias a la adecuada integración entre diseño, tecnología de mecanizado y de fundición. Esto contribuye al avance de una tecnología de fabricación que puede aplicarse en el sector industrial.
- La valoración económica demostró que la fabricación del impulsor bajo la tecnología propuesta es financieramente viable, con VAN = 1.687,90 USD, TIR = 39%, B/C = 2,36 y payback  $\approx$  1,69 años; además, se estableció que el punto de equilibrio se alcanza entre

el segundo y tercer impulsor, consolidando la conveniencia de implementación bajo control de calidad, con un presupuesto inicial de \$713.75

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Implementar un plan integral de control de calidad por etapas para el hierro fundido en todo el proceso de fundición en arena, considerando variables críticas como peso de la pieza, contracción del material, flotación y sobremedida del macho, área de soporte, composición de la mezcla, balance de carga del horno, separación de inclusiones, presión crítica de penetración y tiempo de enfriamiento, teniendo en cuenta los siguientes valores: G: 2.618(kg), E%: 0.89, P2: 1.909(kg), S2:  $7.3(\text{cm}^2) < 10(\text{cm}^2)$ , hdt: 748 (mm), M: 2.41, Qk: 3.54 Kg, sobremedida de maquinado:  $Y_1=303.5$  mm,  $Y_2=46.5$  mm,  $Y_3= 202.5$  mm,  $Y_4= 23.5$  mm,  $Y_5= 302.5$  mm, con el fin de reducir la variabilidad del proceso y minimizar defectologías.
- Para prevenir anomalías en la superficie, desviaciones en las dimensiones, rebabas y proyecciones de metal, es indispensable que se inspeccionen regularmente las condiciones del molde y del cierre del sistema. Esto incluye comprobar la granulometría de la arena usando el estándar AFS, además de revisar la permeabilidad, resistencia y cierre apropiado del molde, así como el criterio mínimo de peso o sujeción.
- Mantener un control estricto de la metalurgia y de la temperatura durante el enfriamiento y la solidificación, cumpliendo con el tiempo de enfriamiento de referencia ( $\approx 7700$  s  $\approx 2$  h 10 min) y modificándolo únicamente si hay cambios en las condiciones térmicas o geométricas, para impedir que se produzcan tensiones internas, grietas, desmoldeos anticipados y microestructuras irregulares que pongan en riesgo la fiabilidad del impulsor.

## 7.REFERENCIAS

- [1] S. de las Heras, *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas*. Barcelona: Iniciativa Digital Politècnica, 2011.
- [2] P. F. Díez, «Bombas centrifugas y volumetricas».
- [3] A. G. Bonilla Villalba y J. A. Núñez Villacrés, *Diseño y simulación de un impulsor centrífugo radial semi abierto para bombas de torbellino*. Ecuador. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/6766>
- [4] J. Carro Suárez, F. Flores Salazar, I. Flores Nava, y R. Hernández Hernández, «Industria 4.0 y Manufactura Digital: Un Método de Diseño Aplicando Ingeniería Inversa», *Ingeniería*, vol. 24, n.º 1, pp. 6-28, ene. 2019, doi: 10.14483/23448393.13821.
- [5] M. P. Groover, «Fundamentos de manufactura moderna», 2007.
- [6] Y. Ortiz Sánchez, L. A. Cañas Mendoza, y J. L. Marulanda Arevalo, *Introducción a los procesos de manufactura*. Universidad Tecnológica de Pereira, 2025. doi: 10.22517/9789587229905.
- [7] J. Bhatt, D. Vyas, A. Rajput, M. Somasundaram, y U. Narendra Kumar, «A systematic review on methods of optimizing riser and gating system based on energy Nexus approach», *Energy Nexus*, vol. 1, p. 100002, nov. 2021, doi: 10.1016/j.nexus.2021.100002.
- [8] K. Sangoi, M. Nadimi, J. Song, y Y. Fu, «Heat Treatment Effect on the Corrosion Resistance of 316L Stainless Steel Produced by Laser Powder Bed Fusion», *Metals*, vol. 15, n.º 1, p. 41, 2025, doi: 10.3390/met15010041.
- [9] K. G. Marcillo Parrales, E. A. Mero Lino, y M. M. Ortiz Hernández, «Impresión 3d como eje de desarrollo en la industria 4.0», *Ser. Científica Univ. Las Cienc. Informáticas*, vol. 14, n.º 4, pp. 151-160, abr. 2021.
- [10] V. Timoteo y H. Jim, «Diseño conceptual de una máquina remachadora de arandelas mediante el uso del software Autodesk Inventor para el sector metal mecánico del mercado de Lima», dic. 2023.
- [11] D. M. G. Armijos, «Análisis del estado de la producción de piezas metálicas fundidas mediante muestreo en las ciudades de Quito y Guayaquil al 2015.».
- [12] C. S. Calvo, «Hornos utilizados en la fabricación de aleaciones ferrosas y no ferrosas», *Scientia*, vol. 17, n.º 17, nov. 2016, doi: 10.31381/scientia.v17i17.388.
- [13] A. U. Patwari, S. A. Bhuiyan, K. Noman, y W. Ul Navid, «Defects and remedies in casting processes: a combinatorial approach between manual and digital optimization

- technique for enhanced quality casting», *Discov. Mech. Eng.*, vol. 3, n.º 1, p. 39, oct. 2024, doi: 10.1007/s44245-024-00067-2.
- [14] P. M. E. Lorena y V. G. A. Elizabeth, «Estudio de las propiedades de las arenas y su influencia en las piezas fundidas en ciertos talleres de fundición de la ciudad de Quito.».
- [15] C. Rudas, A. Alex, L. Rojas, y D. Jesús, «Análisis de los componentes de arena de moldeo empleados para un buen resultado de piezas fundidas de aluminio realizados en la empresa “fundición el Carmen” sac Lima-Peru.».
- [16] M. A. R. López, «Estudio teórico del diseño de los sistemas de colada y de alimentación de una barra de aluminio colada en un molde de arena y simulación numérica de la formación de defectos empleando el software ProCast.».
- [17] J. Andrés, «Propuesta de aplicación de la herramienta AMEF para la reducción de defectos de las piezas fundidas de una empresa metalúrgica en Perú.».
- [18] F. R. Guananga-Díaz, «Optimización de procesos de mecanizado mediante algoritmos avanzados en sistemas CAM: revisión sistemática.», vol. 9, n.º 8, 2024.
- [19] G. S. C. Rojas, «Diseño mecánico de la estructura de un torno CNC de uso didáctico.».
- [20] J. S. Anagnostopoulos, «CFD Analysis and Design Effects in a Radial Pump Impeller.».
- [21] W. Zhou, Z. Zhao, T. S. Lee, y S. H. Winoto, «Investigation of Flow Through Centrifugal Pump Impellers Using Computational Fluid Dynamics.».
- [22] S. D. P. Burgos, «Simulación mediante dinámica de fluidos computacional (CFD) del efluente en el clarificador secundario de la PTAR UDLAPARK.», 2020.
- [23] F. M. R. Sánchez, «Análisis metalográfico de fundiciones de hierro usando técnicas de procesamiento digital de imágenes y visión artificial.».
- [24] L. Guamán y J. Miguel, «Análisis metalográfico de aceros comerciales para herramientas en la ciudad de Cuenca - Ecuador.».
- [25] E. Vargas-Seminario, «Influencia de la materia prima en las características de las fundiciones grises del norte de Perú.».
- [26] Crithian I. Riaño Jaimes y Alberto J. Alvares, *Integrated inspection system step-compliant for the exchange of dimensional metrology data*. 2019. doi: 38:1205–1212.
- [27] Rubén Tirado, «Proceso de fundición», Ambato, 26 de febrero de 2026. Consultado: 26 de febrero de 2026. [Digital]. Disponible en: [https://drive.google.com/file/d/14izkX0mHamKwwbZlcv88cj\\_2KNzJtQbf/view?usp=sharing](https://drive.google.com/file/d/14izkX0mHamKwwbZlcv88cj_2KNzJtQbf/view?usp=sharing)

[28] Hernán Patricio Carrera Cedeño y Andrés Francisco Andrade Cevallos,  
«UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR».