



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE APLICACIÓN DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D EN EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN RODETE DE IMPULSIÓN DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA

Autor: Alejandro de Blas Sanz

Directores: Mariano Jiménez Calzado y

Eva María Arenas Pinilla

Madrid

Julio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Estudio de aplicación de diferentes tecnologías de Impresión 3D en el diseño y fabricación
de un rodete de impulsión de una bomba centrífuga
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Alejandro de Blas Sanz

Fecha: 22/07/ 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha://

Fdo.: Eva María Arenas Pinilla



Firmado
digitalmente por
52534434L EVA
MARIA ARENAS
Fecha: 2025.07.24
21:10:28 +02'00'



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO DE APLICACIÓN DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D EN EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN RODETE DE IMPULSIÓN DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA

Autor: Alejandro de Blas Sanz

Directores: Mariano Jiménez Calzado y

Eva María Arenas Pinilla

Madrid

ESTUDIO DE APLICACIÓN DE DIFERENTES TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D EN EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN RODETE DE IMPULSIÓN DE UNA BOMBA CENTRÍFUGA

Autor: de Blas Sanz, Alejandro.

Directores: Mariano Jiménez Calzado y

Eva María Arenas Pinilla

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En este Trabajo Fin de Grado se ha diseñado, rediseñado e impreso un rodete de bomba centrífuga mediante diferentes tecnologías de fabricación aditiva. Se ha aplicado ingeniería inversa a un rodete físico para obtener su geometría digital y adaptarla a impresión 3D. El estudio compara tecnologías como SLA, FDM, MJF y CFR, analizando resultados técnicos y económicos.

Palabras clave: Rodete, Bomba centrífuga, Fabricación aditiva, Ingeniería inversa

1. Introducción

El avance de la fabricación aditiva ha permitido aplicar nuevas soluciones de diseño en componentes hidráulicos que tradicionalmente se fabricaban por métodos sustractivos o fundición. Entre estos componentes, el rodete de una bomba centrífuga destaca por su complejidad geométrica y su impacto directo en la eficiencia energética del sistema.

Este proyecto se enmarca en el contexto de modernización de procesos de prototipado y reparación de maquinaria hidráulica, explorando el potencial de las tecnologías 3D en entornos industriales y docentes.

2. Definición del proyecto

El objetivo principal del proyecto es diseñar e imprimir un rodete funcional de bomba centrífuga aplicando diferentes tecnologías de impresión 3D, evaluando tanto la calidad técnica como la viabilidad económica. Para ello, se escanea un rodete existente mediante un sistema de digitalización 3D con VXEelements, y se reconstruye su geometría con herramientas CAD (Solid Edge).

A continuación, se adapta el diseño para impresión, considerando las restricciones geométricas y materiales propios de cada tecnología: SLA (resina fotopolimerizable), FDM (filamento termoplástico), MJF (polvo fusionado con agente de fusión) y CFR (refuerzo continuo de fibra). Finalmente, se imprimen los prototipos y se analizan en laboratorio su acabado, precisión dimensional y posibles defectos.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

El modelo estudiado es un rodete centrífugo de impulsión hidráulica, empleado habitualmente en sistemas de bombeo industrial. La fabricación y la investigación de un rodete se ha llevado a cabo por su compleja geometría y las dificultades encontradas en su producción [1]. En consecuencia, se emplea un escáner láser portátil HandySCAN 3D SILVER Series (Creaform), que proporciona nubes de puntos de alta precisión para su posterior tratamiento.



Figura 1 Rodete a estudiar

Las herramientas software principales utilizadas son VXelements para la digitalización y postprocesado inicial, y Solid Edge para la reconstrucción paramétrica y adaptación CAD del rodete escaneado. Estos softwares permiten un procedimiento más sencillo para obtener el formato de archivo .stl y exportar directamente el modelo de malla desde el software integrado [2].

Para la fabricación aditiva se emplean diferentes tecnologías:

- SLA: Utiliza resina fotopolimerizable, proporcionando alta precisión y detalle superficial.
- FDM: Emplea filamento termoplástico fundido, adecuado para prototipos funcionales.
- MJF: Basada en la fusión de polvo polimérico mediante agentes específicos, produce piezas robustas.
- CFR: Reforzamiento de piezas FDM con fibra continua para aplicaciones estructurales.

Se emplean softwares específicos de laminado: PreForm (SLA), Ultimaker Cura (FDM, CFR) y HP SmartStream 3D Build Manager (MJF). Finalmente, los rodetes impresos se someten a pruebas de rendimiento y precisión dimensional en un laboratorio de fluidos.

4. Resultados

El análisis experimental muestra diferencias significativas entre tecnologías en precisión dimensional, resistencia estructural y eficiencia hidráulica. Los resultados indican que el material ABS (FDM) posee el mejor rendimiento total y, por el contrario, el material RIGID (SLA) consigue una altura mayor.

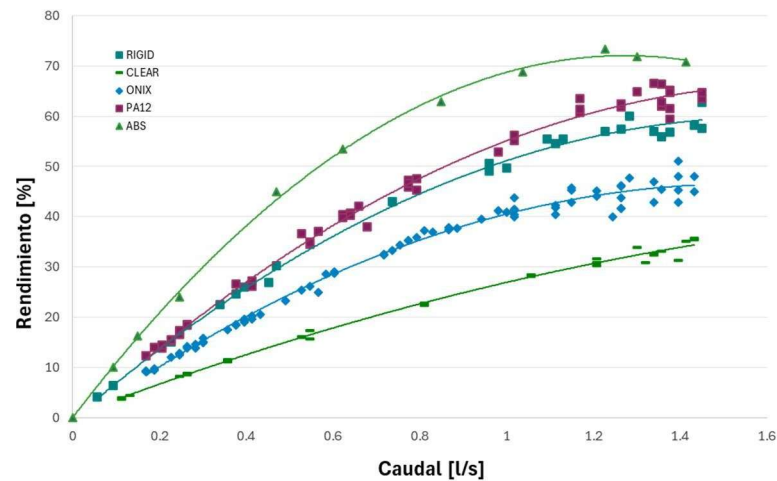


Figura 2 Rendimiento total - Caudal

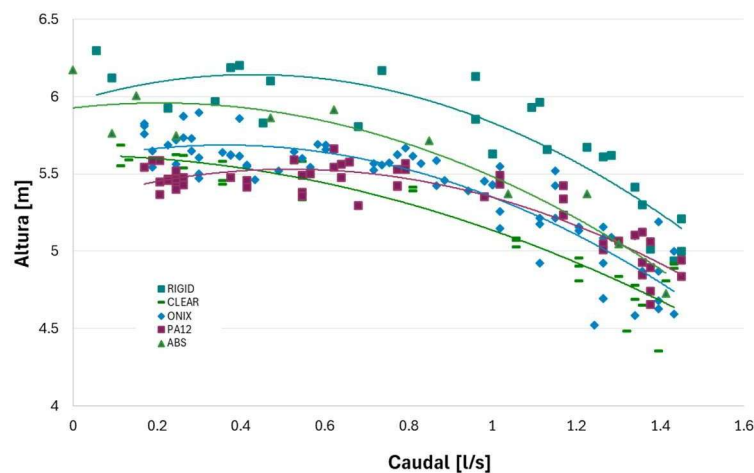


Figura 3 Curva Altura – Caudal

5. Conclusiones

El proyecto confirma la viabilidad técnica y económica de todos los procesos de la fabricación aditiva para producir rodets centrífugos funcionales. Se demuestra un proceso claro y conciso sobre los aspectos más útiles en una aplicación donde se requieren geometrías complejas y tiempos de producción reducidos.

6. Referencias

- [1] O. Babayiğit, S. Sefaci, and M. Şahbaz, “Usage of 3D printing technology in centrifugal pumps and material selection,” *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 238, no. 3, pp. 837–848, May 2023, doi: 10.1177/09544062231175789.
- [2] V. Szalai, A. Stratan, A. Ciutina, A. D. Clepe, and A. Ene, “Procedure for Generation of Finite Element Models of Steel Members from 3D Scanned Data,” in *Lecture notes in civil engineering*, 2024, pp. 154–164. doi: 10.1007/978-3-031-57800-7_14.

STUDY OF THE APPLICATION OF DIFFERENT 3D PRINTING TECHNOLOGIES IN THE DESIGN AND MANUFACTURE OF A CENTRIFUGAL PUMP IMPELLER

Author: de Blas Sanz, Alejandro.

Directors: Mariano Jiménez Calzado and

Eva María Arenas Pinilla

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

In this Final Degree Project, a centrifugal pump impeller has been designed, redesigned and printed using different additive manufacturing technologies. A physical impeller has been reverse-engineered to obtain its digital geometry and adapt it to 3D printing. The study compares technologies such as SLA, FDM, MJF and CFR, analyzing technical and economic results.

Keywords: Impeller, Centrifugal pump, Additive manufacturing, Reverse engineering

1. Introduction

The advancement of additive manufacturing has made it possible to apply new design solutions to hydraulic components that were traditionally manufactured by subtractive methods or casting. Among these components, the impeller of a centrifugal pump stands out for its geometric complexity and its direct impact on the energy efficiency of the system.

This project is framed in the context of modernization of prototyping and repair processes of hydraulic machinery, exploring the potential of 3D technologies in industrial and educational environments.

2. Project definition

The main objective of the project is to design and print a functional centrifugal pump impeller by applying different 3D printing technologies, evaluating both technical quality and economic feasibility. To do this, an existing impeller is scanned using a 3D digitization system with VXEelements, and its geometry is reconstructed with CAD (Solid Edge) tools.

Next, the design is adapted for printing, considering the geometric and material constraints of each technology: SLA (photopolymerizable resin), FDM (thermoplastic filament), MJF (powder fused with fusion agent) and CFR (continuous fiber reinforcement). Finally, the prototypes are printed, and their finish, dimensional accuracy and possible defects are analyzed in the laboratory.

3. Manufacturing processes

The model studied is a centrifugal impeller with hydraulic drive, commonly used in industrial pumping systems. The manufacture and research of a impeller has been carried out due to its complex geometry and the difficulties encountered in its production [1]. Consequently, a HandySCAN 3D SILVER Series (Creaform) handheld laser scanner is employed, which provides high-precision point clouds for further processing.



Figura 4 Impeller studied

The main software tools used are VXelements for initial scanning and post-processing, and Solid Edge for parametric reconstruction and CAD adaptation of the scanned impeller. These softwares allow a simpler procedure to obtain the .stl file format and directly export the mesh model from the integrated software [2].

Different technologies are used for additive manufacturing:

- SLA: Uses light-curing resin, providing high precision and surface detail.
- FDM: Employs fused thermoplastic filament, suitable for functional prototypes.
- MJF: Based on the fusion of polymer powder using specific agents, it produces robust parts.
- CFR: FDM Part Reinforcement with Continuous Fiber for Structural Applications.

Specific laminating software is used: PreForm (SLA), Ultimaker Cura (FDM, CFR) and HP SmartStream 3D Build Manager (MJF). Finally, the printed impellers are tested for performance and dimensional accuracy in the Fluids Laboratory.

4. Results

The experimental analysis shows significant differences between technologies in dimensional accuracy, structural strength and hydraulic efficiency. The results indicate that ABS (FDM) material has the best overall performance and, on the contrary, RIGID (SLA) material achieves a higher height.

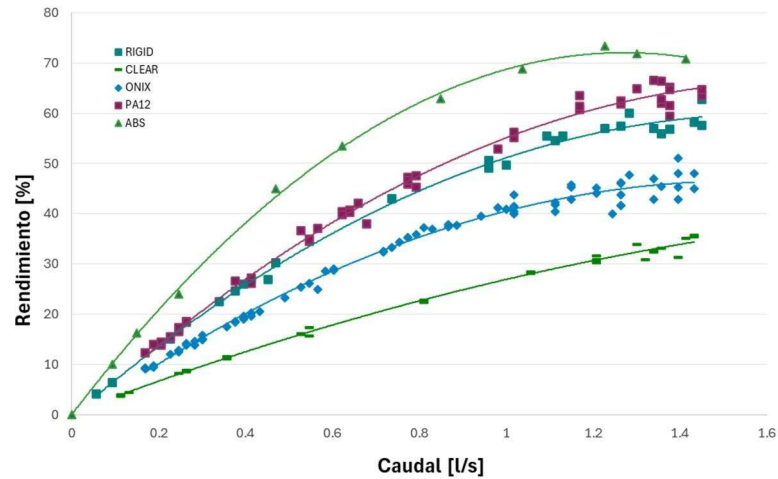


Figura 5 Total efficiency Curve

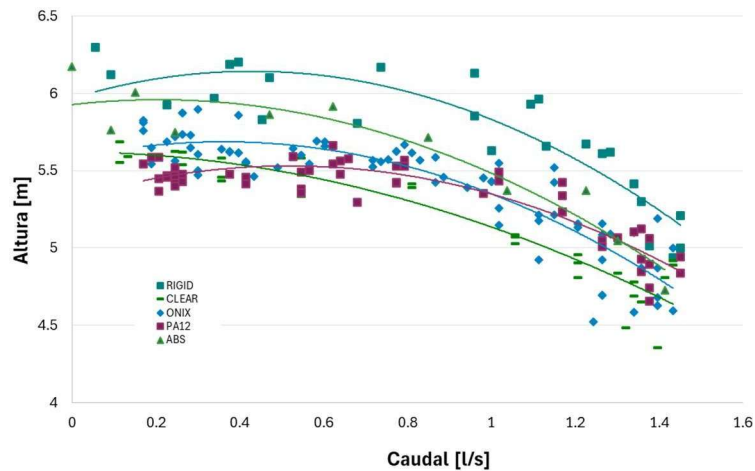


Figure 6 Head – Flow rate Curve

5. Conclusions

The project confirms the technical and economic feasibility of all additive manufacturing processes to produce functional centrifugal impellers. A clear and concise process is demonstrated on the most useful aspects in an application where complex geometries and reduced production times are required.

6. References

- [1] O. Babayiğit, S. Sefaci, and M. Şahbaz, "Usage of 3D printing technology in centrifugal pumps and material selection," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part C Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 238, no. 3, pp. 837–848, May 2023, doi: 10.1177/09544062231175789.

- [2] V. Szalai, A. Stratan, A. Ciutina, A. D. Clepe, and A. Ene, "Procedure for Generation of Finite Element Models of Steel Members from 3D Scanned Data," in Lecture notes in civil engineering, 2024, pp. 154–164. doi: 10.1007/978-3-031-57800-7_14.

ÍNDICE DE LA MEMORIA

<i>Índice de la memoria</i>	<i>I</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>IV</i>
<i>Capítulo 1. Introducción</i>	<i>7</i>
1.1 Motivación	7
<i>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías</i>	<i>9</i>
2.1 Ingeniería inversa	9
2.1.1 Escaneado 3D	9
2.1.2 Software ingeniería inversa	9
2.2 Impresión 3D	10
2.2.1 Tecnologías de impresión	10
2.2.2 Software de laminado 3D	11
<i>Capítulo 3. Estado de la Cuestión</i>	<i>12</i>
<i>Capítulo 4. Definición del Trabajo</i>	<i>13</i>
4.1 Justificación	13
4.2 Objetivos	15
4.3 Metodología	16
<i>Capítulo 5. Modelo digital</i>	<i>17</i>
5.1 Análisis del Rodete	17
5.2 Ingeniería inversa	21
5.2.1 Escaneado general	24
5.2.2 Mejora previa a impresión	25
5.2.3 Tipos de formato de archivo	26
5.3 Impresión 3D	27
5.3.1 SLA	28
5.3.2 MJF	30
5.3.3 FDM	31

5.3.4 CFR.....	32
Capítulo 6. Ensayos	34
6.1 Rugosidad	34
6.2 Bomba centrífuga.....	36
Capítulo 7. Análisis de Resultados	39
7.1 Rendimiento volumétrico.....	41
7.2 Rendimiento hidráulico.....	41
7.3 Rendimiento mecánico	45
Capítulo 8. Análisis de costes	48
8.1 Costes de materiales.....	49
8.2 Coste de maquinaria y herramientas	50
8.3 Coste de mano de obra.....	52
8.4 Coste total	53
Capítulo 9. Conclusiones y Trabajos Futuros	54
Capítulo 10. Bibliografía	56
ANEXO I: CIRCUITO HIDRÁULICO	58
1. Equipo.....	58
2. Placa base	59
3. Depósito.....	59
4. Bombas	60
5. Rodetes	60
6. Válvula de entrada	61
7. Válvula de compuerta	61
8. Válvulas de salida de la bomba.....	62
9. Válvula “3-Way“	62
10. Sensor de caudal	63
11. Sensores de presión.....	63
12. Válvula de drenaje	63
13. Válvulas de drenaje.....	63
14. Sensor de temperatura.....	63

15. Motor	64
<i>ANEXO II: LABORATORIO DE FABRICACIÓN</i>	<i>65</i>
1. HandySCAN SILVER	65
2. Impresoras.....	66
3. Materiales	67
3.1. ABS	67
3.2. Clear V4.1	67
3.3. Onyx.....	68
3.4. PU Rigid 10K.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Rodete a estudiar	8
Figura 2 Rendimiento total - Caudal.....	9
Figura 3 Curva Altura – Caudal.....	9
Figura 4 Impeller studied	13
Figura 5 Total efficiency Curve.....	14
Figure 6 Head – Flow rate Curve	14
Figura 7 Rodete original con Instrumenteo de medición.....	17
Figura 8 Parámetros geométricos en la entrada del rodete	18
Figura 9 Parámetros geométricos en la salida del rodete.....	19
Figura 10 Triángulo de velocidades a la salida del rodete [6]	21
Figura 11 HandySCAN 3D Serie SILVER.....	22
Figura 12 Placa base rotatoria.....	22
Figura 13 Poliedro de calibración	23
Figura 14 Rodete listo para ser escaneado.....	23
Figura 15 Parámetros de calidad en VXelements	24
Figura 16 Rodete con la combinación de escaneados.....	25
Figura 17 Rodete previo a la mejora.....	25
Figura 18 Rodete terminado.....	26
Figura 19 Clasificación de tecnologías[7]	28
Figura 20 Descripción impresión 3D.....	28
Figura 21 Preform	29
Figura 22 Form 3l	30
Figura 23 HP Jet Fusion 580 C [8]	31
Figura 24 Adventurer 5M Pro [9].....	32
Figura 25 Markforged X7 [10]	33
Figura 26: SURFCOM 1500SD2.....	34
Figura 27: Curva de aspereza en la pared del rodete fabricado con PA12	35

Figura 28 Esquematización del circuito hidráulico	36
Figura 29: Banco de ensayos	37
Figura 30: Representación de los puntos de la línea de tendencia.....	39
Figura 31: Curvas Rendimientos totales	40
Figura 32 Curvas Altura - Caudal	42
Figura 33 E. 1 desarrollada	43
Figura 34 Altura periférica - Caudal	43
Figura 35: Resultado del Rendimiento Hidráulico	44
Figura 36: Rendimiento mecánico	46
Figura 37 Circuito completo	58
Figura 38 Placa base	59
Figura 39 Válvula de compuerta.....	62
Figura 40 Placa de Características del Motor	64

Índice de tablas

Tabla 1 Parámetros geométricos del rodete en mm.....	19
Tabla 2 Parámetros de entrada y salida del rodete en grados	19
Tabla 3 Rugosidad pico-a-valle	35
Tabla 4 Precio y Volumen de cada lote pedido	49
Tabla 5 Coste de materiales	50
Tabla 6 Coste de Maquinaria y Herramientas.....	50
Tabla 7 Amortización General.....	51
Tabla 8 Coste Mano de Obra	52
Tabla 9 Coste total.....	53
Tabla 10 Tabla de Características resumida	64
Tabla 11 Impresoras 3D.....	66
Tabla 12 Datasheet experimental ABS [22]	67
Tabla 13 Datasheet Clear V4.1 en Formlabs [23].....	67
Tabla 14 Datasheet Onyx en Markforged [24]	68
Tabla 15 Datasheet PU Rigid 10K en Formlabs [25]	68

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Este estudio se enmarca en el Área de Fabricación y Diseño del departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI). Surge dentro de la creciente necesidad de digitalizar componentes industriales en entornos donde no siempre se dispone de archivos CAD de piezas existentes.

En el contexto que engloba este proyecto, la ingeniería inversa y la fabricación aditiva están estrechamente relacionadas para lograr los objetivos propuestos. Además de escanear y digitalizar la pieza en diversos formatos, se estudian métodos diferentes de impresión para extraer un amplio abanico de conclusiones.

1.1 MOTIVACIÓN

En muchos entornos industriales, a partir de cierta escala de producción, la falta de documentación técnica sobre piezas —especialmente en plantas con gran volumen de entradas, proveedores deslocalizados o procesos particulares— impide la fabricación o reparación ágil y condiciona directamente las decisiones técnicas dentro de la fábrica.

Paralelamente, las tecnologías de fabricación aditiva han evolucionado para ofrecer soluciones viables y flexibles en la reposición de piezas, incluso en entornos exigentes. La posibilidad de escanear un componente real, reconstruirlo digitalmente y fabricarlo en horas ha abierto una vía totalmente nueva en mantenimiento, reparación y prototipado.

Este proyecto nace de la necesidad de combinar la demanda industrial con el avance tecnológico. Aplica ingeniería inversa a un rodete de bomba centrífuga real y lo reproduce mediante impresión 3D en diferentes tecnologías, evaluando sus resultados en laboratorio. Así, responde a una problemática técnica con herramientas físicas y digitales, explorando su aplicación en entornos productivos donde la eficiencia y la reducción de tiempos son claves.

Además, constituye un informe sobre cómo orientar la fabricación hacia disciplinas como el área de fluidos, donde se prueban parámetros físicos y resistencia estructural, fundamentales para un análisis ingenieril.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

2.1 INGENIERÍA INVERSA

Es el proceso de producir detalles de diseño en forma de modelo CAD a partir de la parte física en el proceso de diseño del producto[1]. Dentro de la Ingeniería inversa se pueden incluir el Escaneado, en este caso Escaneado 3D, y la utilización de software especializado.

2.1.1 ESCANEADO 3D

Se emplea el HandySCAN 3D SILVER Series (Creaform), es un escáner láser portátil basado en triangulación con precisión nominal de hasta 0,030 mm y volumétrica de 0,020 mm + 0,060 mm/m. Genera nubes de puntos o mallas STL exportables para CAD [2].

2.1.2 SOFTWARE INGENIERÍA INVERSA

2.1.2.1 VXELEMENTS

Es una plataforma integrada de captura y post-procesado para todos los escáneres Creaform. Incluye alineación, limpieza de malla e inspección dimensional. A partir de este programa se pueden obtener, entre otros, los siguientes tipos de archivo:

- .csf: Proyecto nativo con nubes de puntos crudas del HandySCAN
- .stl: Malla poligonal limpia exportada para CAD o control dimensional

2.1.2.2 Solid Edge

Es un software CAD 3D paramétrico/síncrono para modelado, planos y análisis básico; importa STL para reconstrucción de superficies. A partir de este programa se pueden obtener, entre otros, los siguientes tipos de archivo:

- .par: Fichero nativo con el histórico paramétrico del modelo sólido
- .3mf: Modelo empaquetado (geometría + materiales) listo para impresión o intercambio.
- .obj: Malla triangulada y su biblioteca de materiales para visualizadores 3D.
- .gcode: lenguaje de programación que controla máquinas CNC mediante instrucciones precisas para mover ejes, ajustar velocidad y activar funciones.

2.2 IMPRESIÓN 3D

La tecnología de fabricación digital, también conocida como impresión 3D o fabricación aditiva, crea objetos físicos a partir de una representación geométrica mediante la adición sucesiva de materiales[3]. Se desarrolla a partir de archivos donde se puede encontrar información sobre geometría, colores, texturas y metadatos, entre otros.

2.2.1 TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN

Se han utilizado un total de cuatro tecnologías para el desarrollo de este proyecto. Cada una de ellas posee cualidades y materiales diferentes. Estas tecnologías se clasifican como:

- FDM: calienta un filamento termoplástico y lo extruye por una boquilla, trazando cada capa según .g-code hasta formar la pieza. Incluye el material ABS y se ha realizado en la impresora Adventurer 5M Pro.
- SLA: Fotopolimeriza resina líquida con un láser/LED UV, solidificando cada capa con alta resolución. Incluye los materiales PU Rigid 10k Resin y Clear Resin V4.1 y se ha realizado en la impresora Form 3l.
- CFR: Incorpora fibras continuas de carbono/vidrio dentro del filamento mientras se imprime. Incluye el material Onyx y se realiza en la impresora MARKFORGED X7.
- MJF: Deposita agentes de fusión y detalle sobre lecho de polvo polimérico y sinteriza por calor infrarrojo. Incluye el material PA12 y se ha realizado en la impresora HP 580 C.

2.2.2 SOFTWARE DE LAMINADO 3D

- PreForm: Software gratuito de preparación de trabajo para impresoras SLA/SLS Formlabs; importa STL/3MF, orienta piezas y genera soportes automáticamente.
- UltiMaker Cura: Convierte STL/OBJ/3MF en G-code, permite soportes personalizables, vista capa a capa y plugins de posprocesado.
- HP SmartStream 3D Build Manager: Aplicación oficial para Jet Fusion; carga piezas, las repara, anida y orienta optimizando el volumen de construcción.

Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Este proyecto trata de un estudio y caracterización de un rodete ante unas condiciones determinadas. El proyecto incluye desde un escaneado 3D hasta su ensayo en el banco de pruebas, pasando por su fabricación en el laboratorio de fabricación aditiva.

El hecho de formar parte de un conjunto de operaciones aporta una información holística sobre toda la cadena de procesos que se incluiría en una fábrica de rodets si se decidiese remodelar su producto.

Se ha utilizado un criterio que incluya la utilización del mayor número de impresoras posibles (4) con materiales heterogéneos. Estos materiales poseen cualidades únicas y no es común encontrar estudios que relacionen el comportamiento de todos estos materiales a ensayos hidráulicos.

Actualmente, existen investigaciones centradas en el rendimiento hidráulico de rodets fabricados con tecnologías aditivas, pero la mayoría de ellas utilizan materiales optimizados para el resultado, como PA12 o resinas específicas, y se enfocan únicamente en una tecnología o tipo de ensayo.

También es frecuente encontrar trabajos que estudian la influencia de la rugosidad o la desviación dimensional en geometrías sencillas o estáticas, pero no aplicadas a componentes en rotación y sometidos a flujo real.

Por tanto, este trabajo busca cubrir un hueco real: evaluar, bajo una misma metodología experimental, cómo se comportan distintos materiales plásticos impresos en 3D ante condiciones hidráulicas reales, con especial atención a los efectos derivados de la calidad de impresión o la rugosidad superficial.

Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

4.1 JUSTIFICACIÓN

En las grandes fábricas actuales concurren cada día una cantidad de piezas muchas veces indefinida. Estas piezas provienen de fábricas cuyo origen muchas veces es lejano y sus operarios son desconocidos. Por ello, ante un volumen grande de diversidad de piezas es fácil no tener a rápida disposición los archivos digitales (.par, .stl o .3mf) originales para una fabricación urgente en caso de necesidad. Ante esta problemática, en este proyecto se desarrolla una solución técnica incluyendo ingeniería inversa, fabricación aditiva y validación experimental.

La ingeniería inversa, llevada a cabo mediante un escáner portátil (HandySCAN 3D SILVER Series), permite obtener rápidamente modelos digitales precisos a partir de piezas existentes sin documentación. A través de software especializado, es posible tratar la nube de puntos resultante del escaneado y obtener un modelo CAD fiel a la realidad, a nivel de escala y precisión. Con unos simples pasos, y con ayuda de personal cualificado, este paso permite acelerar significativamente la obtención de archivos digitales para una posterior producción inmediata.

Tras obtener el modelo digital, este proyecto en concreto explora múltiples tecnologías de impresión 3D (FDM, SLA, CFR, MJF) para identificar las ventajas o desventajas de cada material en cuanto a resistencia mecánica, precisión dimensional, tiempos de fabricación y costes operativos. Existen numerosas aplicaciones en cada tecnología, dependiendo del uso posterior que se le dé a la pieza, esta puede ser un prototipo funcional o una pieza final. Las características operativas de la pieza en concreto definirán la tecnología empleada.

Finalmente, este proyecto incluye la realización de ensayos experimentales en el Laboratorio de Fluidos para validar las prestaciones de las piezas anteriormente fabricadas mediante impresión 3D. Esta fase incluye datos empíricos y evidencias técnicas para respaldar el análisis teórico de cada material empleado, información vital para la toma de decisiones a nivel industrial.

En resumen, la solución propuesta permite reducir considerablemente los tiempos de reposición de piezas, optimizar costes de producción y garantizar la continuidad operativa en entornos industriales exigentes, aportando flexibilidad y fiabilidad al proceso productivo.

4.2 OBJETIVOS

El propósito principal del proyecto es fabricar un rodete de bomba centrífuga partiendo de una pieza sin registro en archivo CAD, evaluando cada una de las diferentes tecnologías de fabricación aditiva para su reproducción.

Los objetivos específicos derivados son:

- Análisis geométrico del rodete: Estudiar la forma y diseño de un prototipo funcional de un rodete para optimizar la fabricación mediante impresión 3D
- Fabricación mediante tecnologías de impresión 3D: Evaluar la viabilidad de las tecnologías FDM, SLA, CFR y SLS para producir el rodete en diferentes materiales poliméricos, asegurando propiedades adecuadas para su funcionalidad.
- Comparación de tecnologías: Analizar y comparar las características obtenidas en los rodetes fabricados con cada tecnología, considerando aspectos como rugosidad superficial o resistencia mecánica.
- Validación experimental: Realizar ensayos en banco para obtener las curvas características de los rodetes fabricados, contrastando sus resultados.

Estos objetivos buscan no solo demostrar la capacidad de las tecnologías de fabricación aditiva para producir componentes funcionales, sino también establecer una metodología aplicable a futuros desarrollos en el ámbito de la ingeniería hidráulica y fabricación aditiva.

4.3 METODOLOGÍA

El proyecto incluye tres procesos principales dentro de la fabricación: escaneado 3D de alta precisión; reconstrucción mediante software CAD y fabricación utilizando cuatro tecnologías diferentes de impresión 3D: FDM, SLA, CFR y MJF.

Junto a la viabilidad técnica del proceso completo de fabricación, se evaluará además la calidad geométrica, la funcionalidad de los prototipos fabricados y la influencia de la tecnología empleada según un criterio común.

Este criterio final consiste en analizar los rendimientos de cada prototipo en el Laboratorio de Fluidos de ICAI. Cada uno de los rendimientos (ya sea mecánico, hidráulico o volumétrico) será evaluado separadamente y mostrará una imagen completa del comportamiento de cada material y tecnología empleada.

Capítulo 5. MODELO DIGITAL

En este capítulo se trata todo el proceso de obtención del Modelo digital del Rodete estudiado. Para ello, se partirá de un análisis de metrología, pasando por la ingeniería inversa y por último por la mejora de la nube de punto.

5.1 ANÁLISIS DEL RODETE

Partiendo de un rodete ubicado en la bancada Serie-Paralelo descrita posteriormente en el Capítulo 6.2, se ha procedido a escanearlo mediante ingeniería inversa para posteriormente tratarlo con Solid Edge. Se han necesitado además mediciones reales mediante un calibre (ver Figura 7) para constatar las medidas obtenidas mediante la nube de puntos.

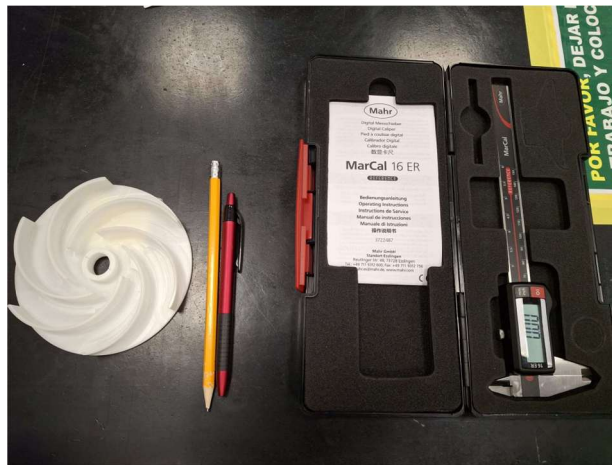


Figura 7 Rodete original con Instrumento de medición

El rodete se compone de 6 álabes ($z = 6$) y está basado en un rodete de nylon. Este rodete original tiene la utilidad para realizar la ingeniería inversa y de realizar mediciones puntuales (ver Figura 7). Sin embargo, se ha concluido en este estudio que no es útil desde el punto de

vista de ensayos, pues este es categóricamente diferente a los demás al estar mecanizado y no haberse realizado en impresión 3D.

Para componer los parámetros geométricos que caracterizan el rodete se han trazado cotas sobre el archivo .par obteniéndose capturas de ello en las Figura 8 y Figura 9, se han dispuesto los valores en la Tabla 1 Parámetros geométricos del rodete en mm

y Tabla 2 Parámetros de entrada y salida del rodete en grados

. Estos parámetros son el diámetro (d_i), ancho del álabe (b_i) y el ángulo físico del álabe (β_i).

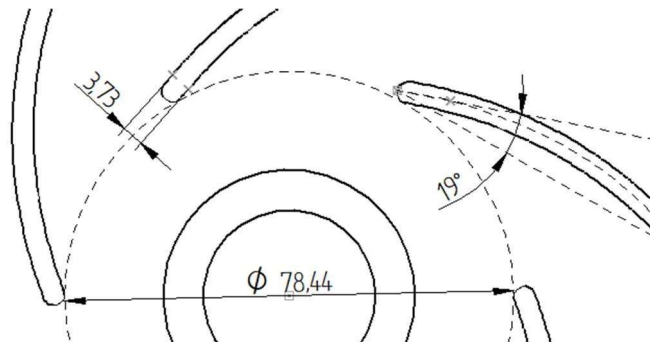


Figura 8 Parámetros geométricos en la entrada del rodete

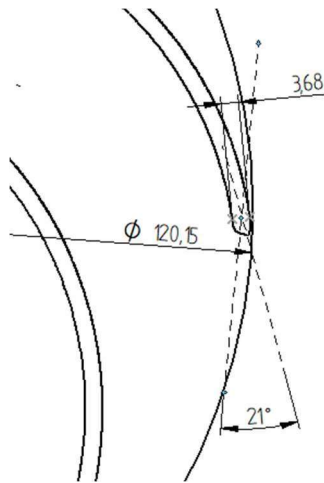


Figura 9 Parámetros geométricos en la salida del rodete

Parámetros	Entrada	Salida
Diámetro (d_i)	78,44	120,15
Ancho (b_i)	3,73	3,68

Tabla 1 Parámetros geométricos del rodete en mm

Parámetros	Entrada	Salida
Ángulo físico (β_i)	19°	21°

Tabla 2 Parámetros de entrada y salida del rodete en grados

Estos parámetros medidos sirven para el cálculo de más parámetros geométricos adicionales, además de componentes de velocidades del fluido. A partir de estos se obtienen los valores

de Altura periférica (H_u), analizada en el Capítulo 7.2, donde esta se comparará con la altura manométrica para obtener el rendimiento hidráulico.

E. 1 Altura periférica

$$H_u = e_z \cdot \frac{u_2 c_{2u} - u_1 c_{1u}}{g}$$

El triángulo de velocidades de una bomba centrífuga representa una imagen de los vectores de velocidades en dos dimensiones. A partir de los valores de las cotas anteriores y de las fórmulas E. 2, E. 3, se pueden obtener más parámetros geométricos en la entrada y salida del rodete. El coeficiente de obstrucción, mostrado en E. 3, es un factor adimensional que corrige el área útil de paso entre álabes de una turbomáquina, debido al espesor real de los álabes.

E. 2 Paso circunferencial

$$t_i = \pi \frac{d_i}{z}$$

E. 3 Coeficiente de obstrucción

$$\tau_i = 1 - \frac{b_i}{t_i \sin(\beta_i)}$$

Tras la obtención de estos parámetros se comienza a resolver el triángulo de velocidades como se muestra en las flechas negras de Figura 10 y son equivalentes en la entrada y salida del rodete.

E. 4 Velocidad tangencial

$$u_i = \frac{\pi d_i n}{60}$$

E. 5 Componente meridiana de la
velocidad absoluta

$$c_{im} = \frac{Q_{rod}}{\pi b_i \tau_i d_i}$$

E. 6 Componente periférica de la
velocidad absoluta

$$c_{iu} = u_i - \frac{c_{im}}{\tan(\beta_i)}$$

Se puede diferenciar el triángulo de velocidades en la entrada y en la salida, pues en la salida presenta una corrección denominada coeficiente de disminución de trabajo e_z , y viene representado en las flechas rojas de la Figura 10. Esta provoca que la orientación y el módulo de los vectores que determinan el campo fluido a la salida del rotor se alteren, y por ende, el par neto ejercido y la potencia comunicada al fluido[4]. Un rango de valores de este coeficiente son $e_z = 0.8 \text{ } 0.95$ [5].

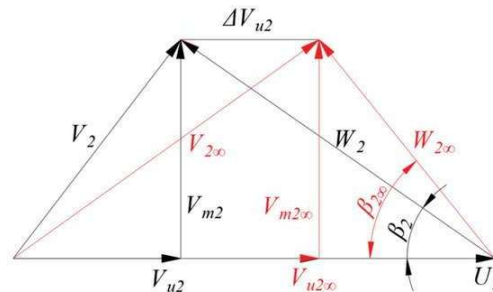


Figura 10 Triángulo de velocidades a la salida del rodete [6]

5.2 INGENIERÍA INVERSA

Tras extraer el rodete de su posición en la instalación, se ha trasladado al Laboratorio de Fabricación donde se ha procedido a su escaneo y medición.

- El escaneado del rodete original se ha realizado mediante HandySCAN 3D Serie SILVER (ver Anexo II.1). Esta herramienta permite escanear todo tipo de geometrías incluyendo superficies planas, orificios, desniveles y paredes, entre otros.



Figura 11 HandySCAN 3D Serie SILVER

- Placa base rotatoria: Mediante un giro constante, permite al operario escanear la pieza sin necesidad de moverse.



Figura 12 Placa base rotatoria

- Poliedro de calibración: Se sitúa sobre la placa base rotatoria (en reposo) para realizar la calibración del Escáner.
- Marcadores de referencia: Son pegatinas blancas con borde negro. Ayudan al Escáner a calibrar y guardar puntos de referencia.



Figura 13 Poliedro de calibración

Finalmente, se procede a colocar el rodete sobre la mesa mediante plastilina. Cada escaneo requiere una única orientación, por lo que, para tener una visión completa del rodete, se requieren dos. La plastilina permite colocar el rodete en la posición deseada sin dificultades.



Figura 14 Rodete listo para ser escaneado

Tras el escaneado se procede a trabajar con la nube de puntos en formato digital. Estas nubes se componen de múltiples escaneados en distintas orientaciones, por lo que se utiliza el software *VXelements* para unificarlas y definir superficies. Posteriormente, el modelo se traslada a *Solid Edge* para ajustes finales.

5.2.1 ESCANEADO GENERAL

El escaneado produce una nube de puntos en formato *.csf*. Este formato no es editable directamente hasta que se unifica en una superficie. El software *VXelements* permite ajustar parámetros de calidad previos al escaneado (ver Figura 15).

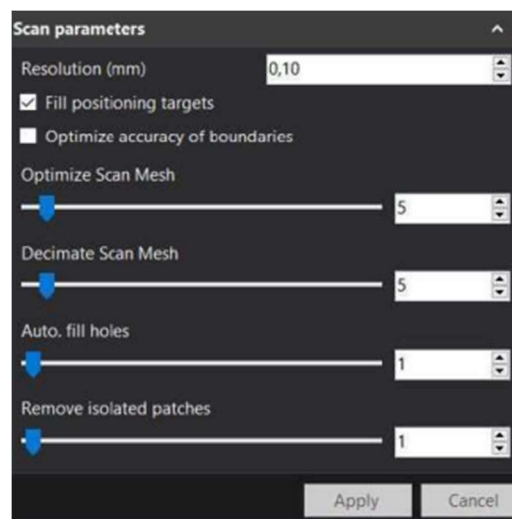


Figura 15 Parámetros de calidad en *VXelements*

Con el objetivo de llegar a todos los puntos del rodete, este se orienta, en cada escaneado, de una manera diferente. Una vez conforme con la nube de puntos entre todos los escaneados, estos se procesan en *VXelements* combinándolos para llegar a un rodete como en Figura 16.

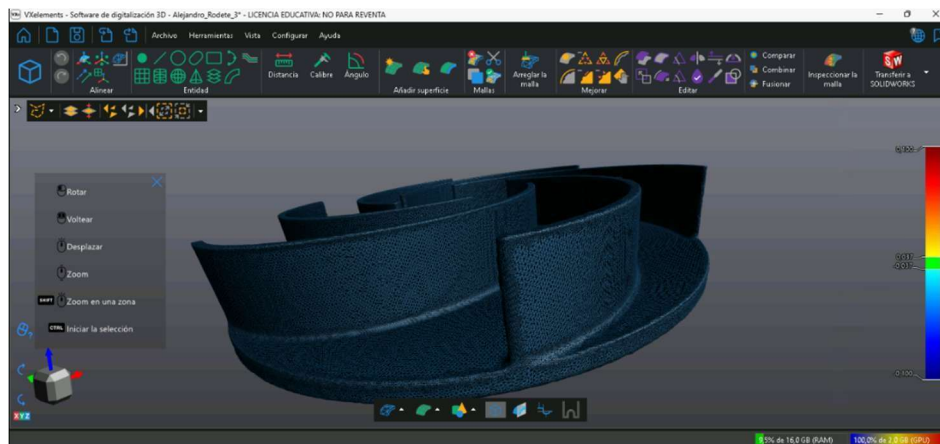


Figura 16 Rodete con la combinación de escaneados

5.2.2 MEJORA PREVIA A IMPRESIÓN

Tras obtener un modelo unificado en VxElements, se exporta a Solid Edge para:

- Suavizar imperfecciones heredadas del mecanizado original: las uniones entre la base y los álabes presentan curvatura propia del mecanizado del rodete original (ver Figura 17). Con el objetivo de una impresión 3D más sencilla para la impresora, además de estas uniones, se han simplificado las aristas y superficies (ver Figura 18).

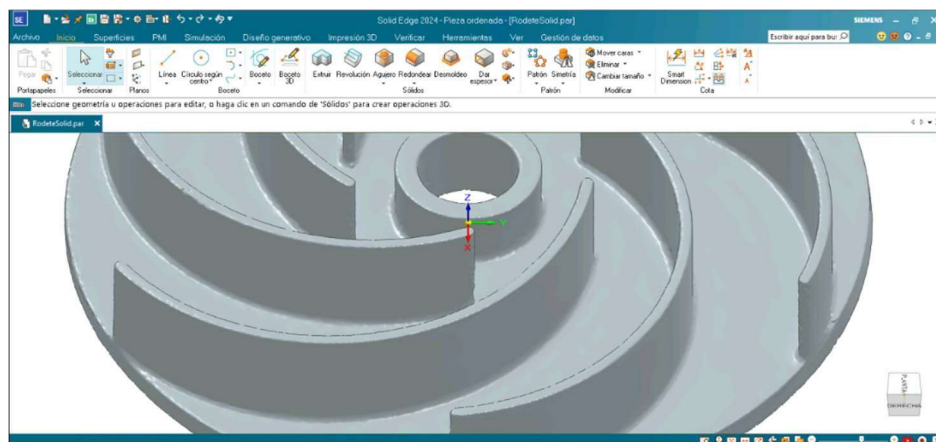


Figura 17 Rodete previo a la mejora

- Ajustar diámetros de agujeros, superficies cilíndricas: Aun siendo muy preciso, el escáner HandySCAN 3D Serie SILVER puede contener errores en cuanto a tolerancias en el agujero. Por ello, se han tenido que modificar los diámetros mediante la creación de un cilindro con menos imperfecciones.

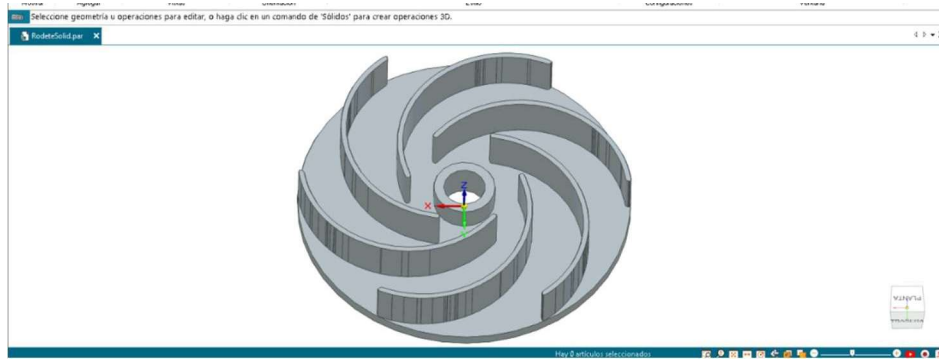


Figura 18 Rodete terminado

5.2.3 TIPOS DE FORMATO DE ARCHIVO

Según las necesidades de cada impresora, cada rodete se guarda en determinados formatos esenciales para la impresión 3D:

- .stl: Malla triangular importada desde .csf. Se utiliza para CAD o impresión 3D. Carece de colores o unidades explícitas.
- .obj: Copia de la pieza en formato genérico para su visualización. Pierde información sobre operaciones anteriores ya que limita la información a una malla con materiales básicos.
- .3mf: Archivo empaquetado en un ZIP; dentro incluye un modelo con las mallas codificadas en binario, colores, texturas o incluso trayectorias de corte. Admite texturas y metadatos de impresora. Ideal para slicers modernos que soporten 3MF sin requerir STL.

- .gcode: Archivo de instrucciones numéricas que la impresora 3D sigue para fabricar la pieza capa a capa. Útil en FDM

5.3 IMPRESIÓN 3D

En cuanto a tecnologías y materiales, la impresión 3D en el Laboratorio de Fabricación en ICAI ofrece infinidad de posibilidades. En este estudio se han escogido 4 tecnologías diferentes con el objetivo de dar una imagen amplia de las diferencias entre tecnologías. Estas tecnologías están recogidas bajo el ISO/ASTM 52900, las más comunes y las que se encuentran en este estudio:

- PBF (Powder Bed Fusion): Contiene la tecnología MJF. Un láser o haz de electrones funde selectivamente capas finas de polvo depositado sobre una plataforma.
- MEX (Material Extrusion): Contiene la tecnología FDM y CFR. Un filamento termoplástico se funde y se extruye capa a capa a través de una boquilla móvil.
- VPP (Vat Photopolymerization): Contiene la tecnología SLA. Una resina fotosensible líquida se cura selectivamente usando luz (láser, proyector o pantalla UV), capa a capa.

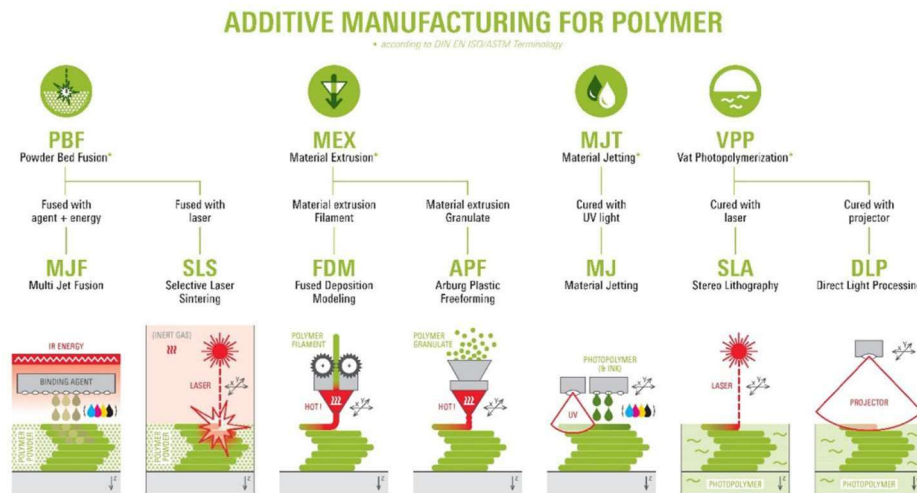


Figura 19 Clasificación de tecnologías[7]

Dependiendo de cada tecnología, existen numerosas posibilidades en cuanto a los materiales y las impresoras. Para este proyecto se han seleccionado materiales de uso común en cada tecnología con los recursos disponibles en el Laboratorio.

TECNOLOGIA	NOMBRE TECNICO	IMPRESORA
SLA	PU Rigid 10k Resin	Form 3I
MJF	PA12	HP 580 C
FDM	ABS	Adventurer 5M Pro
CFR	Onyx filament	MARKFORGED X7
SLA	Clear Resin V4.1	Form 3I

Figura 20 Descripción impresión 3D

5.3.1 SLA

La tecnología SLA (Stereolithography Apparatus) es un proceso de impresión 3D que utiliza resina líquida fotosensible y un láser ultravioleta (UV) para construir objetos capa por capa con alta precisión y detalle. Esta tecnología compatibiliza materiales como PU Rigid 10k Resin, de cuyas características destaca su alta rigidez mecánica, y Clear V4.1, que permite

realizar ensayos visuales a través de su transparencia, adecuada tanto para prototipos funcionales como para validación visual.

Antes de la impresión en la impresora Form 31 (Figura 22) es necesario utilizar el software Preform (Figura 21) para asignar una serie de parámetros, como puede ser la altura de capa, orientación o soportes. Para la altura de capa se ha escogido 0.1 mm, ya que es un estándar. Conviene una orientación a 45°, pero dado que es una pieza relativamente pequeña se ha considerado que las fuerzas de deformación son leves y no afecta al acabado, además de reducir los soportes.

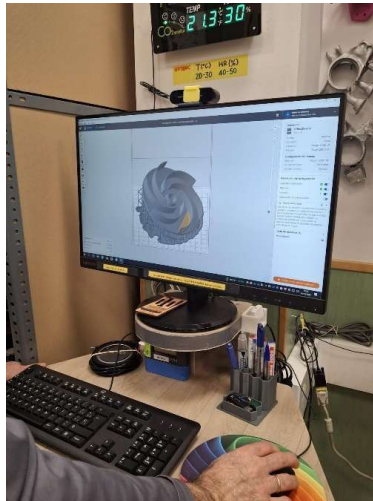


Figura 21 Preform



Figura 22 Form 3l

5.3.2 MJF

La tecnología MJF (Multi Jet Fusion) es un proceso avanzado de impresión 3D por sinterizado desarrollado por HP. Es especialmente utilizada para la fabricación de piezas funcionales con precisión y resistencia mecánica. El Principio de funcionamiento consiste en una capa fina de polvo termoplástico (PA12) que se deposita sobre la plataforma de impresión.

Se ha escogido esta tecnología por su alta resolución y detalle sin necesidad de soporte. Además, posee propiedades mecánicas ideales para piezas funcionales. Aunque no haya sido necesario en este proyecto, esta impresora permite imprimir lotes de piezas en una misma impresión, agilizando el proceso para volúmenes mayores.



Figura 23 HP Jet Fusion 580 C [8]

Asimismo, producir una pieza con esta tecnología implica costes elevados, por lo que su utilización suele ir acompañada de múltiples piezas encajadas óptimamente en un volumen reducido. Antes de su posible uso para la producción es necesario considerar como factor primordial el volumen de piezas/tiempo para la selección de esta tecnología.

Dada su alta resolución, es conveniente utilizar el formato .3mf, ya que no pierde información del color y texturas, entre otros. No es recomendable utilizar el formato .stl ya que almacena una malla triangular sin ningún atributo adicional.

5.3.3 FDM

La tecnología FDM (Fused Deposition Modeling), junto con el uso de materiales termoplásticos como el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), constituye una de las más extendidas formas de fabricación aditiva debido a su simplicidad, bajo coste y versatilidad.

El material ABS es un material ampliamente utilizado gracias principalmente a su disponibilidad. Sin embargo, el motivo detrás de su éxito reside en su resistencia mecánica, térmica y a impactos, sin sacrificar el precio del producto.

Para su impresión el formato adecuado en este caso es el .3mf, ya que permite guardar información necesaria para trabajar con este material. Entre la información relevante se encuentra el color seleccionado (en este caso amarillo), así como la orientación de la pieza y el laminado.

Acompañando al formato escogido, se encuentra el slicer Cura Ultimaker. Este software convierte el archivo .3mf en .gcode para la correcta interpretación de la impresora Adventurer 5M Pro (Figura 24).



Figura 24 Adventurer 5M Pro [9]

En cuanto a la orientación de la pieza se han probado 3 modelos con orientaciones diferentes, suponiendo que un mayor ángulo ayudaría a paliar los esfuerzos de cizalladura en el ensayo.

En cambio, la impresión los dos modelos que se han impreso con orientación mayor a 0° han resultado defectuosas. A diferencia de estos, para el modelo con 0° se ha conseguido un acabado óptimo y ha sobrevivido al ensayo en el Laboratorio de Fluidos.

5.3.4 CFR

La tecnología CFR (Continuous Fiber Reinforcement) permite fabricar piezas estructurales muy resistentes combinando un termoplástico base con fibras continuas de alto rendimiento.

El proceso parte de un material como el seleccionado en este proyecto (Onyx), que actúa como matriz, y refuerza selectivamente las capas insertando fibra continua en las zonas críticas.

En cuanto al material Onyx, se puede destacar su rigidez característica, ya que, siendo significativamente más ligero, este material puede producir piezas más fuertes que el aluminio.



Figura 25 Markforged X7 [10]

El software utilizado en este caso es el mismo que para SLA, es decir, el Creaform. Junto a la altura de capa (0,1 mm), esta tecnología comparte parámetros de impresión estándar con SLA.

Capítulo 6. ENSAYOS

6.1 RUGOSIDAD

La rugosidad superficial es un parámetro clave que influye directamente en el contacto del rodete con el fluido. En el contexto de este trabajo, resulta especialmente relevante para estudiar cómo la calidad superficial del rodete afecta al rendimiento hidráulico del sistema. Para caracterizar esta rugosidad se han empleado los parámetros más habituales en metrología superficial: Ra , Rq y Rz .



Figura 26: SURFCOM 1500SD2

Las rugosidades Ra , Rq y Rz son parámetros estándar que describen el estado superficial de una pieza. Ra (rugosidad media aritmética) representa la desviación media respecto al perfil ideal y es el valor más utilizado en control de calidad. Rq (rugosidad cuadrática media) da más peso a los picos y valles pronunciados, al tratarse de una media cuadrática. Se ha

demostrado que la rugosidad medida de pico a valle, R_z , representa mejor la rugosidad equivalente que la rugosidad media aritmética R_a , más comúnmente utilizada[11].

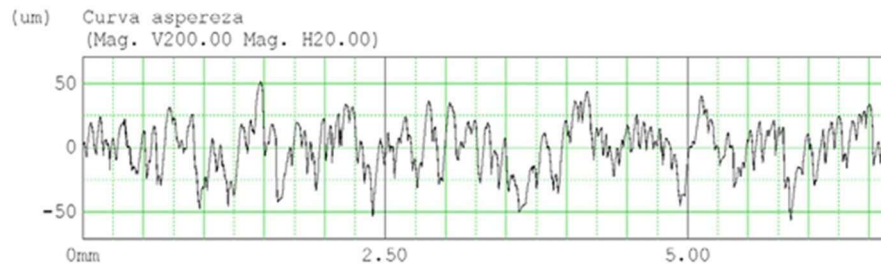


Figura 27: Curva de aspereza en la pared del rodete fabricado con PA12

Las rugosidades de cada rodete se determinaron con un rugosímetro SURFCOM 1500 SD2 (ver Figura 26). Se han realizado una serie de ensayos en la base y paredes de los álabes en cada uno de los rodetes. De estos resultados se han extraído los parámetros R_a , R_q y, especialmente, R_z . Con el fin de trabajar bajo el supuesto más desfavorable en el análisis de pérdidas, se adoptó como rugosidad característica el mayor de los dos valores obtenidos entre la base y las paredes de los álabes.

Material	R_z suelo [μm]	R_z pared [μm]	R_z característico [μm]
ABS	33.13	9.91	33.13
CFR (Onyx)	40.33	86.05	86.05
Clear Resin (SLA)	23.81	19.59	23.81
MJF (PA12)	76.49	98.79	98.79
PU Rigid 1000 (SLA)	26.06	19.69	26.06

Tabla 3 Rugosidad pico-a-valle

El desarrollo de la capa límite turbulenta y el incremento del coeficiente de fricción f están directamente influenciados por la rugosidad de la superficie del canal[12]. Aunque en este trabajo no se profundiza en las ecuaciones complejas de mecánica de fluidos, es suficiente con señalar que un aumento de la rugosidad pico-a-valle R_z conduce a un incremento del

coeficiente f , y con ello a mayores pérdidas internas que reducen el rendimiento hidráulico η_h . En el Capítulo 7.2 se analizará si realmente la rugosidad es un factor determinante en los resultados del rendimiento hidráulico.

6.2 BOMBA CENTRÍFUGA

Tal y como se comenta en el ANEXO I (sobre el circuito hidráulico) la instalación se compone de 5 componentes principales: motor, tuberías, válvulas, depósito e instrumentos de medición. Esta instalación incluye además otro motor para hacer ensayos serie o paralelo, sin embargo, se puede configurar mediante válvulas para que opere sólo una bomba.

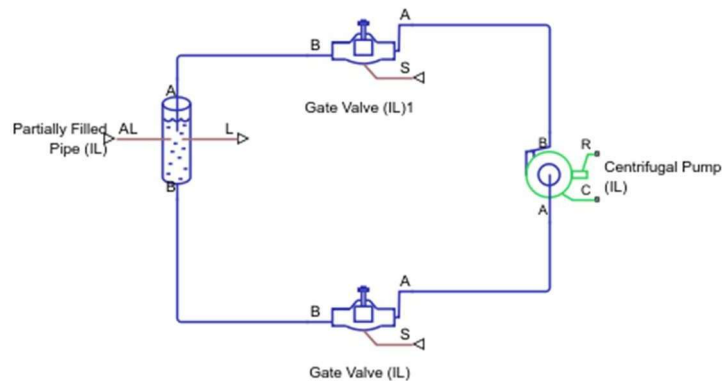


Figura 28 Esquematización del circuito hidráulico

El motor es eléctrico y de la marca AEG y transmite al eje una potencia. Acoplado a este motor mediante un juego en el eje-agujero se encuentra el rodete estudiado en cada caso. Este juego permite el giro, siempre que la calidad de impresión lo respete. El eje hace girar al rodete a una velocidad fija para el caso concreto de 1440 rpm, es decir, el 80% de la

velocidad máxima (1800 rpm). Este valor de velocidad permite simular la operación de forma continua por debajo del 100 % de su capacidad con el objetivo de prolongar la vida útil.



Figura 29: Banco de ensayos

Las tuberías permiten ver cómo circula el caudal a través de ellas y se dividen en dos tramos. La tubería que sale del depósito y entra al rodete (tubería inferior de la Figura 37) tiene un diámetro de 23.5 mm y la que sale del rodete y entra al depósito (tubería superior) de la Figura 37) tiene un diámetro de 17.5 mm. Los tubos que conforman las tuberías se interconectan entre sí mediante uniones de rosca, válvulas o codos. Estos elementos no alteran el resultado final a excepción del accionamiento manual de las válvulas.

En toda la instalación que ocupa este ensayo existen 2 tipos de válvulas. Las dos válvulas que sólo tienen dos posiciones (abierto o cerrado) no influyen en el resultado final, tan sólo influyen para el cambio de rodete, donde se ocupan de cortar el caudal proveniente del depósito.

El depósito posee capacidad suficiente para evitar interrupciones de caudal tanto a la entrada como a la salida. Se llena retirando una tapa superior y se cierra manualmente antes de iniciar la prueba. No debería afectar al resultado del estudio.

Instrumentos de medición:

- Caudalímetro: mide el caudal a la entrada.
- Manómetros (dos): situados en la entrada y la salida del rodete; permiten calcular la altura manométrica.
- Termómetro: proporciona la temperatura del agua, necesaria para determinar con exactitud su densidad.

Capítulo 7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Tras una serie de ensayos particulares de cada rodete en el Laboratorio de Fluidos, se ha conseguido obtener resultados consistentes y similares a un comportamiento normal de una bomba con estas características.

Además, se han trazado unas curvas polinómicas en función de los puntos de ensayo, tal y como se muestran en la Figura 30. En ausencia de puntos de funcionamiento fuera de lo previsto, se han establecido como válidas las aproximaciones definidas a través de las curvas polinómicas, definiéndose como Curvas Características de Operación. En Figura 32 y Figura 31 se puede observar mejor las diferencias entre los distintos materiales sin tener en cuenta los puntos de la gráfica, tan solo las líneas de tendencia.

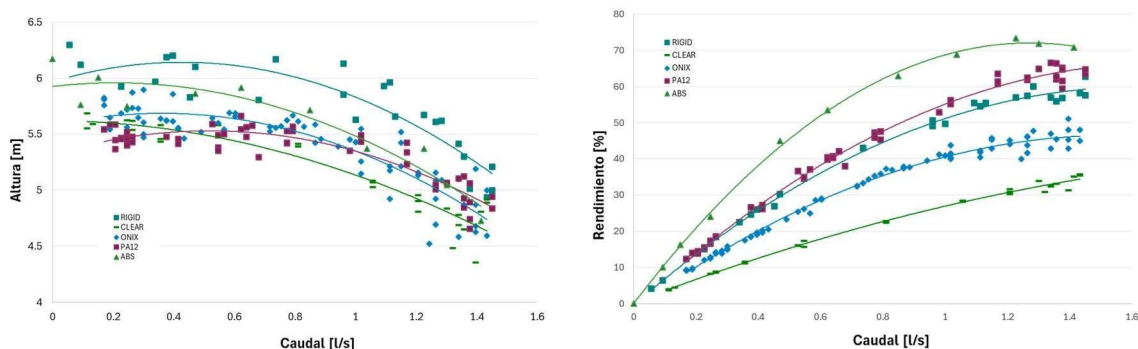


Figura 30: Representación de los puntos de la línea de tendencia

Antes de explicar con detalle los resultados conviene hacer un inciso teórico. El rendimiento total η_t (ver E. 7) es la división de la potencia absorbida por el fluido a la salida del rodete entre la potencia suministrada por el motor. La potencia absorbida por el fluido depende del caudal y de la altura manométrica y la potencia suministrada por el motor de la velocidad y el par motor.

E. 7 Rendimiento total

$$5_t = \frac{P}{P_a}$$

Este rendimiento representa el comportamiento global del sistema, incluyendo los efectos de pérdidas volumétricas, hidráulicas y mecánicas. En la Figura 31 puede observarse más detalladamente la evolución de 5_t frente al caudal para cada material. Se aprecia que ABS alcanza el rendimiento más alto (70 %), seguido de Rigid. Estos resultados están en línea con lo observado en los análisis individuales de rendimientos mecánico e hidráulico, y reflejan la influencia combinada de la geometría, la calidad de impresión y las propiedades mecánicas de cada material. En el caso de materiales como PA12 o Onyx, los bajos rendimientos se justifican por su mayor deformabilidad, rugosidad superficial y posible desalineación durante el montaje.

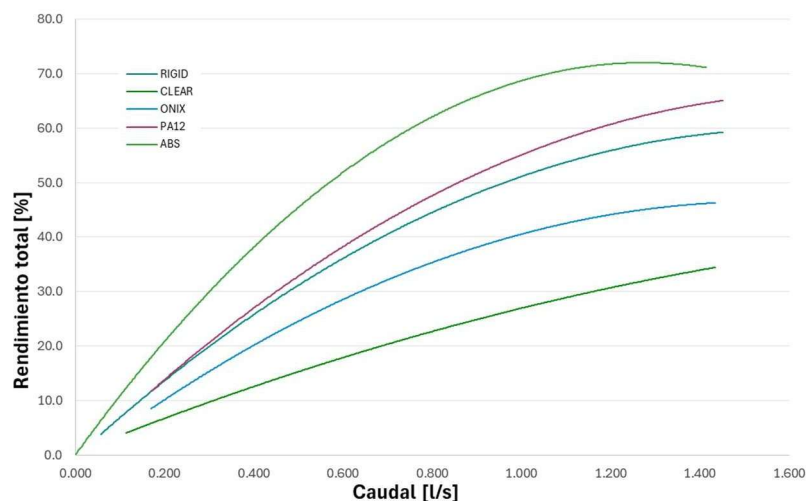


Figura 31: Curvas Rendimientos totales

En cuanto a la curva de Rendimiento – Caudal (Figura 31), de primera mano se puede distinguir claras diferencias entre rodetes. A diferencia de la curva Altura – Caudal, el

material con mayor rendimiento es ABS, llegando a un rendimiento máximo de 70 %. En cambio, materiales como Clear o Onyx presentan valores de 5_t sensiblemente más bajos.

Estas observaciones coinciden con otros estudios donde se ha demostrado que pequeñas variaciones en la rigidez o la precisión dimensional de las piezas impresas en 3D pueden tener un impacto significativo en la eficiencia global de componentes hidráulicos [13].

Los valores obtenidos de rendimiento total pueden tener numerosas explicaciones, ya que dependen de los rendimientos volumétrico, hidráulico y mecánico.

7.1 RENDIMIENTO VOLUMÉTRICO

El rendimiento volumétrico 5_v se asume constante con el caudal y de valor 98%. Este rendimiento se compone de el caudal por la brida de entrada y las pérdidas exteriores e interiores como se muestra en E. 8. Las exteriores se comprueba visualmente como nulas por la ausencia de goteo en la carcasa del rodete. Las interiores no se pueden comprobar, pero se asumen no nulas, siendo el rendimiento volumétrico comúnmente alto (en torno a 97% -99%), se ha asumido un rendimiento volumétrico del 98%.

E. 8 Rendimiento volumétrico

$$5_v = \frac{Q}{Q + Q_{\text{ext}} + Q_{\text{int}}}$$

7.2 RENDIMIENTO HIDRÁULICO

El rendimiento hidráulico compone de la división entre la altura manométrica y la altura periférica (ver E. 9). Esta altura es la comunicada al fluido de manera teórica menos las pérdidas asociadas al contacto del rodete con el fluido y de la disminución del trabajo que ello conlleva.

E. 9 Rendimiento hidráulico

$$5_h = \frac{H}{H_u}$$

La Figura 32 muestra la misma representación Altura - Caudal que la gráfica izquierda de la Figura 30, pero para mayor claridad se ha procedido a dejar visibles únicamente las líneas de tendencia.

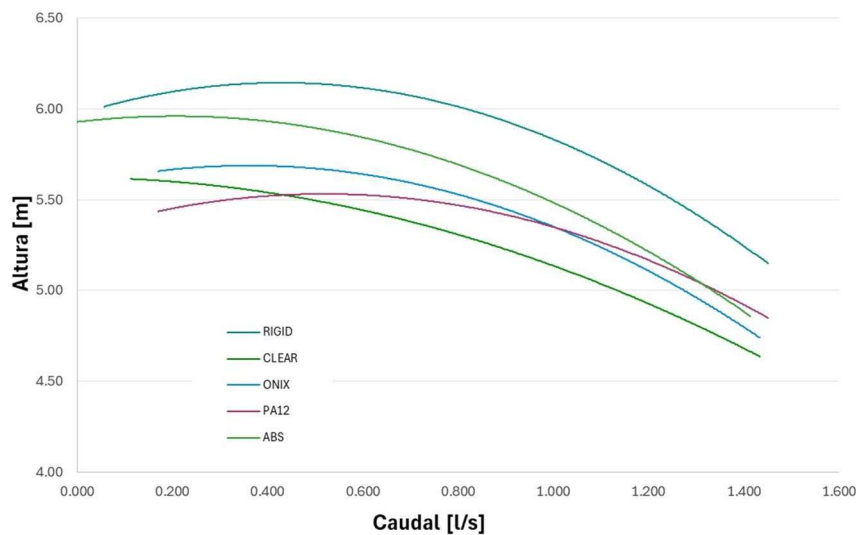


Figura 32 Curvas Altura - Caudal

La altura periférica H_u , tal y como se muestra en E. 1, depende del coeficiente de disminución de trabajo e_z y de la velocidad tangencial (ver E. 5), componente periférica de la velocidad absoluta (ver E. 6), además de la gravedad. La altura periférica únicamente depende del caudal (ver E. 5 y E. 6), de la geometría, y de la velocidad periférica (ver E. 4) por lo que no cambia de un material a otro. Se encuentra desarrollada directamente en la Figura 33, donde se presenta el desarrollo de las ecuaciones previamente mencionadas y deducidas.

$$H_u(Q) = \frac{\pi^2 n^2 (d_2^2 - d_1^2)}{3600g} - \frac{Qn}{60g} \left(\frac{1}{b_2 \tau_2 \tan \beta_2} - \frac{1}{b_1 \tau_1 \tan \beta_1} \right)$$

Figura 33 Fórmula de Altura periférica desarrollada

La Altura periférica posee 2 componentes principales: Una constante y una pendiente. La pendiente resulta interesante ya que tiene un valor positivo, y únicamente depende de la geometría.

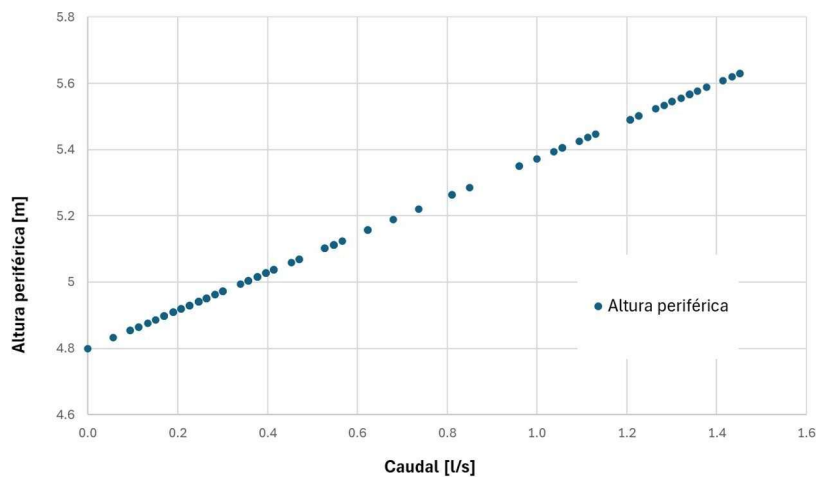


Figura 34 Altura periférica - Caudal

Con todos los parámetros geométricos calculados, las velocidades periféricas y absolutas con sus componentes, es posible estimar el rendimiento hidráulico (ver Figura 35).

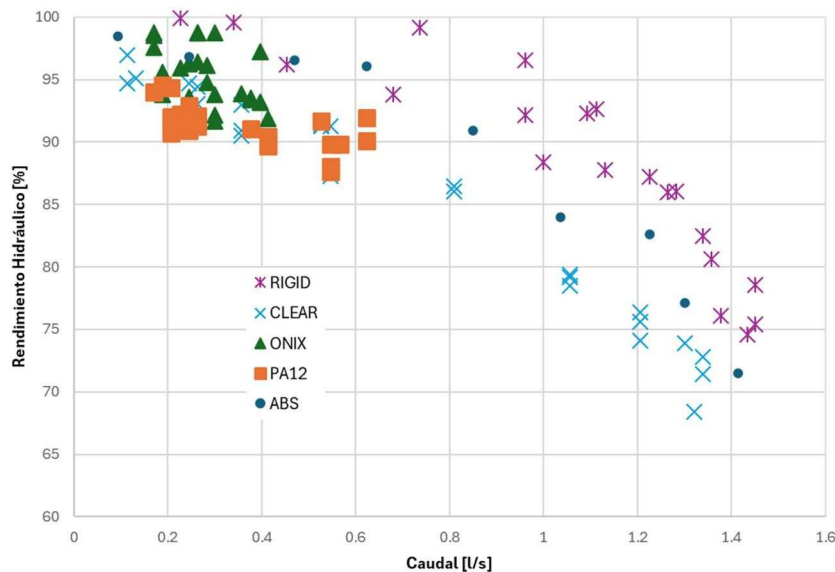


Figura 35: Resultado del Rendimiento Hidráulico

Las diferencias observadas entre materiales no sólo pueden atribuirse a la geometría, sino que también entran en la ecuación las pérdidas internas que reducen la altura efectiva H . Una de las principales causas de estas pérdidas es la rugosidad superficial, ya definida en el Capítulo 6.1, la cual estipula que una mayor rugosidad incrementa la fricción del fluido en contacto con el rodete. Este efecto se traduce en un aumento de las pérdidas internas y, por tanto, en una disminución de 5_h .

Además, los valores característicos de rugosidad pico-a-valle (R_z) determinados para cada material se analizaron previamente en el Capítulo 6.1. En la Tabla 3 se muestra cómo los materiales con mayor R_z , como PA12 o Onyx, presentan menores valores de rendimiento hidráulico. Esta tendencia ayuda a concluir que la rugosidad actúa como un factor penalizador directo sobre 5_h .

Sin embargo, existen anomalías como el caso de la resina Clear. Esta resina posee la menor rugosidad (ver Tabla 3) y sin embargo posee el menor rendimiento hidráulico. Esto tiene una simple explicación, ya que el material se ha comprobado en el laboratorio que deforma con

mucha mayor facilidad que los demás y hace que la geometría de los álabes cambie. Concretamente disminuye el ángulo físico del álabe y consecuentemente disminuye la componente tangencial de la velocidad absoluta.

7.3 RENDIMIENTO MECÁNICO

Este parámetro es el más difícil de cuantificar, pues se necesitan rendimiento volumétrico e hidráulico. Debería ser posible realizar una evaluación razonable de las pérdidas de los rodamientos de las bombas prototipo y, por lo tanto, eliminar las pérdidas mecánicas de la eficiencia total medida, lo que permitiría estimar la eficiencia mecánica[14].

Previamente a explicar resultados de rendimiento mecánico η_m , conviene indicar detalles sobre la fabricación del rodete. El rodete posee un juego con el eje similar en todos los materiales, respetando la calidad de impresión y propiedades del material. Sin embargo, al revolucionar el rodete y someterlo a presión, se pueden producir pérdidas que afecten a cada rodete de manera distinta. Estas pérdidas se engloban dentro del rendimiento mecánico y se pueden catalogar como:

Fricción: Tanto en el juego con el eje y el agujero del rodete, como en los álabes con la pared de la bomba (ver Figura 29) se pueden producir pérdidas por fricción. Tanto el desgaste por fricción de los materiales, como el calor producido por este contribuyen a un aumento en las pérdidas mecánicas.

Desalineación: Una incorrecta alineación con el eje produce excentricidad que puede llegar a desgastar el rodete llegando a producir fricción entre superficies y, por tanto, las consecuencias ya mencionadas.

Como comprobante de este detalle técnico de la fabricación y teniendo en cuenta la E. 10 se puede resolver el rendimiento mecánico.

E. 10 Rendimiento mecánico

$$5_m = \frac{5_t}{5_v 5_h}$$

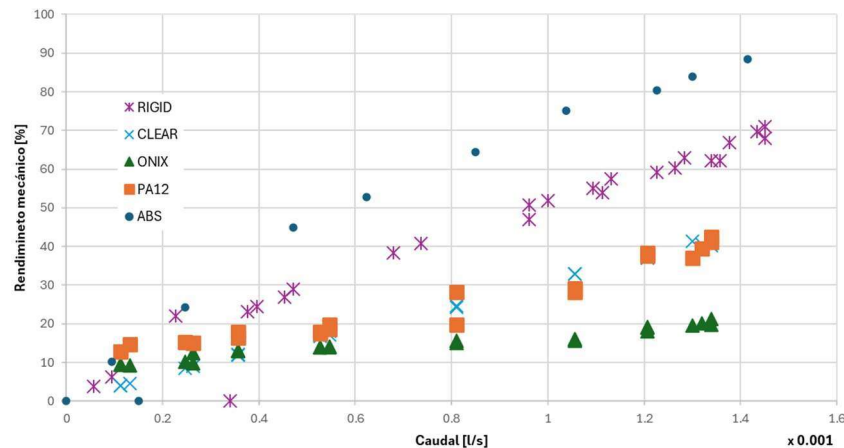


Figura 36: Rendimiento mecánico

Tras la observación de la Figura 36 se pueden llegar a conclusiones sobre el comportamiento de cada material. Un ejemplo representativo aparece en un estudio experimental de la ASME, donde se reportaron pérdidas mecánicas del 88 % (323 W), siendo un 23,6 % atribuible a rodamientos y un 64,2 % a los sellos de labio. Esto dio lugar a una eficiencia mecánica neta de solo el 12 % [15].

En este contexto, los valores de η_m observados en los materiales más penalizados, como Onyx (máximo en torno al 20 %), no son en absoluto anómalos, y reflejan el comportamiento real de prototipos impresos en 3D sin ajustes ni componentes de alta precisión.

Por el contrario, materiales como ABS o Rigid presentan una mayor rigidez dimensional, lo que permite una mejor transmisión del par sin deformaciones apreciables. En particular, Rigid 10K muestra un módulo de tracción superior a 7.5 GPa y una elongación a rotura inferior al 2 %, lo que lo convierte en un material especialmente adecuado para soportar cargas sin perder forma [16]. ABS, por el contrario, presenta menor rigidez, sin embargo, la

fabricación de este material permite resultados con buena estabilidad dimensional, especialmente cuando se controla la humedad y se utilizan diseños compactos [17]. Estas propiedades explican que ambos materiales hayan alcanzado los valores más altos de rendimiento mecánico en el ensayo.

Capítulo 8. ANÁLISIS DE COSTES

El presente capítulo tiene como objetivo realizar un análisis económico detallado del proyecto desarrollado, considerando los costes directos e indirectos asociados a la fabricación mediante impresión 3D. Se evaluarán los recursos materiales, humanos y técnicos necesarios para la ejecución del proyecto, así como una estimación de los costes totales.

Dentro de este capítulo no solo se incluye el precio de impresión 3D, que varía en cada rodete; también se han estimado los costes fijos, como la ingeniería inversa y los ensayos en el Laboratorio de Fluidos.

Se ha utilizado el método interno de análisis de costes del Laboratorio de Fabricación de ICAI, denominado Método ICAI. En él se calcula el coste de cada impresión teniendo en cuenta: la amortización de la impresora, el coste de cada material y el coste del técnico analista. Con los datos requeridos, los costes se agrupan por concepto para obtener el precio final de impresión.

Con el objetivo de explicar este método, los costes se han clasificado de la siguiente manera:

- Costes de los materiales, C_{mat}
- Costes de maquinaria y herramientas, C_h
- Costes de mano de obra, C_{MO}

Llegando así a la fórmula de coste total (E. 11), definido más adelante tras analizar cada coste en particular.

E. 11

$$C_T = C_{a,} + C_h + C_{MO}$$

8.1 COSTES DE MATERIALES

PU Rigid 10k y Clear V4.1 se preparan con el software PreForm, que permite simular material y tiempo antes de imprimir. ABS, en cambio, se prepara con Cura Ultimaker, cuyas funciones son equivalentes. Los precios unitarios se han obtenido o de las páginas oficiales de los fabricantes, como Formlabs para Rigid 10k y Clear V4.1 y Ultimaker para CFR, o bien comparando precios online, como para ABS [18]. Se han establecido las compras a través de los lotes mínimos de pedido, siendo reflejados en la siguiente tabla:

<i>Material</i>	<i>Material lote</i>	<i>Precio lote</i>
PU Rigid 10k	1000 ml	361.79 €
Clear V4.1	1000 ml	169.40 €
Onyx	800 cc	230.00 €
ABS	750 g	29.95 €

Tabla 4 Precio y Volumen de cada lote pedido

El presupuesto de MJF se obtiene directamente sobre un “quote” en Xometry.eu, insertando el archivo .stl del rodete. Xometry no se necesita el dato del material para calcular el precio, con el volumen del .stl puede realizar una estimación.

$$E. 12 \quad \text{Precio unitario} = \frac{\text{Precio del lote}}{\text{Material del lote}} \times \text{Material utilizado}$$

El coste de los materiales es diferente, ya que según el software que se utilice o las estimaciones propias, se puede utilizar un criterio u otro, por lo que en Precio unitario se calcula según la fórmula E. 12, de la que se obtiene:

Material	Impresora	Material utilizado	Precio unitario
PU Rigid 10k	Form 3l	100.74 ml	36.45 €
PA12	HP 580 C	-	58.31 €
ABS	Adventurer 5M Pro	44 g	2.99 €
Onyx	MARKFORGED X7	47.8 cc	11.35 €
Clear V4.1	Form 3l	96.57 ml	8.10 €

Tabla 5 Coste de materiales

8.2 COSTE DE MAQUINARIA Y HERRAMIENTAS

Dado el alto precio de la herramienta HandySCAN 3D Serie SILVER, se ha optado por emplear el método de amortización de las impresoras 3D según el Método ICAI, que clasifica los costes de la siguiente manera:

Material	Impresora/Escáner	Amortización / hora	Tiempo Impresión (h)	Coste
PU Rigid 10k	Form 3l	€ 2.91	4.5	€ 13.01
PA12	HP 580 C	-	-	€ 147.53
ABS	Adventurer 5M Pro	€ 0.11	7.72	€ 0.82
Onyx	MARKFORGED X7	€ 8.58	12.93	€ 110.97
Clear V4.1	Form 3l	€ 2.91	4.2	€ 12.22
NA	HandySCAN 3D Serie SILVER	€ 5.88	1	€ 5.88

Tabla 6 Coste de Maquinaria y Herramientas

El cálculo del coste por hora de las máquinas sigue el Método ICAI, que suma el precio del equipo y su mantenimiento total, dividiéndolo entre las horas de uso en ese periodo. Por ejemplo, una impresora SLA de 20.000€ con 2.000€ de mantenimiento anual y 3 años de vida útil, trabajando 1.784 horas/año (223 días * 8h/día), tiene un coste de 2.91€/hora. Los años de amortización varían según el equipo: 5 para escáneres CFR y 3 para impresoras SLA.

Para la impresora HP 580 C se emplea un método similar, pero se modifica el denominador (E. 13), teniendo en cuenta los días de impresión al año (249 días) y las impresiones al día (una cada dos días).

$$E. 13 \quad \text{Precio de impresión} = \frac{\frac{\text{Precio}_{\text{máquina}}}{\text{Años}_{\text{amortización}}} + \text{Coste}_{\text{mantenimiento}}}{\text{Días}_{\text{año}} \cdot \text{Impresiones}_{\text{día}}}$$

CONCEPTO	MJF	CFR	SLA	FDM	Rev. Eng.
Precio máquina (€)	80,000	66,000	20,000	413	27,494
Coste mantenimiento anual (€)	2,000	6,600	2,000	50	2,500
Años de amortización	5	5	5	3	5

Tabla 7 Amortización General

Nota: Los datos sobre los precios son los suministrados por la universidad, incluidos en el archivo Excel Método ICAI.

8.3 *COSTE DE MANO DE OBRA*

<i>MATERIAL</i>	<i>HORAS INGENIERO</i>	<i>COSTE HORA €</i>	<i>COSTE €</i>
PU Rigid 10k	1.5	€ 30.00	45.00 €
PA12	1.5	€ 30.00	45.00 €
ABS	1.5	€ 30.00	45.00 €
Onyx	1.5	€ 30.00	45.00 €
Clear V4.1	1.5	€ 30.00	45.00 €
(Rev. Eng.)	1	€ 50.00	50.00 €

Tabla 8 Coste Mano de Obra

En cuanto a las horas empleadas por un ingeniero en realizar un proceso de Ingeniería inversa o impresión 3D se han incluido preparación, operación y postprocesado, y se han obviado las horas de impresión, pues el ingeniero no tiene la obligación de estar pendiente durante el proceso.

Dado que la implementación de estos procesos en una primera instancia puede ser cara, más en concreto, la mano de obra se ha decidido tener un criterio donde un ingeniero con habilidades de fabricación 3D cobre 30 € y un ingeniero con conocimientos de Ingeniería inversa 50€.

8.4 COSTE TOTAL

La ingeniería inversa tendría un coste unitario de 55.88 €, que se tendría que sumar como coste fijo en un balance de cuentas del proyecto a tratar.

<i>Concepto</i>	<i>Coste total</i>
PU Rigid 10k	94.46 €
PA12	103.31 €
ABS	48.81 €
Onyx	167.32 €
Clear V4.1	65.32 €

Tabla 9 Coste total

Entre los materiales analizados, Onyx presenta el coste total más alto con 167.32 €, debido sobre todo a su elevado coste de amortización por hora (8.58 €/h) y al largo tiempo de impresión (12.93 h). Le siguen PA12 y PU Rigid 10k, ambos con costes elevados de material, pero amortización baja o nula. En contraste, Clear V4.1 y especialmente ABS resultan más económicos, destacando este último como la opción más rentable.

Si se busca un equilibrio entre resultados y coste total, Clear V4.1 ofrece una opción intermedia razonable, pero con resultados deficientes. Si, en cambio, el objetivo es minimizar gastos, ABS es claramente la alternativa más asequible, aunque con limitaciones técnicas frente a materiales como Onyx o PU Rigid 10k.

Capítulo 9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este proyecto se ha reflejado el extenso estudio relacionado con la Ingeniería Inversa, la Fabricación Aditiva y su aplicación en una bomba hidráulica. Se ha desarrollado multitud de temas explicando en cada uno sus particularidades.

Se ha analizado un rodete original de una bancada del Laboratorio de Fluidos, el cual, al no tener modelo digital, se ha procedido a realizar Ingeniería Inversa. Esta ha conllevado pasos comunes requeridos en esta metodología como son el escaneado y el ajuste de la nube de puntos mediante CAD.

Tras completar el análisis anterior, se ha procedido a imprimir en 3D mediante diversas tecnologías. Sumando las aportaciones en cuanto a características se refiere, se puede obtener una visión global de lo que supone la impresión 3D.

Por último, se han realizado ensayos de cada rodete, asegurándose en cada uno de cumplir patrones definidos en las curvas teóricas. Los materiales estudiados se analizan singularmente para evaluarse en conjunto y comparar. Los resultados definen, en orden de mejor a peor, los materiales ABS, PA12, PU Rigid 10k, Onyx y Clear V4.1.

Más allá de este proyecto se encuentran un sinnúmero de aplicaciones tanto de la ingeniería inversa como de la fabricación 3D. Sin embargo, dada la naturaleza de este trabajo —que aplica estos campos de investigación al mundo de los fluidos— conviene ajustar el foco hacia las turbomáquinas. Las numerosas aplicaciones posibles de ingeniería inversa y fabricación aditiva hacen de las turbomáquinas un objeto de estudio a tener muy en cuenta, desde ciclos combinados con la turbina Curtis hasta aplicaciones hidráulicas con la turbina Pelton.

Capítulo 10.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] E. Bagci, “Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies,” *Adv. Eng. Softw.*, vol. 40, no. 6, pp. 407–418, June 2009, doi: 10.1016/j.advengsoft.2008.07.003.
- [2] “HandySCAN 3D | SILVER Series: Professional 3D Laser Scanners.” Accessed: July 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.creaform3d.com/Products/Portable-3D-scanners/Handyscan-3D-Silver-Series-professional-3D>
- [3] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, “An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications,” *Procedia Manuf.*, vol. 35, pp. 1286–1296, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089.
- [4] “ApuntesMMHH.pdf.” Accessed: July 11, 2025. [Online]. Available: <http://fluidosuc3m.es/wp-content/uploads/2018/01/ApuntesMMHH.pdf>
- [5] E. Sundstrom, “Flow instabilities in centrifugal compressors at low mass flow rate”.
- [6] B. Chen and Y. Qian, “Effects of Blade Suction Side Modification on Internal Flow Characteristics and Hydraulic Performance in a PIV Experimental Centrifugal Pump,” *Processes*, vol. 10, no. 12, Art. no. 12, Dec. 2022, doi: 10.3390/pr10122479.
- [7] N. Giannotta, G. Sala, C. Bianchini, and A. Torreggiani, “A Review of Additive Manufacturing of Soft Magnetic Materials in Electrical Machines,” *Machines*, vol. 11, no. 7, Art. no. 7, July 2023, doi: 10.3390/machines11070702.
- [8] “HP Jet Fusion 540 3D Printer Descargas de software y controladores | Soporte HP®.” Accessed: July 22, 2025. [Online]. Available: <https://support.hp.com/bo-es/drivers/hp-jet-fusion-500-3d-printer-series/model/21430574>
- [9] “Aventurero 5M Pro.” Accessed: July 22, 2025. [Online]. Available: <https://eu.flashforge.com/es-eu/blogs/download-document/adventurer-5m-pro>
- [10] “X7,” Impresión 2D, 3D, Médica, Textil y Tecnología. Accessed: July 22, 2025. [Online]. Available: <https://grupo-sg.com/producto/x7/>
- [11] “Coated pipe interior surface roughness as measured by three scanning probe instruments | Request PDF,” *ResearchGate*, doi: 10.1108/00035590310456243.
- [12] “White_2011_7ed_Fluid-Mechanics.pdf.” Accessed: July 12, 2025. [Online]. Available: http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TM240/Marchi/Bibliografia/White_2011_7ed_Fluid-Mechanics.pdf
- [13] “(PDF) Additive Manufacturing 3D Printing for Prototyping and Manufacturing,” *ResearchGate*. Accessed: July 13, 2025. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/310691287_Additive_Manufacturing_3D_Printing_for_Prototyping_and_Manufacturing
- [14] C. P. Kittredge, “Estimating the Efficiency of Prototype Pumps From Model Tests,” *J. Eng. Power*, vol. 90, no. 2, pp. 129–139, Apr. 1968, doi: 10.1115/1.3609149.
- [15] X. Yang, Z. Qu, and Y. Wu, “Frictional Loss Studies and Experimental Performance of a New Synchronal Rotary Multiphase Pump,” *J. Fluids Eng.*, vol. 133, no. 041303, May 2011, doi: 10.1115/1.4003986.

- [16] “2001479-TDS-ES-0.pdf.” Accessed: July 13, 2025. [Online]. Available: <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001479-TDS-ES-0.pdf>
- [17] R. Hernandez, D. Slaughter, D. Whaley, J. Tate, and B. Asiabanpour, “Analyzing the Tensile, Compressive, and Flexural Properties of 3D Printed ABS P430 Plastic Based on Printing Orientation Using Fused Deposition Modeling”.
- [18] “1621 | Filamento para impresora 3D FDM, ABS, 2.85mm, Negro, 750g Ultimaker | RS.” Accessed: July 22, 2025. [Online]. Available: https://es.rs-online.com/web/p/materiales-para-impresion-3d/1348163?cm_mmc=ES-PLA-DS3A--google--CSS_ES_ES_Pmax_CatchAll--1348163&matchtype=&&gad_source=1&gad_campaignid=20152905064&gbraid=0AAAAADkeWNMSP3CnSMEWAoK2l_AsUOfAZ&gclid=Cj0KCQjwyvfDBhDYARIsAItzbZGMOJOJf979QiGDhwMazOpVLGMnDkhHdUhfl_rVy_jWh3noTHjIfvtwaApeREALw_wcB&gclsrc=aw.ds
- [19] “Form 3L: La primera impresora 3D SLA de gran formato asequible | Formlabs.” Accessed: July 22, 2025. [Online]. Available: <https://formlabs.com/es/3d-printers/form-3l/?srsltid=AfmBOopde8KJ9HFan8z26ZRCMPu-ffe79VwbXkcwiLXSyH3kE77CHkuR>
- [20] “X7™.” Accessed: July 22, 2025. [Online]. Available: <https://markforged.com/3d-printers/x7>
- [21] “Flashforge Adventurer 5M Pro - Impresora 3D avanzada.” Accessed: July 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.flashforge.com/es/products/flashforge-adventurer-5m-pro?srsltid=AfmBOops9iES1qPZlPdVxJNkjZYRhGHwVCJJCKc9cW09SqdKRPCQ37M6>
- [22] N. Zirak, M. Shirinbayan, M. Deligant, and A. Tcharkhtchi, “Toward Polymeric and Polymer Composites Impeller Fabrication,” *Polymers*, vol. 14, no. 1, p. 97, Dec. 2021, doi: 10.3390/polym14010097.
- [23] “Datenblatt_Formlabs_Clear_Resin_V4.1_Form_3_EN.pdf.” Accessed: July 22, 2025. [Online]. Available: https://shop.3d-model.com/media/6c/96/36/1729194011/Datenblatt_Formlabs_Clear_Resin_V4.1_Form_3_EN.pdf?ts=1729195894
- [24] “Onyx - Composite 3D Printing Material.” Accessed: July 22, 2025. [Online]. Available: <https://markforged.com/materials/plastics/onyx>
- [25] “2001479-TDS-ENUS-0.pdf.” Accessed: July 22, 2025. [Online]. Available: <https://formlabs-media.formlabs.com/datasheets/2001479-TDS-ENUS-0.pdf>

NOTA ACLARATORIA: Todas las figuras y tablas que no están referenciadas en el documento son de elaboración propia.

ANEXO I: CIRCUITO HIDRÁULICO



1. EQUIPO

El equipo consta de dos bombas de agua centrífugas (sólo utilizada la Bomba 1 de la Figura 37) accionadas por un motor eléctrico que está montado sobre un zócalo de soporte junto con un depósito de acrílico transparente y tuberías asociadas para una circulación continua. El flujo de agua a través de las bombas está regulado por una válvula de control de flujo en el lado de descarga de la bomba. Una válvula en la tubería de entrada de la bomba permite investigar el efecto de las pérdidas de succión.

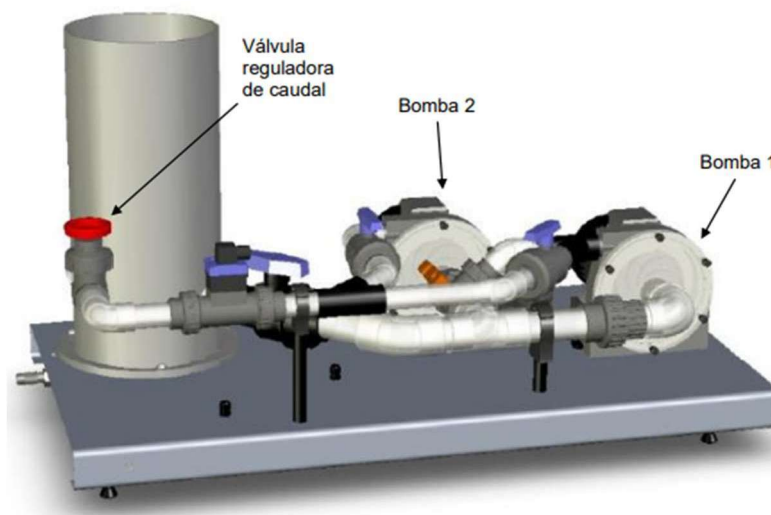


Figura 37 Circuito completo

Se incorporan sensores apropiados para permitir el análisis del rendimiento de la bomba. Los parámetros de funcionamiento de la bomba se controlan mediante el software Armfield suministrado en un ordenador adecuado, a través de un dispositivo de interfaz Armfield (IFD7). El software también permite registrar todas las salidas de los sensores y realiza los cálculos necesarios para las investigaciones que se presentan aquí.



Figura 38 Placa base

2. PLACA BASE

La placa base (8) soporta los demás componentes del sistema.

3. DEPÓSITO

El depósito (1) está formado por acrílico transparente y está montado en la placa base. El depósito se puede llenar a través de la parte superior abierta. El flujo sale del depósito por la conexión de la tubería delantera inferior, se extrae a través de la bomba y vuelve a ingresar al depósito por la conexión de la tubería trasera superior. Un deflector central evita que el aire entre en las tuberías. Un orificio de drenaje (10) en la base permite drenar el depósito después de su uso.

4. BOMBAS

Las dos bombas (4) y (12) son bombas centrífugas accionadas por motor. En la bomba 1 (4), la velocidad del motor es ajustable para dar un rango de 0 a 100%, lo que permite la operación como una sola bomba para el análisis del rendimiento de la bomba. La bomba 2 (12) es un modelo idéntico, pero funciona a su velocidad de diseño, lo que equivale a un ajuste del 80% en la bomba de velocidad variable para un suministro eléctrico de 50 Hz, o del 100% para un suministro de 60 Hz.

Los cuerpos de la bomba y las placas de cubierta están hechos de acrílico transparente, lo que permite observar los impulsores. Cada placa está asegurada con seis tornillos de mariposa y se puede quitar para permitir que se cambien los impulsores. El cambio del impulsor se describe en la sección Operación.

ADVERTENCIA: Nunca retire las placas de cubierta cuando las bombas estén en uso. Las bombas siempre deben estar apagadas y el sistema drenado antes de quitar cualquiera de las placas. Las placas siempre deben estar aseguradas en su lugar y el sistema preparado para su uso antes de operar las bombas.

5. RODETES

Cuando se suministran, ambas bombas están equipadas con impulsores con álabes curvados hacia atrás. Se suministra un impulsor alternativo con palas curvadas hacia adelante, lo que permite investigar el efecto de cambiar el diseño del impulsor. Se proporciona una posición de almacenamiento (11) para el impulsor que no está en uso. El cambio del impulsor se describe en la sección Operación. Si se realizan los experimentos de bombas en serie o en paralelo descritos en la sección Ejercicios de enseñanza, se deben instalar impulsores similares en ambas bombas.

6. VÁLVULA DE ENTRADA

Una válvula de bola manual (6) controla el cabezal de entrada (succión) suministrado a las bombas. Esta válvula debe estar completamente abierta, excepto cuando se investiga el efecto de la presión de entrada en el rendimiento de la bomba y la formación de cavitación. La válvula se acciona girando la manivela de la parte superior. La válvula está completamente abierta cuando la manija está alineada con la tubería y está completamente cerrada cuando la manija está en ángulo recto con la tubería.

7. VÁLVULA DE COMPUERTA

Una válvula de compuerta manual (2) controla el caudal general a través del sistema. La válvula se acciona girando la rueda en la parte superior. La válvula está completamente abierta (flujo máximo) cuando la rueda se gira completamente en sentido contrario a las agujas del reloj (mirando hacia abajo en la válvula) y está completamente cerrada (sin flujo) cuando la manija se gira completamente en el sentido de las agujas del reloj. La válvula está marcada en la rueda indicando las direcciones de giro correctas.



Figura 39 Válvula de compuerta

8. VÁLVULAS DE SALIDA DE LA BOMBA

Cada bomba tiene una válvula de bola instalada en el lado de salida. Estas válvulas se utilizan para controlar el patrón de flujo a través del sistema. La válvula de bola (15) en la salida de la bomba 2 (12) debe estar cerrada (ajustada a 90° con respecto a la tubería) para producir flujo a través de la bomba 1 (4) solamente. Las válvulas de salida deben configurarse junto con la válvula de 3 vías para garantizar la ruta de flujo correcta.

9. VÁLVULA “3-WAY”

Una válvula de 3 vías (18) está situada cerca de la entrada a la bomba 2. Esta válvula se utiliza para establecer el patrón de flujo para flujo simple, en serie o paralelo a través del sistema. La válvula está marcada con la ruta de flujo a través de la válvula. A los estudiantes les puede resultar útil realizar un seguimiento del patrón de flujo alrededor del sistema al

configurar cada experimento, para asegurarse de que las válvulas estén configuradas correctamente y para ayudar a visualizar lo que está sucediendo dentro del sistema.

10. SENSOR DE CAUDAL

La salida del sensor se muestra en el software Armfield.

11. SENSORES DE PRESIÓN

Tres sensores electrónicos de presión (5), (12) y (19) están instalados en el equipo, uno en la tubería de entrada y otro en cada salida de la bomba. Las salidas de los sensores de presión se muestran en el software Armfield.

12. VÁLVULA DE DRENAJE

Una válvula de drenaje (9) debajo de la placa base controla el flujo del drenaje del depósito. La válvula debe cerrarse mientras el equipo está en uso.

13. VÁLVULAS DE DRENAJE

Las válvulas de drenaje en las carcasas de la bomba (16) y (17) permiten que las volutas de la bomba se drenen por completo.

14. SENSOR DE TEMPERATURA

Un sensor de temperatura (7) está situado en la salida del depósito, para medir la temperatura del fluido dentro del sistema.

15. MOTOR



Figura 40 Placa de Características del Motor

<i>Frecuencia (Hz)</i>	<i>Conexión</i>	<i>Tensión (V)</i>	<i>Intensidad (A)</i>	<i>Potencia (kW)</i>	<i>Velocidad (rpm)</i>	<i>Cos φ</i>
50	Δ	230 (210–242)	1.6	0.25	1360	0.74
50	Y	400 (380–420)	0.9	0.25	1360	0.74

Tabla 10 Tabla de Características resumida

ANEXO II: LABORATORIO DE FABRICACIÓN

1. *HANDYSCAN SILVER*

Especificaciones técnicas

	HandySCAN SILVER™	HandySCAN SILVER™ Elite
EXACTITUD ⁽¹⁾	Hasta 0,040 mm	Hasta 0,030 mm
EXACTITUD VOLUMÉTRICA ⁽²⁾ (en función del tamaño de la pieza)	0,020 mm + 0,100 mm/m	0,020 mm + 0,060 mm/m
CAPACIDADES DE MEDICIÓN (a una distancia de trabajo de 0,3 m)	 Pasador	1,00 mm
	 Orificio	1,50 mm
	 Desnivel	0,030 mm
	 Pared	0,75 mm
FUENTE DE LUZ ⁽³⁾	14 líneas láser azules	14 líneas láser azules (+ 1 línea extra)
ÁREA DE ESCANEADO	310 x 350 mm	
RANGO DE TAMAÑO DE LAS PIEZAS (recomendado)	0,05-4 m	
PESO	0,94 kg	

(1) Valor común para la medición de diámetro en un artefacto esférico calibrado.

(2) Valor de medición de la distancia de esferas en un artefacto de longitud calibrada. Los resultados se obtienen mediante la fotogrametría integrada con optimización de exactitud volumétrica.

(3) Clase de láser: 2M (seguro para los ojos).



2. IMPRESORAS

Parámetro	HP Jet Fusion 580 (MJF) [8]	Formlabs Form 3L (SLA) [19]	Markforged X7 (CFR) [20]	Flashforge Adventurer 5M Pro (FDM) [21]
Tecnología	Multi Jet Fusion	Estereolitografía por láser	FDM con refuerzo de fibra continua	FDM clásico
Volumen de impresión (mm)	190 × 332 × 248	335 × 200 × 300	330 × 270 × 200	220 × 220 × 220
Resolución / Capa mínima	0.08 mm	0.025 mm (X,Y); 0.025–0.3 mm (Z)	50 µm	100 µm (mínima 50 µm)
Materiales compatibles	PA12	Clear, Tough, Rigid resins	Onyx, Nylon, CFR, Kevlar	PLA, PETG, ABS, TPU, CF
Resistencia térmica (boquilla)	—	70 °C curado / 120 °C transitorio	280 °C	280 °C
Precisión dimensional	±0.2 mm	±0.1 mm	±80 µm en plano	±0.2 mm aprox.
Software	HP SmartStream 3D	PreForm	Eiger Cloud	FlashPrint / Orca
Sistema cerrado	Sí	Sí	Sí	Sí (HEPA + carbón activado)
Conectividad	Ethernet	USB / Ethernet / Cloud	Wi-Fi / Ethernet	Wi-Fi / USB
Consumo eléctrico	4.5 – 6.3 kW	~1.5 kW	150 W	350 W
Aplicación principal	Producción industrial en PA12	Prototipado de alta resolución	Funcionalidad mecánica avanzada	Bajo coste / prototipado general

Tabla 11 Impresoras 3D

3. MATERIALES

3.1. ABS

Mechanical Properties of 3D Printed ABS in Various Build Angles					
Build Angles	0-deg in XY	45-deg in XY	90-deg in XY	45-deg in Z	90-deg in Z
Tensile Strength, MPa	10.0 (0.16)	9.46 (0.84)	10.8 (0.19)	9.47 (0.44)	9.36 (0.50)
% Elongation	5.50 (0.90)	2.99 (0.26)	6.92 (1.0)	1.69 (0.04)	1.47 (0.02)
Tensile Modulus, MPa	602 (0.25)	631 (26)	586 (52)	707 (43)	737 (2.6)
Compressive Strength, MPa	59.3 (1.3)	29.4 (0.44)	37.2 (0.29)	34.2 (0.40)	45.5 (0.90)
*Compressive Modulus, MPa	854 (0.15)	748 (0.11)	832 (0.07)	527 (0.05)	760 (0.02)
Flexural Strength, MPa	122 (1.6)	99.6 (3.1)	60.9 (10.)	59.5 (2.1)	59.8 (7.4)
*Flexural Modulus, MPa	3410 (110)	3630 (150)	2950 (150)	2200 (45)	3100 (100)

Tabla 12 Datasheet experimental ABS [22]

3.2. CLEAR V4.1

Mechanical Properties	METRIC		IMPERIAL		METHOD
	GREEN	POST-CURED 15MIN @ 60C	GREEN	POST-CURED 15MIN @ 60C	
Ultimate Tensile Strength	37 MPa	53 MPa	5366 psi	7687 psi	ASTM D 638-14
Tensile Modulus	1697 MPa	2369 MPa	246 ksi	344 ksi	ASTM D 638-14
Elongation at Break (X/Y)	19%	9%	19%	9%	ASTM D 638-14
Flexural Properties	METRIC		IMPERIAL		METHOD
	GREEN	POST-CURED 15MIN @ 60C	GREEN	POST-CURED 15MIN @ 60C	
Flexural Strength	62 MPa	103 MPa	8992 psi	14939 psi	ASTM D 790-15
Flexural Modulus	1520 MPa	2710 MPa	220 ksi	393 ksi	ASTM D 790-15
Thermal Properties	METRIC		IMPERIAL		METHOD
	GREEN	POST-CURED 15MIN @ 60C	GREEN	POST-CURED 15MIN @ 60C	
Heat Deflection Temp. @ 1.8 MPa	49 °C	55 °C	120 °F	131 °F	ASTM D 648-16
Heat Deflection Temp. @ 0.45 MPa	56 °C	65 °C	133 °F	149 °F	ASTM D 648-16

Tabla 13 Datasheet Clear V4.1 en Formlabs [23]

3.3. ONYX

Composite Base	Test (ASTM)	Onyx
Tensile Modulus (GPa)	D638	2.4
Tensile Stress at Yield (MPa)	D638	40
Tensile Stress at Break (MPa)	D638	37
Tensile Strain at Break (%)	D638	25
Flexural Strength (MPa)	D790 ¹	71
Flexural Modulus (GPa)	D790 ¹	3.0

Tabla 14 Datasheet Onyx en Markforged [24]

3.4. PU RIGID 10K

	METRIC				METHOD
	Green	UV Cure ¹	UV + Thermal Cure ²	UV Cure + Media Blast	
Tensile Properties					
Ultimate Tensile Strength	55 MPa	65 MPa	53 MPa	88 MPa	ASTM D638-14
Tensile Modulus	7.5 GPa	10 GPa	10 GPa	11 GPa	ASTM D638-14
Elongation at Break	2%	1%	1%	1.7%	ASTM D638-14
Flexural Properties					
Flexural Strength	84 MPa	126 MPa	103 MPa	158 MPa	ASTM D 790-15
Flexural Modulus	6 GPa	9 GPa	10 GPa	9.9 GPa	ASTM D 790-15

Tabla 15 Datasheet PU Rigid 10K en Formlabs [25]