



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Programa de Doctorado en Ingeniería Mecánica, Fluidos y Aeronáutica

TESIS DOCTORAL

Contribución al desarrollo de una metodología de diseño para la fabricación con tecnologías aditivas de piezas con alta variabilidad de demanda

Autor:	Sergio Morales Planas
Director:	Joan Ramón Gomà Ayats
Co-Director:	Joaquim Minguella Canela

Departamento de Ingeniería Mecánica (UPC)

Departamento de I+D (FLUIDRA)

Barcelona, noviembre 2018

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría expresar mis agradecimientos a aquellos quienes me han alentado y me han dado soporte durante el transcurso de la presente tesis doctoral.

Me gustaría dar las gracias a mi tutor en la empresa, David Tapias, por abrirme las puertas a la organización y cuyo seguimiento ha sido la clave del éxito de dicho trabajo. Por supuesto, a los directores por parte de la universidad, Joan Ramón Gomà y Joaquim Minguella por haberme guiado durante el transcurso del proyecto. También agradecer a María Antonia de los Santos por el gran soporte durante la confección y escritura del presente trabajo.

Agradecer a mis mentores del departamento de I+D y cadena de suministro de Fluidra todo el apoyo depositado, las grandes sugerencias proporcionadas, la disponibilidad para la resolución de cualquier duda y la especial atención que habéis tenido hacia mi persona. Todo ello ha influido en mi exponencial crecimiento personal y la mayor parte os lo debo a vosotros: Armand Puiggrós, Jorge Macías, David Giménez, Oriol Falques, Vicente de la Luna, Joan Dellà, J.M. Pubill, Marc Albajar y Maite Barluenga.

Especiales agradecimientos a mis compañeros de Cepex, Sacopa, Metalast, Poltank, Fluidra Industry France y Unistral Recambios que han contribuido en el deseo de convertirme en un auténtico profesional, proporcionándome una infinidad de consejos y conocimientos, además de sus incondicionales ánimos durante el transcurso de dicho trabajo.

Agradecer también la colaboración de José Antonio Travieso y Jordi Llumà por parte de la UPC. Andrés García, Guillermo Reyes y Giovanni Gómez por parte de la IQS. Javier Munguia de la universidad de Newcastle. Mariano Jiménez y José Porrás del ICAI. Magí Galindo de LEITAT. Albert Calleja, Roxana Vlad y Marta Vilardell de Oxolutia. Ernest Bou de Nexeo 3D. Enric Sirera y Toni López de Ultrasion. Jaume Homs, Inma Vázquez, Marga Bardeci y todo el equipo de HP. Incluir también el personal que me ha dado soporte desde Pantur, Materialise, Fundació CIM, Ricoh, Maquinser, Balentec, UOC, Optimus 3D, UNED y Eurecat.

A mis compañeros y amigos Damià Valero y Alejandro Robledillo que me han ayudado con sus conocimientos en disciplinas que desconocía.

Por último, quiero dedicar unas palabras a mis padres Santiago y Yolanda por haberme enseñado el valor de la perseverancia y la disciplina para conseguir mis metas. También, a mi hermana Laura y a Ana por su apoyo incondicional en todo momento.

Resumen

La presente tesis es el fruto de la colaboración entre la universidad (UPC) y la empresa (Fluidra S.A.) dentro del marco del programa de doctorados industriales de la agencia AGAUR (Agencia de Gestión de Ayudas Universitarias y de Investigación) de la Generalitat de Catalunya. Fluidra es un grupo de empresas que se dedican principalmente a la fabricación, desarrollo, distribución y comercialización de equipamiento para piscina, residencial y pública. La compañía opera con más de 20.000 referencias, fabricadas en diferentes centros productivos alrededor del mundo y comercializados en más de 170 países. Para los artículos con poca demanda y una comercialización global, los costes unitarios asociados son altos, de ahí la necesidad de innovar en la búsqueda de nuevas soluciones que optimicen los costes de producción y la cadena de suministro de dichos artículos. Por ello, la propuesta es el uso de la fabricación aditiva para la producción de aquellos artículos con baja demanda con el fin de optimizar los costes asociados a la fabricación y el suministro.

El objetivo principal de la tesis es realizar una metodología de diseño y fabricación que permita a los ingenieros transformar la manera de producir, de los procesos convencionales a la fabricación digital con tecnologías aditivas. Existen una serie de barreras tecnológicas en la fabricación aditiva, como son la tecnología, el material, el diseño y las referencias, que hacen que la transformación digital no sea trivial. Por ello, es necesario la creación de un método que sea capaz de superar las barreras técnicas y económicas con el objetivo de transformar el proceso de producción de forma satisfactoria. A nivel de organización, los objetivos que se han marcado son decrementar la depreciación económica-contable causada por el tiempo de permanencia en stock de los artículos, reducir o eliminar el riesgo de obsolescencia de las referencias y reducir el tiempo de entrega de recambios para dar un mejor servicio de suministro al cliente. Seguidamente, se explican los pasos que se han llevado a cabo para la realización de dicha metodología de diseño y fabricación.

En primer lugar, se ha realizado un análisis de datos, provenientes de la empresa de recambios del grupo Fluidra: Unistral Recambios, con el fin de cuantificar el impacto y el alcance de la metodología en términos de número de referencias susceptibles y su facturación. Inicialmente, se han analizado unas 8.403 referencias diferentes obtenidas del histórico, más de 350.000 líneas o comandas. Seguidamente, dichas referencias se han categorizado según su tipología (plástico, elementos mecánicos, juntas, etc.). Las

referencias cuya categoría es “plástico” son de interés para fabricarlas mediante tecnologías aditivas ya que coincide la capacidad tecnológica actual con la necesidad industrial. Del total de las referencias, más de un 30% son piezas de plástico, suponiendo más de un 19% de la facturación total de la empresa. Después de un análisis exhaustivo se han filtrado las piezas plásticas por dos criterios: la estrategia de suministro, donde un 95% de referencias se fabrican cuando se comandan (MTO), y por el volumen ocupado, donde el 75% de las referencias están por debajo de los 4 dm³. Aplicando dichos filtros, se han analizado unas 1.847 referencias que corresponde al 13,8% de la facturación total.

En segundo lugar, la gran cantidad de referencias ha generado la necesidad de realizar una lista de artículos preferentes de ser producidos mediante fabricación aditiva, definiendo tres criterios de ordenación: el valor en el diseño de la pieza, la rotación de ventas y el tiempo de entrega a cliente. Estos criterios se han normalizado y ponderado por igual para conseguir una lista de referencias preferentes de estudio.

En tercer lugar, se ha desarrollado una metodología basada en un sistema de soporte a la toma de decisiones a partir del conocimiento adquirido, también llamado sistema experto. El modelo se ha entrenado con la experiencia de una serie de casos de exploración. Este sistema proporciona una guía de diseño, fabricación y postprocesos que ayuda al usuario a tomar una decisión sobre el proceso de fabricación. Además, dicho sistema verifica la viabilidad técnica y económica de la fabricación aditiva para una referencia en concreto. La metodología está formada por cuatro bloques principales: la apariencia, los elementos y las características de diseño, así como la funcionalidad de la pieza. El modelo se basa en la tecnología *Multi Jet Fusion* (MJF) y la poliamida 12 (PA12) como material, que se ha escogido, después de un análisis de diferentes tecnologías, por las siguientes razones: las propiedades de estanqueidad, la precisión dimensional, la repetitividad y la escalabilidad del proceso. Posteriormente, se ha realizado un análisis de representación muestral del sistema de conocimiento con 100 referencias aleatorias de dicha lista, que corresponde al 5% de toda la muestra, obteniendo un 88% de representación e identificando el marco de aplicación del método. Además, se ha desarrollado un sistema de estimación de costes de fabricación y suministro a partir del modelo desarrollado por Hopkinson y Dickens, 2003. En esta parte se comparan los costes de fabricar la referencia mediante MJF y PA12 en el centro logístico y fabricarlo mediante inyección de plástico en el centro productivo. A partir de los datos introducidos en el análisis de costes, se genera la gráfica que determina cuál es el punto de corte, que separa la viabilidad económica de fabricar la pieza mediante MJF o por inyección de plástico. En conclusión, esta metodología sirve para que un

usuario inexperto pueda, a partir del conocimiento de algunos aspectos técnicos y de los costes asociados de una referencia, decidir sobre la viabilidad de la transformación del proceso, de analógico a digital.

En cuarto lugar, se ha aplicado la metodología propuesta a los cuatro primeros artículos obtenidos de la lista de referencias preferentes para validar su funcionamiento, obteniendo unos resultados satisfactorios en todos los casos. De dichas referencias se han estimado los costes asociados y los tiempos de entrega obtenidos por fabricación aditiva para calcular finalmente la variación respecto el sistema tradicional de fabricación y suministro. Dichos cálculos se han extrapolado a todas las piezas del tipo “plástico” obteniendo unos ahorros del 43% sobre el valor del inventario, sin contar con el ahorro asociado a la fabricación a demanda que depende de cada referencia. Además, se ha valorado una reducción del tiempo de entrega al cliente de hasta un 95%.

En conclusión, se trata de una contribución metodológica extrapolable a cualquier organización que pretende adoptar los sistemas de fabricación aditiva basados en plásticos en su entramado industrial. Además, se ha conseguido avanzar en el estado del arte con un método, basado en un sistema experto, que se diferencia de los demás por las siguientes razones: se focaliza en el proceso MJF y PA12, proporciona sugerencias de rediseño, fabricación y postprocesos y valora la factibilidad técnica y económica de la transformación digital. Fruto de dicho estudio se han determinado cuales son las limitaciones tecnológicas y de los materiales que no permiten la introducción masiva de la fabricación aditiva en las empresas productivas.

Palabras clave: Fabricación aditiva, metodología, MJF, inventario, producción.

Abstract

This thesis is the result of collaboration between the university (UPC) and the company (Fluidra SA) within the framework of the program of industrial doctorates of the agency AGAUR (Agencia de Gestión de Ayudas Universitarias y de Investigación) of the Generalitat de Catalunya. Fluidra is a group of companies that are mainly engaged in the manufacture, development, distribution and marketing of equipment for swimming pool, residential and public. The company operates with more than 20.000 references, manufactured in different factories around the world and marketed in more than 170 countries. For references with low demand and global marketing, the associated unit costs are high, hence the need to innovate in the search for new solutions that optimize production and the supply chain costs. Therefore, the project proposal is the use of additive manufacturing to produce these references.

The main objective of the thesis is to develop a design and manufacturing methodology that allows engineers to transform the way of producing, from conventional processes to digital manufacturing with additive technologies. There are several technological barriers in additive manufacturing, such as technology, material, design and references, which make digital transformation not easy. Therefore, it is necessary to create a method that can overcome technical and economic barriers in order to transform the production process in a satisfactory way. The company objectives are to decrease the economic-accounting depreciation, caused by the time of stock permanence, reduce or eliminate the risk of obsolescence and reduce the time of delivery of spare parts to give a better service of supply to the customer.

Firstly, an analysis of data has been carried out, coming from the Fluidra spare parts company: Unistral Recambios, in order to quantify the impact in terms of the number of references and their turnover. Initially, 8.403 different references were analysed, it corresponds of more than 350.000 orders. Next, these references have been categorized in (plastic, mechanical, seals, etc.). The references whose category is "plastic" are suitable to be manufactured using additive technologies, because technological capacity coincides with the industrial needs. Of the total of references, more than 30% are plastic parts, corresponding to 19% of the total turnover of the company. After an exhaustive analysis, the plastic parts have been filtered by two criteria: the supply strategy, where 95% of references are manufactured when they are ordered (MTO), and by the volume occupied, where 75% of the references are below 4 dm³. Applying these filters, 1.847 references have been analysed, corresponding to 13,8% of the total turnover.

Secondly, a list of preferred references to be produced by additive manufacturing has been performed throughout three sorting criteria: the value in the design, the sales rotation and the time of delivery to customer. These criteria have been normalized and weighted equally to obtain a list of preferred study references.

Third, a methodology based on a decision support system has been developed based on the acquired knowledge, also known as the expert system. The model has been trained with the experience of several exploration cases. This system provides a design, manufacturing and post-processing guide that helps the user to decide about the manufacturing process. In addition, this system verifies the technical and economic feasibility of additive manufacturing for a specific reference. The methodology is made by four main blocks: the appearance, the design elements, the design characteristics and the functionality of the part. The model is based on Multi Jet Fusion technology (MJF) and polyamide 12 (PA12) as material, which has been chosen, after an analysis of different technologies for the following reasons: sealing properties, dimensional accuracy, the reliability and scalability of the process. Furthermore, the representation analysis of the knowledge system was carried out with 100 random references of the list, corresponding to 5% of the entire sample. The results show an 88% of representation and the application's framework. In addition, a system for estimating manufacturing and supply costs has been performed based on the model developed by Hopkinson and Dickens, 2003. This model compares the costs of manufacturing the reference through MJF and PA12 in the central warehouse and manufacturing it by injection moulding in the factory. Throughout the input data a plot is generated, and it determines the break-even point, which separates the economic viability of manufacturing the parts by MJF or by injection moulding. In conclusion, this methodology helps into decision making to any user without experience in MJF. This method is based on some technical aspects and the associated costs of a reference and helps to decide on the feasibility of transforming the process, from analogical to digital.

Fourth, the proposed methodology has been applied to the first four references obtained from the list of preferred references to validate its performance, obtaining satisfactory results in all cases. From these references, the associated costs and delivery times obtained by additive manufacturing have been estimated to calculate the variation versus the traditional manufacturing and supply system. These calculations have been extrapolated to all the "plastic" parts obtaining a savings of 43% over the inventory value, without considering the savings of the manufacturing on demand because it depends on each reference. In addition, a reduction of the delivery time to the customer of up to 95% has been achieved.

In conclusion, it is a contribution of a methodology that can be applied to any organization that need to adopt additive manufacturing systems based on plastics. In addition, a progress of the state of the art of the expert systems applied to additive manufacturing has been achieved, which differs from the others for the following reasons: it focuses on the MJF and PA12, provides suggestions for redesign, manufacturing and postprocessing and assesses the technical and economic feasibility of digital transformation. The result of this study has been finished with the identification of the several technological and material limitations that do not allow the massive introduction of additive manufacturing in the factories.

Keywords: Additive manufacturing, methodology, MJF, inventory, production.

Tesis presentada por Sergio Morales Planas para obtener el título de
Doctor por la Universitat Politècnica de Catalunya

In God we trust; all others bring data

W. Edwards Deming

Este proyecto está cofinanciado por la Agencia de Gestión de Ayudas Universitarias y de Investigación (AGAUR)

[2015 DI 029]

Este proyecto está cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional de la Unión Europea en el marco del Programa Operativo FEDER de Cataluña 2014-2020

ACCIÓ



Generalitat de Catalunya



**Unió Europea
Fons Europeu
de Desenvolupament Regional**

Contenido

Resumen	i
Abstract	v
Contenido	xv
Figuras	xix
Tablas	xxv
Glosario de términos	xxvii
1 Introducción	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Contenido de la tesis	3
1.4 Difusión de los resultados de la tesis.....	5
2 Contexto de la fabricación aditiva	7
2.1 La industrialización y la transformación digital	7
2.2 La fabricación aditiva	11
2.3 La integración con los procesos convencionales de fabricación.....	17
2.4 El cambio de paradigma en el diseño y el aporte de valor.....	19
3 Estado del arte de las metodologías en fabricación aditiva	27
3.1 Metodologías de diseño y fabricación.....	27
3.2 Sistemas de soporte a la toma de decisiones (DSS).....	28
3.2.1 Sistemas expertos (DSS-KD).....	30
3.3 DSS aplicados a la fabricación aditiva	31
3.4 Limitaciones y oportunidades de investigación	37
3.5 Diagrama del proceso para realizar la metodología.....	38
3.6 Diseño y fabricación mediante Multi Jet Fusion	39
3.6.1 Apariencia	40
3.6.2 Diseño de piezas plásticas	43
3.6.3 Fabricación con MJF	53
4 Análisis de la situación actual	57
4.1 Contexto.....	57

4.2	Procedimiento del análisis	59
4.3	Elección de la tecnología de fabricación aditiva.....	64
5	Desarrollo de la metodología	67
5.1	Método de ordenación	67
5.1.1	Criterio 1: Alto valor añadido en el diseño	68
5.1.2	Criterio 2: Baja rotación de ventas	72
5.1.3	Criterio 3: Tiempos de entrega	73
5.1.4	Ponderación de los criterios	74
5.2	Método de diseño y fabricación	75
5.2.1	Casos de exploración o aprendizaje	77
5.2.2	Representación muestral de la metodología	81
5.2.3	Implementación de la metodología.....	82
5.2.4	N-0: Entradas y salidas del sistema DSS	83
5.2.5	N0: Representación de los bloques.....	84
5.2.6	N1: Apariencia.....	86
5.2.7	N2: Elementos del diseño.....	89
5.2.8	N3: Características del diseño.....	93
5.2.9	N4: Funcionalidad	98
5.2.10	N5: Combinaciones de sugerencias y conclusiones	100
5.3	Integración de la metodología en un sistema informatizado	102
6	Aplicación de la metodología a casos prácticos	109
6.1	Procedimiento de la validación	109
6.2	Caso de estudio 1: Rodete de bomba.....	109
6.3	Caso de estudio 2: Tapa para filtro	114
6.4	Caso de estudio 3: Hélice	119
6.5	Caso de estudio 4: Placa de cojinetes	124
7	Discusión de los resultados	129
7.1	Resultados de la metodología.....	129
7.2	Procedimiento para la implantación	131
7.3	Identificación de los principales retos y barreras	134
8	Conclusiones	137
8.1	Trabajo de futuro.....	138
Anexo A: Válvula de diafragma.....		141
Anexo B: Venturi		151

Anexo C: Soporte para válvula	155
Anexo D: Manipulador de inyección	171
Anexo E: Customización de un robot	177
Anexo F: Bomba hidráulica.....	181
Anexo G: Válvula de bola	187
Referencias.....	205

Figuras

Figura 2.1. Tipologías de tecnologías de fabricación. Fuente: [8].	12
Figura 2.2. Clasificación de tecnologías rápidas. Fuente: [8].	15
Figura 2.3. Ciclo elaborado a partir de Gartner Hype Cycle de agosto 2010 y Julio 2015. Fuente: Propia.	15
Figura 2.4. Clasificación de los procesos de fabricación. Fuente: [8].	17
Figura 2.5. Comparativa del coste/cantidad (izquierda) y coste unitario (derecha). Fuente:[8].	22
Figura 3.1. Esquema de toma de decisiones basado en el conocimiento. Fuente: [60].	31
Figura 3.2. Diagrama de flujo seguido en el presente trabajo. Fuente: Propia.	38
Figura 3.3. Flujo de trabajo propuesto para la MJF. Fuente: [100].	40
Figura 3.4. Flujo de trabajo de granallado y chorreado de aire. Fuente: [100].	41
Figura 3.5. Flujo de trabajo del chorreado automático. Fuente: [100].	41
Figura 3.6. Flujo de trabajo de la infiltración de color. Fuente: [100].	42
Figura 3.7. Flujo de trabajo en el proceso de pintado. Fuente: [100].	43
Figura 3.8. Flujo de trabajo en el proceso de granallado. Fuente: [100].	43
Figura 3.9. Tipos de engarces. Fuente: [101].	44
Figura 3.10. Relación de aspecto de engarces. Fuente: [102].	44
Figura 3.11. (a) Tornillo de chapa, (b) tornillo de madera y (c) tornillo para plástico. Fuente: [101].	45
Figura 3.12. Variables que influyen en la capacidad de carga de una unión atornillada. Fuente: [101].	46
Figura 3.13. Deformación del material sometido a una fuerza de compresión. Fuente: [101].	46
Figura 3.14. (a) Arandelas de resorte (b) Arandela tensora. Fuente: [101].	47
Figura 3.15. (a) Unión con tornillo (b) Tuerca de fijación rápida. Fuente: [101].	47
Figura 3.16. Unión realizada con tornillo y tuerca. Fuente: [101].	48
Figura 3.17. Unión realizada con tornillo, tuerca y casquillo. Fuente: [101].	48
Figura 3.18. Tipos de insertos metálicos roscados. Fuente: [101].	48
Figura 3.19. (a) Inserto metálico hembra (b) Inserto metálico macho. Fuente: [101].	49
Figura 3.20. Reglas de diseño para los insertos roscados. Fuente: [101].	49
Figura 3.21. Disposición de un casquillo. Fuente: [101].	50
Figura 3.22. Disposición de los topes y casquillos. Fuente: [101].	50
Figura 3.23. Diseño para unión mediante adhesivos. Fuente: [101].	51

Figura 3.24. Resistencia a la flexión para diferentes estructuras. Fuente: [101].	52
Figura 3.25. Resistencia a la torsión para diferentes estructuras. Fuente: [101].	52
Figura 4.1. Infraestructura interna del grupo Fluidra. Fuente: Propia.	57
Figura 4.2. Flujo de trabajo de suministro de recambios. Fuente: Propia.	58
Figura 4.3. Número de referencias y porcentaje de las categorías de producto. Fuente: Propia.	60
Figura 4.4. Facturación y porcentaje sobre el total de las categorías. Fuente: Propia.	60
Figura 4.5. Distribución A-B-C de todas las referencias. Fuente: Propia.	61
Figura 4.6. Representación de la rotación para todas las referencias. Fuente: Propia.	62
Figura 4.7. Clasificación de las referencias en MT?, MTS y MTO. Fuente: Propia.	62
Figura 4.8. Diagrama de caja para los tiempos de entrega de las referencias. Fuente: Propia.	63
Figura 4.9. Diagrama de caja para los volúmenes de las referencias. Fuente: Propia.	63
Figura 5.1. Representación de dispersión de la lista de referencias. Fuente: Propia.	70
Figura 5.2. Representación de dispersión de la lista de referencias por grupos. Fuente: Propia.	70
Figura 5.3. Representación de las áreas de la lista de referencias. Fuente: Propia.	71
Figura 5.4. Distribución A-B-C de la lista de referencias. Fuente: Propia.	72
Figura 5.5. Representación de la relación de la lista de referencias. Fuente: Propia.	73
Figura 5.6. Tiempos de entrega por productiva. Fuente: Propia.	74
Figura 5.7. Esquema de entradas y salidas del sistema experto propuesto. Fuente: Propia.	76
Figura 5.8. Cadena de valor de un producto y aportación de la FA. Fuente: Propia.	77
Figura 5.9. Esquema de elementos del sistema KBS. Fuente: Propia.	82
Figura 5.10. Esquema de nodos para el sistema KBS. Fuente: Propia.	83
Figura 5.11. Representación de IDEF0 para el nodo N-0. Fuente: Propia.	84
Figura 5.12. Representación de IDEF0 para el nodo N0. Fuente: Propia.	85
Figura 5.13. Representación de IDEF0 para el nodo N1. Fuente: Propia.	86
Figura 5.14. Árbol de decisión del bloque 1 y las diferentes permutaciones. Fuente: Propia.	87
Figura 5.15. Representación de IDEF0 para el nodo N2. Fuente: Propia.	89
Figura 5.16. Árbol de decisión del bloque 2 y las diferentes permutaciones. Fuente: Propia.	90
Figura 5.17. Representación de IDEF0 para el nodo N3. Fuente: Propia.	93
Figura 5.18. Árbol de decisión del bloque 3 y las diferentes permutaciones. Fuente: Propia.	95
Figura 5.19. Representación de IDEF0 para el nodo N4. Fuente: Propia.	99

Figura 5.20. Árbol de decisión del bloque 4 y las diferentes permutaciones. Fuente: Propia.....	100
Figura 5.21. Representación de IDEF0 para el nodo N5. Fuente: Propia.....	101
Figura 5.22. Esquema de programas y aplicativos utilizados para la integración. Fuente: Propia.....	102
Figura 5.23. Interfaz de usuario del sistema DSS (1/2). Fuente: Propia.....	103
Figura 5.24. Interfaz de usuario del sistema DSS (2/2). Fuente: Propia.....	103
Figura 5.25. Resultados gráficos del informe. Fuente: Propia.....	104
Figura 5.26. Análisis de costes del informe. Fuente: Propia.....	105
Figura 5.27. Variables de entrada del informe. Fuente: Propia.....	106
Figura 5.28. Resultados del informe. Fuente: Propia.....	107
Figura 6.1. (a) Bomba hidráulica (b) Rodete de bomba. Fuente: Propia.....	109
Figura 6.2. Cuadro resumen de las preguntas, respuestas y las conclusiones del caso de estudio 1. Fuente: Propia.....	112
Figura 6.3. Montaje y desmontaje de la bomba hidráulica. Fuente: Propia.....	113
Figura 6.4. Resultados del análisis económico para el caso 1. Fuente: Propia.....	113
Figura 6.5. (a) Robot de piscina (b) Compuerta del filtro. Fuente: Propia.....	114
Figura 6.6. Cuadro resumen de las preguntas, respuestas y las conclusiones del caso de estudio 2. Fuente: Propia.....	117
Figura 6.7. Montaje y desmontaje del robot de piscina. Fuente: Propia.....	118
Figura 6.8. Resultados del análisis económico para el caso 2. Fuente: Propia.....	118
Figura 6.9. (a) Robot de piscina (b) Hélice. Fuente: Propia.....	119
Figura 6.10. Cuadro resumen de las preguntas, respuestas y las conclusiones del caso de estudio 3. Fuente: Propia.....	122
Figura 6.11. Montaje y desmontaje del robot de piscina. Fuente: Propia.....	123
Figura 6.12. Resultados del análisis económico para el caso 3. Fuente: Propia.....	123
Figura 6.13. (a) Robot de piscina (b) Placa de cojinetes. Fuente: Propia.....	124
Figura 6.14. Cuadro resumen de las preguntas, respuestas y las conclusiones del caso de estudio 4. Fuente: Propia.....	126
Figura 6.15. Montaje y desmontaje del robot de piscina. Fuente: Propia.....	127
Figura 6.16. Resultados del análisis económico para el caso 4. Fuente: Propia.....	127
Figura 7.1. Ahorro de los costes de suministros respecto el nuevo modelo. Fuente: Propia.....	129
Figura 7.2. Ahorro de los tiempos de entrega para los dos modelos de suministro. Fuente: Propia.....	130
Figura 7.3. Prospección de la fábrica de futuro. Fuente: Propia.....	131

Figura 7.4. Metodología para transformar digitalmente la organización. Fuente: Propia.	132
Figura 7.5. Propuesta del flujo de trabajo para el suministro de recambios. Fuente: Propia.	133
Figura A.1. Válvula de diafragma. Fuente: CEPEX S.A.U.	141
Figura A.2. Esquema de funcionamiento de la válvula de diafragma. Fuente: CEPEX S.A.U.	142
Figura A.3. Despiece de la válvula de diafragma. Fuente: CEPEX S.A.U.	142
Figura A.4. Parte superior de la válvula manual. Fuente: CEPEX S.A.U.	147
Figura A.5. Rediseño para fabricar en FA. (a) Posición de cierre total y (b) Posición apertura total. Fuente: Propia.	148
Figura A.6. (a) Rosca de dientes de sierra (b) Diseño final. Fuente: Propia.	148
Figura A.7. Diseño de las evacuaciones de polvo en color rojo. Fuente: Propia.	149
Figura B.1. Representación del venturi y la válvula descalcificadora. Fuente: Propia.	151
Figura B.2. Distribución circular (izquierda) y distribución aleatoria (derecha). Fuente: Propia.	152
Figura C.1. Diseño de la válvula automática de membrana. Fuente: CEPEX.	155
Figura C.2. Vista explosionada válvula manual (izquierda) y sección de la válvula automática (derecha). Fuente: CEPEX.	155
Figura C.3. Simulación del tiempo y material utilizado para el diseño sin optimizar. Fuente: Propia.	157
Figura C.4. Alabeo producido por las contracciones del material según el porcentaje de relleno. Fuente: Nexeo 3D.	158
Figura C.5. Elementos del sistema. Fuente: Nexeo 3D.	158
Figura C.6. Dominios de diseño (rojo) y no diseño (azul). Fuente: Nexeo 3D.	159
Figura C.7. Soporte en superficie en rojo. Fuente: Nexeo 3D.	159
Figura C.8. Soportes de la tornillería en amarillo. Fuente: Nexeo 3D.	159
Figura C.9. Estadio 1: Válvula totalmente abierta. Fuente: Nexeo 3D.	160
Figura C.10. Estadio 2: Válvula totalmente cerrada. Fuente: Nexeo 3D.	160
Figura C.11. Curvas de tensión deformación de Novamid® ID1030. Fuente: Nexeo 3D.	161
Figura C.12. Modelo original (izquierda). Modelo corregido (derecha). Fuente: Propia.	161
Figura C.13. Ensayos de humedad en Novamid® ID1030. Fuente: Nexeo 3D.	163
Figura C.14. Esquema neumático del sistema de ensayo. Fuente: Propia.	163

Figura C.15. Desplazamientos del material para el modelo macizo. Fuente: Nexeo 3D.	164
Figura C.16. Estrés de Von Mises para el modelo macizo. Fuente: Nexeo 3D.	165
Figura C.17. Estrés de Von Mises focalizado en las fijaciones. Fuente: Nexeo 3D. ...	165
Figura C.18. Resultados de la optimización topológica. Fuente: Nexeo 3D.	166
Figura C.19. Resultados de desplazamiento en el diseño optimizado. Fuente: Nexeo 3D.	166
Figura C.20. Resultado de estrés de Von Misses en el diseño optimizado. Fuente: Nexeo 3D.....	167
Figura C.21. Simulación del tiempo y material utilizado para el diseño optimizado. Fuente: Propia.	167
Figura C.22. Punto de encuentro para el diseño original y el optimizado. Fuente: Propia.	169
Figura C.23. Imagen del ensayo según el protocolo. Fuente: Propia.	170
Figura D.1. Diseño de la pinza robótica. Fuente: Propia.	171
Figura D.2. Simulación de la impresión. Fuente: Propia.....	175
Figura E.1. Piezas susceptibles a la personalización de un robot. Fuente: Propia. ...	177
Figura E.2. Diseño para la personalización de la tapa. Fuente: Propia.	179
Figura E.3. Personalización de la tapa mediante PJ. Fuente: Propia.	179
Figura E.4. Embellecedor inyectado (superior) y personalización (inferior). Fuente: Propia.....	180
Figura F.1. Propuesta de diseño para una bomba hidráulica de 1 CV. Fuente: Propia.	182
Figura F.2. (a) Piezas impresas y pintadas. (b) Ensamblaje total de la bomba hidráulica. Fuente: Propia.	182
Figura F.3. Proceso de fabricación de los rodetes de bomba. Fuente: Propia.....	183
Figura F.4. Curvas características de la bomba hidráulica fabricada. Fuente: Propia.	184
Figura F.5. Potencia consumida respecto el caudal proporcionado. Fuente: Propia.	184
Figura G.1. Comparación de las propiedades mecánicas para PA12 con SLS y MJF. Fuente: Propia.	187
Figura G.2. (a) Piezas impresas con PA12 con SLS. (b) Piezas impresas con MJF en PA12. Fuente: [127].	188
Figura G.3. Esquema de la válvula ensamblada. Fuente: [134].	190
Figura G.4. Vista explosionada de la válvula de bola. Fuente: [134].	191
Figura G.5. (a) Orientación del cuerpo, (b) Orientación de las tuercas en el espacio de impresión. Fuente: Propia.....	192

Figura G.6. (a) Análisis geométrico del cuerpo (b) y de las tuercas. Fuente: Propia.	192
Figura G.7. Ensayo de presión. Fuente: Propia.	196
Figura G.8. Resultados del ensayo a presión del cuerpo. Fuente: [109].	197
Figura G.9. Resultados del ensayo de presión en el asiento y el empaquetamiento. Fuente: [109].	198
Figura G.10. Caudal de fuga y diferencial de presión para los diferentes especímenes. Fuente: [109].	199
Figura G.11. Análisis DSC para la PA12 de MJF. Fuente: Propia.	200
Figura G.12. Análisis DSC-TGA para la PA12 de MJF. Fuente: Propia.	201
Figura G.13. Análisis IR de la PA12 a 300°C. Fuente: Propia.	201
Figura G.14. Análisis IR de la PA12 a 400°C. Fuente: Propia.	202
Figura G.15. Test de tensión-deformación para diferentes direcciones. Fuente: [109].	203

Tablas

Tabla 2.1. Clasificación de las tecnologías de FA según el aporte de energía y el material. Fuente: [8].	13
Tabla 3.1. Técnicas de soldadura y generación de calor. Fuente: [101].	51
Tabla 3.2. Características técnicas de fabricación de MJF. Fuente: [102].	53
Tabla 4.1. Datos obtenidos del conjunto de todas las referencias de Pareto. Fuente: Propia.	61
Tabla 5.1. Datos obtenidos del conjunto de referencias de Pareto. Fuente: Propia.	72
Tabla 5.2. Matriz de conocimiento y su fuente de adquisición. Fuente: Propia.	80
Tabla 5.3. Resultado del análisis de las referencias. Fuente: Propia.	81
Tabla 5.4. Sistema de permutaciones para el bloque 1. Fuente: Propia.	87
Tabla 5.5. Sistema de permutaciones para el bloque 2. Fuente: Propia.	91
Tabla 5.6. Sistema de permutaciones para el bloque 3. Fuente: Propia.	96
Tabla 5.7. Sistema de permutaciones para el bloque 3. Fuente: Propia.	100
Tabla 6.1. Matriz de los puntos de conocimientos utilizados. Fuente: Propia.	110
Tabla 6.2. Desglose de costes para el rodete de bomba. Fuente: Propia.	114
Tabla 6.3. Tiempos de entrega medio del rodete en base 100. Fuente: Propia.	114
Tabla 6.4. Matriz de los puntos de conocimientos utilizados. Fuente: Propia.	115
Tabla 6.5. Desglose de costes para la tapa. Fuente: Propia.	118
Tabla 6.6. Tiempos de entrega medio de la tapa en base 100. Fuente: Propia.	119
Tabla 6.7. Matriz de los puntos de conocimientos utilizados. Fuente: Propia.	120
Tabla 6.8. Desglose de costes para la hélice. Fuente: Propia.	124
Tabla 6.9. Tiempos de entrega medio de hélice en base 100. Fuente: Propia.	124
Tabla 6.10. Matriz de los puntos de conocimientos utilizados. Fuente: Propia.	125
Tabla 6.11. Desglose de costes para la placa. Fuente: Propia.	128
Tabla 6.12. Tiempos de entrega medio de la placa en base 100. Fuente: Propia.	128
Tabla A.1. Lista del despiece de la válvula de diafragma. Fuente: CEPEX S.A.U.	142
Tabla A.2. Descripción paso a paso del ensamblaje de la válvula. Fuente: Propia.	143
Tabla B.1: Resultado de los experimentos. Fuente: Propia.	152
Tabla C.1. Número y descripción de las piezas. Fuente: CEPEX.	156
Tabla C.2. Análisis de costes para el diseño sin optimizar. Fuente: Propia.	157
Tabla C.3. Propiedades mecánicas del material Novamid® ID1030. Fuente: Nexeo 3D.	161
Tabla C.4. Valores especificados para la simulación. Fuente: Propia.	164
Tabla C.5. Análisis de coste comparativo. Fuente: Propia.	168

Tabla C.6. Análisis de coste comparativo para inyección. Fuente: Propia.....	168
Tabla D.1: Propiedades mecánicas del policarbonato comercializado por StratasyS. Fuente: StratasyS.....	173
Tabla D.2: Tabla comparativa de los diferentes procesos de fabricación del diseño macizo. Fuente: Propia.	174
Tabla D.3: Comparativa de costes. Fuente Propia.	176
Tabla D.4: Análisis de los resultados obtenidos respecto el original. Fuente: Propia.	176
Tabla F.1. Conexiones de aspiración e impulsión de la bomba a diseñar. Fuente: Propia.	181
Tabla F.2. Valores característicos para el punto de trabajo de 10 m.c.a. Fuente: Propia.	185
Tabla F.3. Valores objetivos contra los valores del ensayo. Fuente: Propia.	185
Tabla G.1. Resultados obtenidos de la porosidad y material para SLS y MJF. Fuente: [127].	188
Tabla G.2. Dimensiones de la válvula utilizada en el caso de estudio. Fuente: [134].	190
Tabla G.3. Lista de piezas de la válvula de bola. Fuente: [134].	191
Tabla G.4. Parámetros de test para el cuerpo con el material PVC-U. Fuente: [138].	194
Tabla G.5. Parámetros del ensayo de asiento y empaquetamiento. Fuente: [139]....	195
Tabla G.6. Valores obtenidos de los ensayos tensión-deformación. Fuente: [109]. ..	203

Glosario de términos

0D: Cero dimensiones

1D: Una dimensión

2D: Dos dimensiones

3D: Tres dimensiones

3DP: *3D Printing*

ABS: *Acrylonitrile Butadiene Styrene*

ADAM: *Atomic Diffusion Additive Manufacturing*

AHP: *Analytic Hierarchy process*

AM: *Additive Manufacturing*

AMF: *Additive Manufacturing File Format*

ANP: *Analytical Network Process*

APD: *Augmented Polymer Deposition*

ASTM: *American Society for Testing and Materials*

BJ: *Binder Jetting*

CAD: *Computer Aided Design*

CAE: *Computer Aided Engineering*

CAM: *Computer Aided Manufacturing*

CAPE: *Computer Aided Process Engineering*

CDLP: *Continuous Digital Light Processing*

CFD: *Computational Fluid Dynamics)*

CLIP: *Continuous Liquid Interface Production*

CN: Control Numérico

DFA: Design For Assembly

DfAM: Design for Additive Manufacturing

DFM: Design for Manufacturing

DIN: German Institute for Standardization

DIY: Do it yourself

DLP: Digital Light Processing

DMLS: Direct Metal Laser Sintering

DOD: Drop on Demand

DSC: Differential Scanning Calorimetry

DSS: Decision Support System

EBAM: Electron Beam Additive Manufacturing

EBM: Electron Beam Melting

EE. UU.: Estados Unidos

ERP: Enterprise Resources Planning

FA: Fabricación Aditiva

FDM: Fused Deposition Modeling

FFF: Fused Filament Fabrication

GE: General Electric

GF: Glass Fiber

HP: Hewlett Packard

HSM: High Speed Machining

HSS: High Speed Sintering

ICAM: Integrated Computer Aided Manufacturing

IDEF: Icam DEFinition for Function Modeling

IRPDMS: Integrated Rapid Prototyping Decision Making System

ISO: International Organization for Standardization

JIT: Just In Time

KBS: Knowledge Based System

LC: Laser Cladding

LENS: Laser Engineering Net Shape

LOM: Laminated Object Manufacturing

MES: Manufacturing execution systems

MFP: Micro fábricas personalizadas

MIT: Massachusetts Institute of Technology

MJF: Multi Jet Fusion

MOD: Manufacturing On Demand

MTO: Make To Order

MTS: Make To Stock

NNS: Near Net Shape

NPJ: Nano Particle Jetting

P2P: Peer to Peer

PA: Polyamide

PC-ABS: Polycarbonate- Acrylonitrile Butadiene Styrene

PE: Polyethylene

PEEK: Polyether ether ketone

PET: Polyethylene terephthalate

PJ: Polyjet

PLA: Polylactic acid

POM: *Polyoxymethylene*

PP: *Polypropylene*

PPO: *Poly(p-phenylene oxide)*

PS: *Polystyrene*

PVC: *Polyvinyl chloride*

QFD: *Quality Function Deployment*

RM: *Rapid Manufacturing*

RMADS: *Rapid Manufacturing Advice System*

RP: *Rapid Prototyping*

RT: *Rapid Tooling*

RTAM: *Rapid Technologies and Additive Manufacturing*

SLA: *Stereolithography*

SLM: *Sintering Laser Melting*

SLS: *Selective Laser Sintering*

SME: *Society of Manufacturing Engineering*

STL: *Standard Triangulation Language*

TAC: *Tomografía Axial Computarizada*

TGA: *Thermal Gravimetric Analysis*

TOPSIS: *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*

TPE: *Thermoplastic elastomers*

TPU: *Thermoplastic Polyurethane*

UDM: *Ultrasonic Deposition Modelling*

UPC: *Universitat Politècnica de Catalunya*

UV: *Ultravioleta*

1 Introducción

En este apartado se explica de forma detallada cuál es el contexto y la motivación que ha llevado a cabo el desarrollo del proyecto. Asimismo, se exponen los objetivos principales a alcanzar y los específicos de la tesis. Además, se presenta la estructura del trabajo con un resumen del contenido de cada capítulo. Por último, se listan los diferentes artículos científicos y congresos publicados o enviados realizados para la difusión de los resultados del trabajo.

1.1 Motivación

El presente trabajo es el resultado de la colaboración entre empresa y universidad dentro del marco de Doctorados Industriales concedido por la Generalitat de Catalunya. Concretamente, se trata del proyecto de doctorados industriales con expediente 2015 DI 029, donde colaboran Fluidra y la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

La empresa Fluidra es un grupo multinacional, que cotiza en la bolsa española, dedicado al desarrollo de aplicaciones para el uso sostenible del agua al servicio del bienestar y de la salud de las personas. Estas aplicaciones están asociadas al amplio campo de Piscina y *Wellness*, de uso residencial, comercial o público. Fluidra opera en 45 países a través de delegaciones comerciales y centros de producción ubicados en todos los continentes. El grupo cuenta con un equipo humano en torno a 4.300 personas [1].

La UPC es una universidad pública española de la Generalitat de Catalunya, especializada en arquitectura, ingeniería, ciencia y tecnología. Parte de su actividad es generar conocimiento y transferirlo al tejido productivo para incrementar la capacidad de innovación y la competitividad de las empresas. La presente investigación se ha llevado a cabo en el departamento de ingeniería mecánica de la UPC, concretamente en el grupo de investigación en tecnologías de fabricación (TECNOFAB). Dicho grupo focaliza los esfuerzos en la aplicación e integración de las diferentes tecnologías de fabricación, las metodologías de procesos y los sistemas asistidos por ordenador.

La relación de la universidad con la empresa se concreta en servicios de innovación de alto valor, como son los proyectos de investigación, la generación y explotación de patentes, el uso de espacios o la formación a medida, entre otros [2].

Actualmente, el grupo Fluidra opera con más de 20.000 códigos de referencias, fabricadas en diferentes centros productivos y comercializados alrededor del mundo. Para las referencias con una demanda baja y una comercialización global, los costes unitarios asociados a la fabricación y suministro con tecnologías convencionales son

altos. Por ello se busca innovar en nuevas soluciones que optimicen los costes de la producción y la cadena de suministro de dichos artículos.

El gran catálogo de productos, la tendencia de acortar el ciclo de vida de éstos y el gran número de clientes esparcidos por el mundo, genera una gran cantidad de piezas de producción y de recambios que dificulta en gran medida el suministro. Los procesos de fabricación convencionales, como la inyección de plástico, fueron ideados para fabricar grandes tiradas de piezas. Por ello, no tienen la capacidad de ser flexibles ante las producciones de bajas demandas de referencias, obteniendo unos altos costes asociados. Este último, es el problema industrial que se desea resolver en la siguiente tesis mediante la introducción de tecnologías de fabricación avanzadas. Las tecnologías de fabricación aditiva pueden hacer frente a pequeñas producciones sin necesidad de utillajes, convirtiendo la fabricación de analógica a digital. El uso de estas tecnologías de fabricación no es trivial, siendo necesario un método que permita adaptar el diseño de una pieza dada a las ventajas y limitaciones de la fabricación aditiva. El objetivo de la metodología es sugerir rediseños sobre el modelo tridimensional y recomendar estrategias de fabricación para que se pueda traspasar de forma exitosa la producción, de convencional a aditiva, siempre y cuando sea viable económicamente.

Por ello se pretende realizar una adecuada prospección de las tecnologías de fabricación aditiva para identificar y analizar qué referencias son susceptibles de ser producidas mediante métodos rápidos, asegurando la factibilidad técnica con un coste asumible y rentable para el negocio. En algunas ocasiones, las compañías ven la fabricación aditiva como una nueva tecnología con muchas peculiaridades que puede aportar valor, pero existe un desconocimiento en cómo utilizarlas y por dónde empezar. Dicho trabajo presenta las pautas para dar un paso hacia adelante en la transformación digital de la producción en las empresas.

1.2 Objetivos

El principal objetivo de la tesis es realizar una metodología de diseño y fabricación, que sea capaz de dar soporte a la toma de decisiones para traspasar la fabricación desde los métodos convencionales a los métodos de fabricación aditiva de forma exitosa, teniendo en cuenta los aspectos técnicos y económicos. Se trata pues de establecer la metodología que permita introducir la fabricación aditiva en una compañía que está consolidada con métodos de fabricación convencionales.

El interés de retener el conocimiento en la organización y la imposibilidad de tener todas las tecnologías de fabricación aditiva al alcance conduce a la búsqueda de la tecnología

que más se adapte a la naturaleza del portafolio de productos del grupo Fluidra. Por ello, es necesario realizar un análisis de la situación inicial y llegar a un compromiso entre la capacidad tecnológica y la necesidad industrial. Así, previamente se debe establecer el material y la tecnología de fabricación aditiva más adecuada para la transformación digital de la producción de la compañía.

A continuación, se presentan los objetivos específicos de la metodología:

- Identificar las referencias susceptibles de ser producidas mediante fabricación aditiva.
- Proveer de un sistema que ayude a decidir si es viable transformar la manera de producir, de convencional a aditiva, de una forma rápida y fiable.
- Proporcionar una guía de rediseño y fabricación que permita obtener la funcionalidad deseada de la pieza.
- Generar un sistema que de forma cuantitativa permita establecer la viabilidad técnica y económica de la fabricación aditiva de una referencia.
- Identificar cuáles son las limitaciones tecnológicas y de los materiales que hacen que la fabricación aditiva no se integre de una forma masiva en las empresas.

Para acotar el estudio, el resultado de este trabajo se aplica a la empresa suministradora de recambios del grupo Fluidra, Unistral Recambios S.A. La implementación de la metodología permitirá conseguir los siguientes objetivos de empresa:

- Aumentar la satisfacción del cliente con un suministro de recambios mucho más eficiente.
- Evitar el inventario remanente de las referencias con baja demanda y los costes asociados a éstas.
- Reducir la depreciación económica y el riesgo de obsolescencia de algunas referencias.

Estos últimos objetivos impactan sobre los indicadores contables y financieros de la compañía correspondientes a material inmovilizado. Asimismo, aunque la metodología se aplique en un caso en concreto, dicha metodología se puede extrapolar a cualquier otra empresa.

1.3 Contenido de la tesis

En el **capítulo 1** se muestran la motivación del proyecto y su origen, los objetivos principales y específicos, el contenido de la tesis por capítulos y la difusión de los resultados obtenidos en forma de publicaciones en revistas o congresos.

En el **capítulo 2** se contextualiza la fabricación aditiva enfatizando en la tendencia a la digitalización de los procesos de fabricación. Se recopila información sobre la fabricación aditiva y su integración en los procesos convencionales en la cadena de valor. Además, se analiza cómo este tipo de tecnologías dan pie al cambio del paradigma en el diseño y el aporte de valor frente a los costes.

En el **capítulo 3** se presenta el estado del arte de los sistemas de soporte a la toma de decisiones utilizados en el ámbito de la fabricación aditiva. Se enumeran y explican las diferentes contribuciones de los autores en el desarrollo de sistemas de soporte a la toma de decisiones. Se definen las bases de los sistemas expertos y, finalmente, se identifican las limitaciones de los sistemas presentados y las oportunidades de investigación. Seguidamente, se explica la metodología que se ha utilizado en el desarrollo del presente trabajo y, por último, se ha plasmado en detalle el proceso de diseño y fabricación mediante la tecnología de *Hewlett Parckard, Multi Jet Fusion*.

El **capítulo 4** se realiza un análisis de la situación actual mostrando la problemática a resolver, a partir del análisis de los datos reales y la aplicación de métodos numéricos. En el resultado de esta investigación se desvela la necesidad de innovación en el sector del suministro de recambios y se da a conocer el impacto de dicho proyecto. También se manifiesta la necesidad industrial, pudiendo así, decidir cuál es la tecnología y el material más adecuado para la empresa.

En el **capítulo 5** se desarrolla una metodología de ordenación de referencias o artículos que son más susceptibles de ser fabricadas mediante tecnologías de fabricación aditiva, según tres criterios ponderados del ámbito de las operaciones: el valor añadido en el diseño, la rotación de las ventas y el tiempo de entrega. También se desarrolla una metodología de diseño y fabricación que proporcionan al usuario unas guías para obtener una impresión exitosa, sugiriendo el rediseño de las piezas, si es necesario, para adaptarlas a las potencialidades de las tecnologías de fabricación aditiva. También, se explica en detalle los diferentes casos de estudio que han conformado, junto a los criterios de diseño para la fabricación aditiva de la bibliografía, la base de conocimiento para el sistema experto. Se ha realizado un análisis de la representatividad del modelo respecto de la muestra de piezas obtenidas de la lista de referencias preferentes. Por último, se ha integrado en la metodología un bloque para analizar la viabilidad económica y se ha implementado en un sistema informatizado online.

El **capítulo 6** se presenta la validación de la metodología propuesta que se ha realizado mediante la fabricación y verificación de una serie de referencias de recambios

obtenidos de la lista preferente obtenida en el capítulo 5. Se ha analizado también el impacto económico y temporal respecto el método tradicional.

En el **capítulo 7** se muestran los resultados de la aplicación de la metodología en diversos casos de estudios, el procedimiento para la implantación de este modelo en la compañía y los diferentes retos y obstáculos que se deben superar para la integración total de las tecnologías de fabricación aditiva en el entramado industrial de las empresas.

En el **capítulo 8** se presentan las conclusiones obtenidas de la metodología de diseño y fabricación propuesta junto con las principales aportaciones de la tesis. Además, se explica en detalle las diferentes líneas de investigación para seguir con dicho proyecto en el futuro.

En los **anexos** se explican en detalle los diferentes casos de estudio que han alimentado el sistema experto.

En la **bibliografía** se enumeran las referencias utilizadas en el presente trabajo.

1.4 Difusión de los resultados de la tesis

Los resultados obtenidos en la siguiente tesis han permitido presentar tres artículos en revistas internacionales indexadas y un artículo en un congreso internacional:

Morales-Planas, S., Minguella-Canela, J., Lluma-Fuentes, J., Travieso-Rodriguez, J.A., García-Granada, A.A. (2018). *Multi Jet Fusion PA12 Manufacturing Parameters for Watertightness, Strength and Tolerances*. Materials. Vol. 11(8), 1472, 1-11.

Minguella-Canela, J., Morales-Planas, S., Gomà-Ayats, J.M., Santos-Lopez, M.A. (2018). *Assessment of the Potential Economic Impact of the Use of AM Technologies in the Cost Levels of Manufacturing and Stocking of Spare Part Products*. Materials. Vol. 11(8), 1429, 1-26.

Morales-Planas, S., Calleja, A., Vlad, V.R., Oró-Solé, J., Minguella-Canela, J., Farjas, J. *Low temperature processing of solution-derived ceria deposits on 3D-printed polyamide*. Thin Solid Films. (Enviado y en revisión)

Minguella-Canela, J., Morales-Planas, S., Gomà-Ayats, J.M., Santos-Lopez, M.A. Study and comparison of the different costs' schema associated to geometry, material and processing between 3D printing and machining manufacturing technologies. 8^o Congreso Internacional MESIC.

2 Contexto de la fabricación aditiva

En este capítulo se presenta la revisión de la bibliografía relacionada con el contexto de la fabricación aditiva. Se ha focalizado el estudio en la transformación digital de la industria a partir de la aparición de las tecnologías de fabricación aditiva. También se realiza una reflexión sobre el nuevo cambio de paradigma en el diseño y el aporte de valor frente a los costes.

2.1 La industrialización y la transformación digital

La industria convencional o tradicional ha sido capaz de producir en cadena todo tipo de productos: electrodomésticos, aviones, bienes de consumo, etc. Sin embargo, la producción en masa solamente estaba al alcance de grandes empresas, cuya fabricación estaba centralizada [3]. El avance tecnológico ha desembocado en la llamada transformación digital de la industria, un nuevo cambio de paradigma que se caracteriza por la fabricación descentralizada de diferentes productos personalizados [4]. Nicholas Negroponte, antiguo director del MIT Media Lab, comentó que la revolución de internet ha contribuido, con la digitalización, a “transformar los átomos en bits”. Hoy en día, con la fabricación aditiva, existe la posibilidad de transformar los bits en átomos, es decir, en objetos físicos [5].

La Fabricación Aditiva (FA), o también llamada impresión 3D, es un proceso de fabricación basado en la adición de material capa a capa [6]. Actualmente, se encuentra en un proceso de expansión a nivel mundial, ya que puede contribuir de forma competitiva con los procesos convencionales de fabricación. Este tipo de tecnologías representa para algunos una nueva revolución industrial porque puede cambiar la forma de pensar y diseñar en el desarrollo de nuevos productos [7]. Revistas como *The Economist* han catalogado la fabricación aditiva como “La cuarta revolución industrial”. Chris Anderson, exjefe de redacción de *Wired* lo definió como una tecnología “más importante que la web” [8]. La rápida respuesta ante cambios de demanda del consumidor, el hecho de prescindir de utillajes y de poder reproducir cualquier geometría que se pueda imaginar, son las peculiaridades que hacen de esta tecnología una pieza clave en la industria del futuro [9].

Es una realidad que en los últimos tiempos la impresión 3D está teniendo mucho soporte por parte de medios de comunicación, convirtiéndose en un tema muy candente en el ámbito de la investigación. En ocasiones se piensa que la fabricación aditiva está dando los primeros pasos ahora, pero la realidad, es que estas tecnologías existen desde los años ochenta. Sin embargo, durante mucho tiempo dichas tecnologías han permanecido circunscritas a un uso industrial [10].

Desde los inicios de los tiempos, la humanidad ha utilizado la energía y el ingenio para transformar las materias primas en productos finales, como son: el calzado, las herramientas, etc. Aun así, estos productos solamente eran asequibles para la gente más pudiente de la época [8]. Se trataban de productos fabricados individualmente por artesanos, y en muchas ocasiones, muy personalizados y consecuentemente muy caros [4]. Los avances tecnológicos dieron lugar a la invención de la máquina de vapor que revolucionó la forma de fabricar. Este hecho desencadenó una reducción significativa de los costes asociados a la fabricación habilitando un mercado mayor gracias a la producción masiva [11]. Esta etapa es conocida como industrialización y ha desempeñado un papel crucial en las economías de los países, siendo incluso el principal motor de riqueza y de valor añadido [8].

Inicialmente, Inglaterra fue uno de los primeros países en potenciar el proceso de industrialización mediante la introducción de maquinaria moderna. Postulándose como primera potencia mundial del momento [12]. Posteriormente, América se posicionó como líder económico gracias a avances tecnológicos como el uso de la electricidad o la fabricación en cadena de Ford. Dichos avances tecnológicos supusieron un incremento de la calidad de vida para la sociedad del momento con la llegada de la luz y los automóviles [8]. En los años cincuenta, la llegada de la filosofía *Lean Manufacturing* originada en la empresa Toyota cambió la forma de organización y gestión de la fabricación situando a Japón como líderes económicos [13]. En conclusión, el poder de innovación incremental y disruptivo de las tecnologías y los procesos impactan de forma muy significativa en la economía de un país.

En las últimas décadas, los avances tecnológicos están abriendo un amplio abanico de oportunidades encaradas a la transformación digital [7]. Además, esta transformación está ocurriendo en los ámbitos industriales y personales. Las tecnologías de impresión bidimensional han cambiado de forma substancial, transformando un proceso analógico como era la imprenta a un proceso totalmente digital como son las impresoras de hoy en día [14]. También ha pasado en el ámbito profesional, en oficina técnica se han dejado de utilizar los planos y los papeles dibujados a mano y se han substituido por ficheros paramétricos, primero en dos dimensiones y luego en tres dimensiones [8]. En el ámbito de la comunicación, se ha digitalizado el proceso desde el correo postal pasando por los faxes y finalmente el correo electrónico.

Las fábricas siguen también el mismo camino, por ejemplo, el uso de los sistemas de diseño asistido por ordenador (CAD – *Computer Aided Design*) que ayuda al diseñador en la concepción del producto, la fabricación asistida por ordenador (CAM – *Computer*

Aided Manufacturing) donde el software relaciona el diseño con los sistemas de fabricación convencionales. Y por último la asistencia a la ingeniería (CAE – *Computer Aided Engineering*), para realizar simulaciones de elementos finitos y comprobar que el producto a fabricar cumple con los requerimientos técnicos. La implementación de robótica en las plantas productivas, la inspección de piezas por visión artificial, el control del avance de la producción en tiempo real (MES), o incluso la modelización y recreación virtual de procesos y fábricas (CAPE – *Computer Aided Production Engineering*) son otros ejemplos que muestran el concepto de “fabrica digital” [8].

Es una realidad que existen algunos campos de conocimiento más avanzados que otros. Por ejemplo, el procesamiento de datos masivos mediante tecnologías de *Big Data* que se requiere cada vez más en las compañías para la optimización de procesos y proporcionar servicios personalizados a clientes [15]. Sin embargo, en los sistemas de fabricación no se ha avanzado a la misma velocidad, ya que siguen siendo básicamente los mismos: arranque de viruta, conformado en frío o caliente y la inyección. Estas tecnologías de fabricación son incluso prehistóricas, en la edad de piedra los procesos sustractivos servían para hacer herramientas, con un pedazo de silicio se extraía el material excedente para darle la forma deseada. En este sentido los sistemas de arranque de viruta, como son: el taladro, el torno y la fresadora en la actualidad tienen la misma función. En 1940 surgen las tecnologías de control numérico (CN), un sistema de fabricación por arranque de viruta supervisado mediante un controlador, que supone una evolución para la fabricación de utillajes y herramientas. Miguel Ángel decía que “la estatua ya está dentro del bloque de mármol; sólo hay que liberarla”. Las tecnologías de moldeo han estado con nosotros mucho tiempo también, al menos desde la Edad de Bronce, cuando los humanos empezaron a usar moldes de piedra para crear puntas de lanza [16]. Todos estos procesos de manufactura tienen limitaciones, como el impedimento de realizar agujeros curvos o los choques de las herramientas con la pieza en el mecanizado, cuando se trata de una geometría compleja, o las restricciones en los ángulos de desmoldeo y espesor constante en la inyección de plásticos [17]. Al final todas estas limitaciones en el diseño forman un obstáculo en la creatividad de desarrollo de nuevos productos con nuevas funcionalidades. Un claro ejemplo de barrera de creatividad es la metodología *Design For Manufacturing* – DFM, que limita el diseño para que la pieza se pueda fabricar y sea económico [18].

Mediante la fabricación aditiva se liberan las restricciones en el diseño que presentan muchas de las tecnologías de fabricación convencional, y deja paso a lo que algunos denominan cuarta revolución industrial o *Industry 4.0*, donde se busca una producción descentralizada e innovadora con fábricas competitivas, capaces de desarrollar

productos de alto valor añadido y adaptarse a las necesidades del mercado [9]. La producción en masa se seguirá manteniendo, pero los altos costes en inversión de maquinaria y utillajes no permiten que la fabricación se adapte a los cambios de consumo de los usuarios finales.

La visión de la fábrica del futuro es producir diversas piezas en de la misma línea de fabricación sin depender apenas de la intervención de operarios, convirtiendo la producción en un servicio [19]. El objetivo es avanzar en los sistemas de fabricación y transformar la información del diseño en un producto totalmente funcional. La introducción de la fabricación aditiva como tecnología facilitadora de la transformación digital en el entramado productivo, comportará [8]:

- **Ciclos de desarrollo de producto más rápido:** una de las ventajas que ofrece la fabricación aditiva es el desarrollo de prototipos funcionales, e incluso el lanzamiento de pequeños volúmenes con el fin de saber la acogida por parte del consumidor en una etapa temprana de la vida del producto. Este hecho tiene mucho sentido para corregir errores en la etapa de diseño y lanzar el producto más rápidamente, es decir, decrementar el *time to market*.
- **Elasticidad en la cadena de valor:** la fabricación aditiva comporta una deslocalización en la fabricación, evitando la logística del producto y fabricando directamente en el destino que corresponda. De esta forma, los costes y los problemas asociados al transporte se reducen [20].
- **Cambios en los modelos de negocio:** la posibilidad de la fabricación dirigida a la personalización masiva cambia el modelo de negocio concebido hasta ahora. Abriendo un abanico nuevo de posibilidades y creando nuevos perfiles de trabajadores y sistemas comerciales [21].
- **Vulneración de la propiedad industrial:** con la aparición de las impresoras 3D junto al escáner 3D, el usuario puede duplicar cualquier pieza en cuestión de horas. Este hecho puede tener repercusiones en las empresas de bienes de consumo, entre otras [22].
- **Nuevos negocios:** la fabricación aditiva comporta una reducción de costes en utillajes y maquinaria. La reducida inversión inicial de las impresoras 3D las hacen perfectas para romper barreras en la entrada al mercado.
- **Filosofía *Just In Time* (JIT):** La capacidad de poder fabricar bajo demanda sin necesidad de tener inmovilizados siguiendo la filosofía JIT, genera una cadena de suministro más eficiente y con menos riesgos [23].

- **Diseño como valor añadido:** los diseños complejos producidos mediante fabricación aditiva no comportan un mayor coste, desapareciendo las restricciones asociadas al moldeo u otras tecnologías convencionales. De esta forma, al tener libertad en el diseño, los esfuerzos se centrarán en la concepción del producto y no en su industrialización.
- **Sostenibilidad medioambiental:** por lo general, en la fabricación aditiva se utiliza solamente la materia necesaria, sin generar deshechos como en la fabricación sustractiva o de inyección. Esto conlleva una reducción en la huella de carbono reduciendo su impacto en el medio ambiente [24].

2.2 La fabricación aditiva

La Fabricación Aditiva (FA) o *Additive Manufacturing* (AM) es el proceso de fabricación de sólidos mediante la superposición capa a capa de materiales de forma precisa, a partir de un modelo digital [25]. Sin embargo, existen una gran variedad de términos utilizados: *Generative Manufacturing* (Alemania), *eManufacturing* (Alemania), *Constructive Manufacturing* (Alemania), *Additive Layer Manufacturing* (Escandinavia), *Direct Digital Manufacturing* (Estados Unidos), *Freeform Fabrication* (Estados Unidos), *Solid Freeform Fabrication* (Estados Unidos) [26].

Esta filosofía de fabricación no es novedosa, sino que se remonta hace tres mil años durante la construcción de las pirámides egipcias, donde la edificación se hacía por capas [27]. Incluso, la misma naturaleza pone en práctica la fabricación aditiva en la construcción de los paneles de abejas, los nidos de los pájaros, etc. Las tecnologías de fabricación se pueden clasificar de la siguiente forma [8]:

- **Tecnologías conformativas y de deformación:** utilizan moldes o utillajes para la obtención de la pieza deseada (inyección de plástico y/o metales, sinterizado, colada al vacío, inyección de moldes reactiva, punzonado, termoconformado etc.).
- **Tecnologías sustractivas:** obteniendo la pieza deseada sustrayendo el material partiendo de un bloque de éste (mecanizado, electroerosión, corte por agua, corte por láser, etc.).
- **Tecnologías aditivas:** se obtiene la pieza deseada añadiendo selectivamente material a partir de un modelo tridimensional, sin uso de utillajes y sin sustraer material.

En la Figura 2.1 se muestra una imagen ilustrativa de las anteriores tipologías de fabricación.

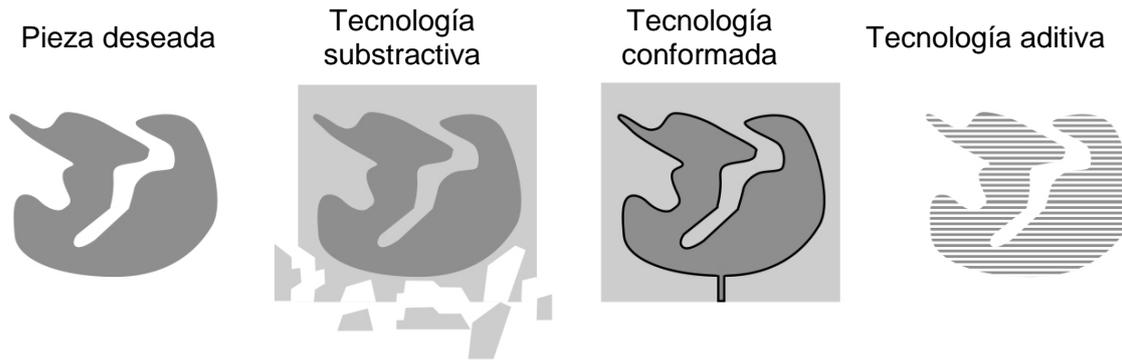


Figura 2.1. Tipologías de tecnologías de fabricación. Fuente: [8].

El principio físico del proceso de fabricación aditiva es el aporte de material progresivamente, hasta llegar a tener una pieza consolidada. La materia prima suele tener diferentes formatos: sólido (polvo, varilla o hilo y lamina) o líquido. Existen diversas tecnologías de fabricación aditiva y se clasifican por dos criterios [8]: el método de aporte de material y el de aporte de energía. En el método de aporte de material se distinguen tres tipos [8]:

- **Punto:** estos sistemas dosifican el material de forma puntual empleando sistemas de boquillas de inyección o extrusión. Estas boquillas son desplazadas por un sistema de tracción en los ejes cartesianos, similar a un plotter de plumilla, e incluso, en sistemas más sofisticados se puede mover en los cinco ejes, siempre dentro de los límites de trabajo. Éste último es similar a las máquinas de control numérico, pero en lugar de quitar material se añade.
- **Línea:** la aportación de material se da en líneas mediante inyector multicanal. Estos inyectores se desplazan realizando unos barridos en el eje de las abscisas, aportando el material de forma selectiva en los lugares correspondientes, abriendo o cerrando los inyectores. Una vez finalizado el primer barrido, el carro vuelve a la posición inicial y se desplaza a la siguiente zona hasta acabar con la superficie de trabajo, similar a una impresora matricial.
- **Lecho:** el material aportado está en exceso, normalmente en una especie de caba, aunque solamente se consolida en los lugares donde se aporte energía. En este tipo de sistemas se aporta el material por capas de espesor constante en toda la superficie de trabajo. El elemento que aplica estas capas es el llamado *recoater*, que tiene como objetivo aportar el material, alisar y homogeneizar la superficie.

La consolidación o agregación del material se consigue mediante la aportación de energía o adhesivos sobre el material. Los métodos de aporte de energía se pueden clasificar de la siguiente manera [8]:

- **Sistemas 0D:** la energía se focaliza de forma puntual, describiendo trayectorias y recorriendo capa a capa toda la superficie a solidificar.
- **Sistemas 1D:** la energía es aportada en líneas que cubren toda la superficie al desplazarse.
- **Sistemas 2D:** la energía es aplicada simultáneamente en toda la superficie de trabajo.

El aporte de energía al sistema se realiza mediante calor o luz ultravioleta. El calor puede producir la fusión de metales, termoplásticos e incluso la polimerización de algunas resinas. Mientras que existen otros materiales fotosensibles que pasan por un proceso de curado con lámparas ultravioletas. La combinación entre la velocidad de aporte de material y de energía determinan la rapidez del sistema. Se debe tener en cuenta que cuando el aporte de material es localizado, el aporte de energía no está concentrado, mientras que si se utiliza material en exceso la energía debe aplicarse de una forma selectiva y localizada. La energía y los sistemas de movimiento son los dos elementos más significativos en el coste de inversión de la máquina, ya que la combinación de ambos determina la calidad y la precisión de las piezas fabricadas [28].

En la Tabla 2.1 se han clasificado las principales tecnologías de fabricación aditiva según los dos criterios explicados anteriormente.

Tabla 2.1. Clasificación de las tecnologías de FA según el aporte de energía y el material. Fuente: [8].

		Aporte de energía			
		0D	1D	2D	
	Punto	FDM			
		LENS			
		UDM	-	-	
		EBAM			
		ADAM			
Aporte de material	Línea	APD	PJ DOD NPJ	-	
		Lecho	SLA, SLS, EBM, DMLS LOM	BJ	DLP MJF CDLP CLIP

FDM (*Fused Deposition Modelling*), SLA (*Stereolithography*), SLS (*Selective Laser Sintering*), EBM (*Electron Beam Melting*), DMLS (*Direct Metal Laser Sintering*), PJ (*PolyJet*), BJ (*Binder Jetting*), DLP (*Digital Light Processing*), MJF (*Multi Jet Fusion*), CDLP (*Continuous Digital Light Processing*), CLIP (*Continuous Liquid Interface Production*), LOM (*Laminated Object Manufacturing*), DOD (*Drop on Demand*), NPJ

(*Nano Particle Jetting*), LENS (*Laser Engineering Net Shape*), EBAM (*Electron Beam Additive Manufacturing*), UDM (*Ultrasonic Deposition Modelling*) y ADAM (*Atomic Diffusion Additive Manufacturing*) y APD (*Augmented Polymer Deposition*).

El principal problema con el que se encontraba la industria manufacturera en los inicios de las producciones en masa, era la fabricación de piezas de plástico para la validación del diseño, llamados prototipos [29]. En respuesta a la necesidad industrial, en 1986 se creó la empresa 3D Systems con una máquina de estereolitografía, de forma que en 1987 el prototipado rápido o *Rapid Prototyping* ya era una realidad. En 1990 se empieza a aplicar la fabricación aditiva para obtener patrones de fundición: *Rapid Casting*. En 1995 se utiliza dicha tecnología para obtener herramientas de producción: *Rapid Tooling*. Y en el 2000, para obtener piezas de producción: *Rapid Manufacturing* [8]. A continuación, se explican brevemente los siguientes términos:

- ***Rapid Prototyping (RP)***: fabricación de un prototipo visual o funcional (alpha y beta, respectivamente), es decir, una pieza que tiene como misión validar el concepto (alpha) o la funcionalidad (beta) o ambas, que más tarde se llevará a industrializar.
- ***Rapid Manufacturing (RM)***: fabricación de una pieza para uso final, es decir, totalmente funcional. Cualquier impresora 3D puede fabricar cualquier geometría, pero para que una geometría se convierta en pieza debe tener las características física y de funcionalidad adecuadas para su aplicación.
- ***Rapid Tooling (RT)***: fabricación de utillajes; moldes de inyección y soplado, máster para colada de poliuretanos, etc. También incluye la fabricación de utillajes de posicionamiento o de agarre.

Cabe destacar que las tecnologías utilizadas para estas tres vertientes son en ocasiones las mismas, pero destinadas a diferentes etapas de la cadena de valor del producto. El adjetivo *rapid*, se refiere a la rapidez en la fabricación de piezas o utillajes respecto a las técnicas de fabricación convencionales. Asimismo, existen otras tecnologías rápidas que no están incluidas dentro de las tecnologías de fabricación aditiva por la naturaleza de su proceso. En la Figura 2.2 se muestra la clasificación de las tecnologías rápidas: en aditivas y varias.

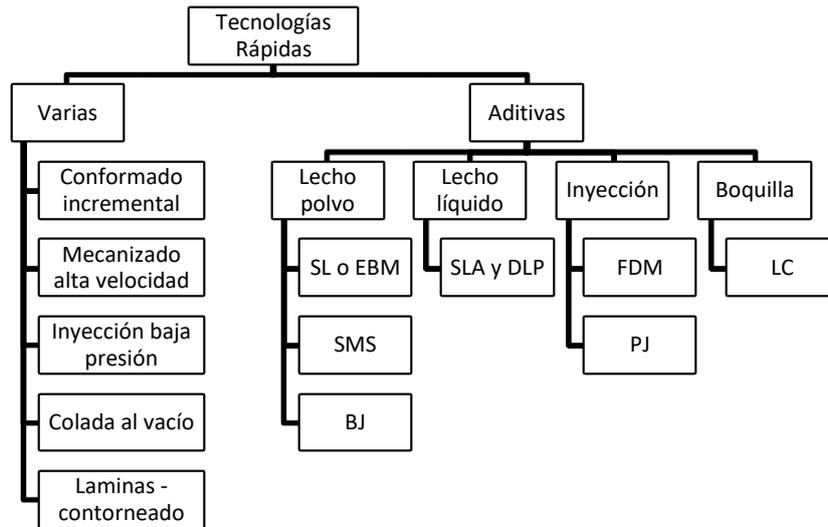


Figura 2.2. Clasificación de tecnologías rápidas. Fuente: [8].

Las tecnologías de fabricación aditiva aún no están implantadas de una forma extensa en la industria, en parte porque se deben resolver algunas limitaciones como son: materiales, calidad, repetitividad, fiabilidad, factibilidad, etc.

Una herramienta muy útil para mostrar la penetración de la tecnología de la fabricación aditiva en la industria es el llamado ciclo de sobre expectativa o *Gartner Hype Cycle*, una representación gráfica de la madurez, adopción y aplicación comercial de una tecnología específica. El término fue acuñado por Gartner, una casa de análisis e investigación, creada en los EE. UU., que proporciona opiniones, consejos y datos sobre las tecnologías en la industria [30]. En la Figura 2.3 se muestra una representación de los ciclos de sobre expectativa de los años 2010 y 2015, donde aparece la impresión 3D.

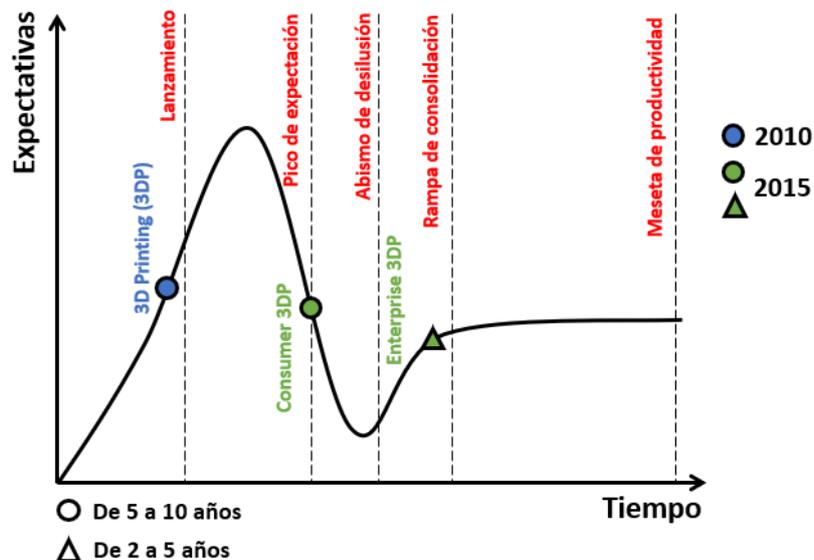


Figura 2.3. Ciclo elaborado a partir de Gartner Hype Cycle de agosto 2010 y Julio 2015. Fuente: Propia.

Analizando los ciclos de sobre expectativa de Gartner de los años 2010 y 2015, se puede observar como en cuestión de cinco años la impresión 3D ha pasado de estar en la etapa de lanzamiento a la meseta de productividad. Aun así, cabe diferenciar dos vertientes de negocio de la impresión 3D: consumidor y empresa. La impresión 3D de consumo va directamente relacionada con el concepto de fabricación personal o *personal fabrication*, es decir, los consumidores utilizan su propia máquina 3D para fabricar objetos y cubrir una necesidad, por ejemplo, un recambio. Este concepto también es llamado MFP (Micro Fábricas Personalizadas) [5].

Aunque la tecnología de fabricación 3D es común para el consumidor y la empresa, sus expectativas se sitúan en diferentes etapas. Este hecho se da ya que la impresión de un recambio mediante una impresora 3D no es trivial, sino que el usuario debe tener conocimientos sobre ingeniería inversa, mecánica, química de plásticos, diseño, etc. Por esta razón, la impresión 3D en empresa está en la meseta de productividad y cada vez más integrada en el proceso productivo, ya que poseen el personal y el conocimiento suficiente para poder exprimir todo el potencial que tiene la fabricación aditiva. Empresas, universidades y centros tecnológicos de todo el mundo están investigando y desarrollando materiales, softwares, maquinaria, estaciones de postproceso que puedan satisfacer las necesidades de la industria y del consumidor. Aun así, la situación actual está muy lejos tecnológicamente hablando en comparación a las tecnologías de fabricación convencionales como es la inyección de plástico. Sin embargo, parece cuestión de tiempo que las tecnologías de fabricación aditiva se sitúen en el mismo nivel tecnológico.

La impresión 3D existe desde hace treinta años, si bien se ha difundido ampliamente en los últimos cinco años por diferentes causas [8]:

- La disponibilidad de nuevos materiales con mayores funcionalidades y prestaciones.
- La expiración de las patentes que no permitían la entrada al mercado de impresoras económicamente asequibles.
- La tarea de *marketing* que se está realizando en las empresas líderes a nivel global.
- Las peculiaridades y oportunidades que complementan los procesos de fabricación convencionales.

2.3 La integración con los procesos convencionales de fabricación

En este apartado se explica detalladamente como los procesos de fabricación aditiva deben integrarse en la cadena de valor, junto al resto de procesos (substractivos y conformativos), aportando sus ventajas allí donde tenga sentido y complementándose de forma coherente. Para esto es necesario comprender las limitaciones y las ventajas de los procesos de fabricación que completan la cadena de valor, y así integrar procesos de fabricación aditiva de manera exitosa. En la Figura 2.4 se muestra un esquema donde se clasifican los procesos de fabricación.

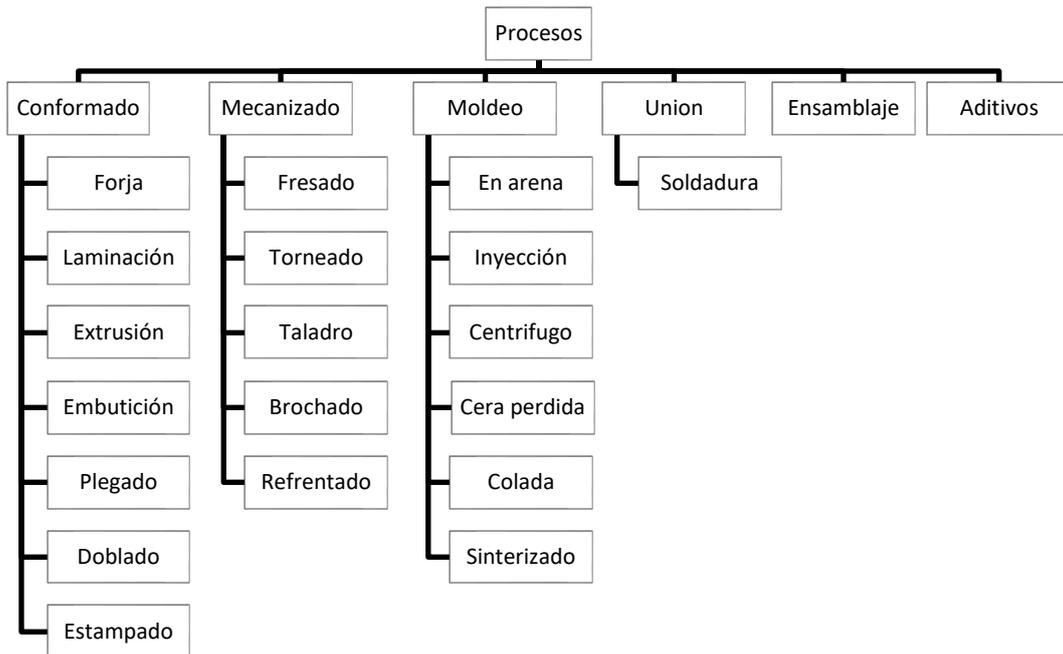


Figura 2.4. Clasificación de los procesos de fabricación. Fuente: [8].

Seguidamente se enumeran las peculiaridades que diferencian la fabricación aditiva de los procesos convencionales de transformación de plásticos, siendo éste el proceso más extendido y representando la competencia directa de la fabricación aditiva. Tomando como ejemplo el proceso de inyección de plástico, el diseñador debe tener en cuenta una serie de consideraciones o limitaciones conducidas por el proceso de fabricación que se muestran a continuación [8].

- **Complejidad añadida:** en los procesos convencionales la dificultad geométrica de la pieza se traduce casi siempre en un aumento en la complejidad en el utillaje y, consecuentemente, en el proceso de fabricación y su coste. Sin embargo, las complejidades añadidas en las piezas de los procesos de fabricación capa a capa no impacta en un aumento en el coste.

- **Ensamblajes:** el número de piezas existentes en un producto es un factor muy importante, donde la fabricación aditiva puede aportar valor. Más piezas suponen más utillajes, mayores costes de ensamblajes, gestión de piezas y stocks, todo esto desemboca en un producto muy caro y poco competitivo. Con tecnologías de fabricación aditiva, se pueden fabricar ensamblajes en una misma impresión.
- **Ángulos de desmoldeo:** para que una pieza inyectada se pueda extraer de un molde debe tener ángulos positivos. Esta limitación no existe en métodos de fabricación aditiva por la naturaleza de fabricación.
- **Negativos:** en el diseño de pieza plástica para fabricar por inyección, las zonas negativas, donde el ángulo de desmolde es negativo, se debe evitar por la imposibilidad de desmoldear la pieza, a no ser que se introduzcan en el molde mecanismos de correderas automáticas o manuales que son muy costosas tanto en la fabricación, como en la operación y el mantenimiento del molde. Además, la falta de un buen ajuste provoca zonas con rebabas y problemas de calidad en la pieza. Esta limitación no existe en métodos de fabricación aditiva por la naturaleza de fabricación.
- **Espesor de pared:** en inyección de plásticos es muy recomendable mantener un espesor de pared constante, para evitar problemas de rechupes y alabeos, a causa de las contracciones por un enfriamiento diferencial de las zonas. En fabricación aditiva es recomendable pero no requiere mantener espesores constantes de pared.
- **Líneas de partición:** la línea de partición viene dada por la zona de apertura del molde de inyección. En esta zona queda una pequeña rebaba en la pieza que puede afectar a la calidad o a la funcionalidad del producto. En fabricación aditiva no existen líneas de partición a causa del no uso de utillajes.
- **Acabado superficial:** los acabados superficiales de las piezas se deben contemplar en el molde de inyección, siendo un coste adicional por tratarse de un proceso añadido. En fabricación aditiva se puede modificar el acabado superficial de cada zona sin ser un coste adicional, aunque dependiendo del tipo de acabado será necesario el postproceso de la pieza.
- **Marcas de expulsores:** para evacuar la pieza del molde es necesario unas herramientas llamadas expulsores, que empujan la pieza fuera del molde. Es importante saber dónde se sitúan, ya que dejan unas pequeñas marcas sobre la pieza que afecta a la calidad e incluso a su funcionalidad. En fabricación aditiva no son necesarios el uso de expulsores, evitando así dichas marcas en la pieza.

- **Posicionamiento de la entrada de material:** la entrada de material en el interior del molde no se decide de una forma arbitraria, sino que mediante simulaciones reológicas se determina el punto de inyección para asegurar el buen llenado del molde. El punto de inyección deja una marca después de cortar la colada, que puede afectar a la calidad y/o funcionalidad. Además, la naturaleza de la inyección dificulta la fabricación de piezas que no son geoméricamente simétricas, ya que durante la etapa de llenado puede haber complicaciones.
- **Soldaduras o uniones frías:** durante el llenado multi-entrada de una pieza existen fronteras o soldaduras cuando hay una unión entre material. En estas zonas se pueden producir soldaduras frías que se traduce en marcas en la pieza.

La fabricación aditiva no está vinculada a un molde, por lo tanto, cualquier modificación de la pieza se realiza mediante modificaciones en el modelo tridimensional con lo cual no supone un sobre coste, mientras que las modificaciones geométricas en el molde son muy costosas en términos de tiempo y dinero. Los procesos de inyección convencional están pensados para grandes volúmenes de fabricación y geometrías relativamente sencillas, tiradas muy largas con tiempos de ciclos muy cortos. En estos casos resulta inviable económicamente la utilización de la fabricación aditiva. A lo largo del tiempo, los procesos de fabricación aditiva pueden ir mejorando, reduciendo los tiempos de fabricación mediante avances tecnológicos de hardware, pero difícilmente llegarán a superar las capacidades de producción de los procesos convencionales. Asimismo, tampoco es esa su misión, no es una tecnología que desplace a las tecnologías de grandes volúmenes, pero sí que las complementa. No todas las piezas podrán ser producidas mediante fabricación aditiva por razones de factibilidad técnica o económica, pero aquellas cuyas ventajas destaquen significativamente gracias a su diseño, serán las que el propio mercado haga evolucionar hacia la fabricación digital.

2.4 El cambio de paradigma en el diseño y el aporte de valor

El objetivo de este apartado es hacer referencia a la importancia en la flexibilidad del diseño de piezas que se fabricarán con las tecnologías de fabricación aditiva. La peculiaridad principal de dichas tecnologías es la libertad total en el diseño. Este concepto es conocido como “fabricación de forma libre” o *freeform fabrication* [31]. Se trata de un cambio de paradigma en el diseño de productos; del diseño dirigido por la fabricación, a la fabricación dirigida por el diseño [32].

Hasta la aparición de la fabricación aditiva, los delineantes diseñaban productos fabricables con tecnologías convencionales. Con la aparición de las tecnologías de fabricación avanzadas, el cuello de botella se sitúa en el ingenio y las capacidades del

diseñador y, principalmente, en los sistemas de diseño asistido por ordenador (CAD) que fueron concebidos para los procesos convencionales de fabricación [8]. La fabricación aditiva cada vez más es un proceso establecido en la industria, que da respuesta a la fabricación de volúmenes medios y bajos, ya que para grandes tiradas aun no es competitiva. Asimismo, existe un gran afán en avanzar tecnológicamente y cubrir nichos de mercado de gran demanda [17].

Sin embargo, no solamente hay que poner atención en los costes y las cantidades, sino también en lo que este tipo de tecnología puede aportar a los productos, ya que son variables fundamentales a la hora de estudiar su viabilidad técnica y económica. Asimismo, el desconocimiento actual de las oportunidades que esta tecnología ofrece provoca que el diseñador escoja tecnologías de fabricación erróneas. En el momento que se conozcan las ventajas y el abanico de posibilidades ligadas a este proceso de fabricación, el diseñador observará nuevas posibilidades de redefinir el producto, y será capaz de alcanzar la concepción de nuevos diseños al ser el máximo conocedor de las funciones y requerimientos de la pieza o producto. Por esto es necesario realizar una abstracción de la idea actual del diseño y liberarse de las restricciones que tradicionalmente se han tenido que respetar para poder llegar a fabricar. Este hecho da lugar a una nueva forma de diseñar sin pensar en cómo se va a industrializar. Una vez se llega a este punto, aparecen nuevas ideas que hasta entonces eran impensables, superando muchas dificultades que supone la fabricación convencional [8]. Sin embargo, no se debe olvidar, que aunque en el diseño para la fabricación aditiva no hay límites, existen restricciones en otros aspectos como son los materiales, el acabado final de las piezas y el coste [32].

Con las tecnologías de fabricación aditiva aparece una necesidad referente a las reglas de diseño. Este cambio de paradigma lleva a un cambio radical a la hora de concebir ideas, siendo las reglas de diseño actuales inservibles, ya que fueron pensadas y desarrolladas para procesos de fabricación convencional [33]. En este aspecto, aún hay trabajo por hacer, aunque las entidades más cercanas a este tipo de tecnologías están desarrollando algunas guías o reglas. La causa es su novedad, la ignorancia hacia estas tecnológicas y su pobre implantación en la industria. No teniendo unas estrategias o reglas de diseño requeridas para que los proyectistas puedan afrontar un nuevo diseño de producto con las garantías de que finalmente se vaya a cumplir con las necesidades funcionales y dimensionales. Entre las reglas de diseño destacarían, por ejemplo, la orientación de la pieza en el volumen de trabajo para evitar desviaciones dimensionales por tensiones o contracciones u optimizar los esfuerzos [34]. El buen diseñador debe tener muy claro tanto las ventajas del proceso de fabricación como las limitaciones,

teniéndolo en cuenta todo en las etapas más tempranas del diseño. Por ello, la ingeniería concurrente es clave, ya que conecta el diseño, la fabricación y el ensamblado del producto.

Los costes asociados a la fabricación de una pieza mediante fabricación aditiva se desglosan en los cinco siguientes [8]:

- **Coste de material:** los materiales para fabricación aditiva son caros en comparación a los utilizados en las tecnologías de fabricación convencionales, debido a la carencia de economía de escala que los aborde y ser más competitivos en el mercado.
- **Coste de personal:** es requerido personal especializado en este tipo de tecnologías, ya que se necesita entender el proceso para atinar con la correcta estrategia de fabricación; la ubicación en la plataforma, la configuración de parámetros adecuados y también las operaciones de postproceso. Durante la fabricación, la máquina es autónoma y no requiere de personal, aprovechando turnos nocturnos.
- **Coste de amortización de la máquina:** aunque cada vez las máquinas son más baratas y rápidas, hoy en día siguen siendo costosas.
- **Costes de periféricos:** no es suficiente solamente la máquina para fabricar, sino que también es necesario el uso de software CAD y estaciones de postproceso (chorreado, infiltrados, etc.).
- **Costes indirectos:** entre los que se incluyen los gastos de formación de personal, consumo de energía, gastos generales, etc.

El sector industrial busca la optimización de los costes asociados a la fabricación, por ello es necesario realizar el análisis y la comparativa de éstos para la fabricación aditiva frente a los procesos convencionales, tal como la inyección de plástico. En el caso de las tecnologías de conformado es imprescindible realizar una inversión inicial en un molde para fabricar las piezas. Por el contrario, mediante fabricación aditiva no es necesario el uso de utillajes, por esto el coste/pieza es prácticamente independiente del número de piezas fabricadas, ya que no se incluye ninguna amortización por utillajes. En la Figura 2.5, se muestra la cantidad a partir de la cual es más rentable inyectar la pieza en vez de fabricarla mediante tecnologías aditivas, este es el punto denominado de equilibrio o de corte [35].

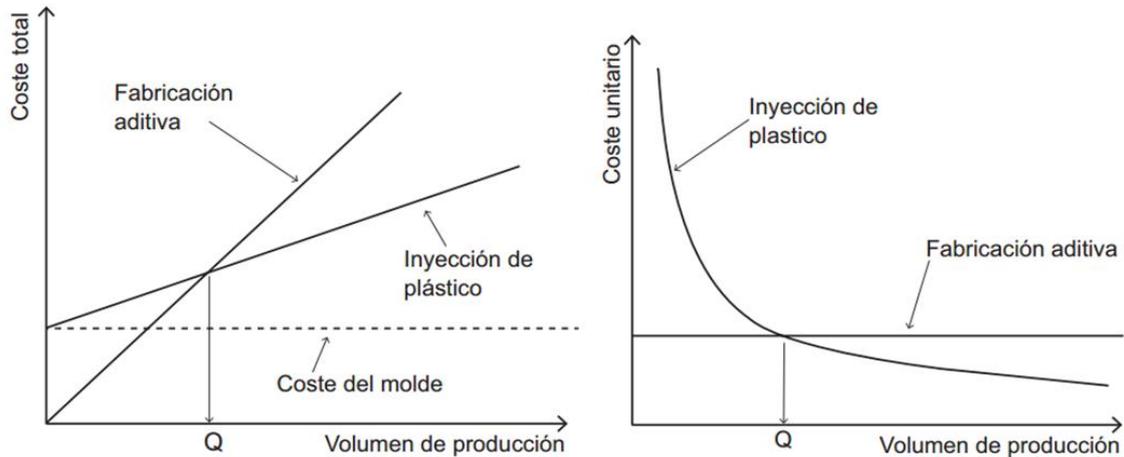


Figura 2.5. Comparativa del coste/cantidad (izquierda) y coste unitario (derecha). Fuente:[8].

En general se suelen comparar los costes de la fabricación aditiva con los costes de la fabricación convencional. Para tomar la decisión de qué camino tomar, no solamente se deben tener en cuenta los costes directos, sino también el valor añadido que se le confiere al producto. Existe la necesidad de orientar la industria hacia la generación de valor en los productos y procesos, en contraste con la tendencia de abaratamiento de costes.

El tamaño de la serie es un parámetro decisivo, aunque no se debe seguir solamente el criterio del coste, sino también la libertad en el diseño, evitar problemas con utillajes, posibles cambios del diseño, la posibilidad de ajustar los lotes a la demanda del mercado, las ventajas en la cadena de suministro, etc. Cuando se trata de un producto con mucha incertidumbre en ventas, porque es novedoso o por que se enfoca a un mercado del cual no se tiene referencia, la construcción de un costoso molde para que finalmente se vendan pocas unidades puede desembocar en un alto riesgo de desastre financiero, mientras que, si se opta por el camino de la fabricación mediante tecnologías de fabricación aditiva, baja drásticamente el nivel de riesgo. Al realizar este análisis económico, no se debe caer en el error de hacer el análisis de la pieza diseñada para ser fabricada con tecnologías clásicas, sino realizar un nuevo diseño enfocado y adaptado a las peculiaridades de la fabricación aditiva. A continuación, se explican en detalle los modelos de costes de fabricación mediante tecnologías aditiva versus la inyección de plásticos y el modelo de coste de inventario.

- **Costes de fabricación con tecnologías de fabricación aditiva**

Los costes de fabricación de las tecnologías de fabricación aditiva están directamente relacionados con tres factores: el peso de la pieza (i), las dimensiones (ii) y el tiempo de impresión (iii). El peso de la pieza (i) es una de las líneas de mejora que ofrece las

tecnologías aditivas respecto las convencionales. Esto es porque las tecnologías de fabricación aditiva solamente consolidan el material que se desea y el material no utilizado puede ser reutilizado, ahorrando así materia prima. En cuanto a (ii) y (iii), algunos industriales prefieren tratarlos de manera autónoma y algunos los combinan en la elaboración de las cotizaciones de piezas. Siguiendo esta lógica es evidente que, en las tecnologías de fabricación aditiva, la complejidad geométrica no afecta el coste final de fabricación de la pieza.

En trabajos previos de autores [36], la configuración de costes de las tecnologías de producción de fabricación aditiva ha sido formulada en función de: costes de maquinaria, costes de materiales, costes de consumo de energía y costes de mano de obra. Implícitos en estos términos están los factores de masa, la dimensión en el eje 'z' y los tiempos de impresión. Algunos otros modelos de costes [37] diferencian los costes directos de producción bien estructurados como son: la mano de obra, los materiales, el equipo, entre otros, de los costes de producción mal estructurados, como son: fallas en la construcción, transporte, inventario, etc. Una vez revisado los modelos, en las siguientes secciones del presente estudio, el coste de la parte se ha calculado utilizando el método de Hopkinson y Dickens [35] mediante la Ecuación (2.1).

$$C_{FA} = C_E + C_H + C_{MAT} \quad (2.1)$$

Donde:

(C_{FA}) es el coste de la parte mediante fabricación aditiva.

(C_E) es el coste del equipamiento por parte calculado en función del tiempo de utilización para fabricar una parte. Considerando la depreciación de la máquina, la energía consumida y los costes de mantenimiento. Las dimensiones físicas de la pieza afectan directamente al tiempo de procesado.

(C_H) es el coste de operador por parte calculado a partir del producto del tiempo dedicado por el trabajador y su coste/hora.

(C_{MAT}) es el coste de material por parte calculado como la multiplicación de la masa del producto por el coste de material por unidad de peso.

- **Costes de fabricación con tecnologías de transformación de plásticos**

En el presente trabajo se han calculado los costes de fabricación de una pieza mediante inyección de plástico a partir de la Ecuación (2.2).

$$C_{IM} = C_E + C_{TOL} + C_H + C_{MAT} \quad (2.2)$$

Donde:

(C_E) es el coste del equipo por pieza calculado en función del tiempo de utilización del equipo para la fabricación de una pieza, teniendo en cuenta la depreciación del equipo, el consumo promedio de energía y el mantenimiento asociado.

(C_{TOL}) es el coste del utillaje por parte calculado como la división del coste total del utillaje dividido por el número de piezas fabricadas.

(C_H) es el coste de operador por parte calculado a partir de la multiplicación del tiempo dedicado por el trabajador por su coste/hora.

(C_{MAT}) es el coste de material por parte calculado como la multiplicación de la masa del producto por el coste de material por unidad de peso.

- **Costes de inventario**

A parte de los costes de fabricación también se pretende cuantificar los costes causados por su almacenamiento. Con respecto a esto, algunos autores han preparado modelos de ciclo de vida del producto para el sector de repuestos [20], ya que sigue siendo un tema de trabajo activo.

La evaluación del coste de inventario es un campo ampliamente abordado en la literatura debido a sus muchas implicaciones en la cadena de suministro del producto. *Economic Order Quantity* (EOQ) es el modelo más extendido utilizado por los autores [38]. EOQ es un modelo que trata la cantidad de producto a demandar teniendo en cuenta los costes de pedido y los costes de tenencia. Los costes de pedido incluyen algunos elementos de coste como son la mano de obra y otros costes indirectos de oficina que permiten procesar el pedido. El coste de tenencia incluye los costes de almacenamiento, seguro, deterioro y otros. El coste de capital generalmente se considera en el cálculo del coste de tenencia [39], aunque algunos autores abogan por mantenerlo como un factor de coste por separado.

Tradicionalmente, en el modelo EOQ, el coste de tenencia se modela en función del número promedio de unidades por pedido. Este término representa el coste de inventario [40], [41]. Algunos autores introducen variaciones en este modelo [42] mientras que otros desglosan en dos partes el coste de tenencia; uno coste que depende del número promedio de unidades por pedido y otro que depende de incrementos repentinos en los costes asociados, como el alquiler o la renovación de un almacén para guardar unidades adicionales de producto.

Las políticas de inventario para controlar y mantener niveles óptimos de inventario estudian el equilibrio entre los gastos en los costes de pedido y los costes de tenencia. Esta es la razón por la cual es necesario desarrollar y seleccionar el modelo de inventario más efectivo, minimizando su coste. Algunos autores [43] han evaluado diferentes modelos, tales como lote por lote, EOQ, cantidad de orden por período (POQ), menor coste unitario, mínimo coste total, coste mínimo y el modelo Wagner-Whitin. Este último modelo arrojó los mejores resultados para el menor coste de inventario anual.

En el marco de EOQ, también se desarrolla un modelo de costes con función arbitraria [44]. En este caso, se introduce el coste de mantenimiento en función del tiempo para tener en cuenta el mayor esfuerzo de dinero para mantener frescos algunos productos perecederos. Algunos otros autores desarrollan marcos más complicados [45], incorporando el modelado de demanda como funciones de distribución [46], abordando las implicaciones de escasez en el ordenamiento [47] y resolviendo problemas de optimización usando metaheurísticas [41], algoritmos genéticos y análisis multicriterio [48].

En base a la revisión de la literatura existe una clara necesidad industrial que debe abordarse en el presente trabajo en relación con los parámetros industriales habituales para la toma de decisiones como son: costes laborales, costes regionales y la dimensión del tiempo. En los modelos revisados, los costes laborales y regionales normalmente se combinan en el cálculo de los costes de tenencia. Por lo tanto, existe la necesidad de separar dichos costes para comparar los costes de producto al ubicar la cadena de suministro en diferentes instalaciones geográficas.

En el presente estudio, los cálculos de costes generados por los inventarios se indican en la Ecuación (2.3).

$$C_S = C_{MAN} + C_{TRA} + C_{ALM} + C_{MGT} \quad (2.3)$$

Donde:

(C_{MAN}) es el coste de fabricación de una pieza, calculado según la tecnología de fabricación utilizada.

(C_{TRA}) es el coste de transporte de una pieza desde la unidad de producción al almacén.

(C_{ALM}) es el coste de mantener almacenada la pieza teniendo en cuenta el coste del espacio físico en el almacén y otros costes derivados, como es el coste del seguro para la pieza.

(C_{MGT}) es el coste de administrar la parte almacenada, teniendo en cuenta la mano de obra en el almacenamiento, la vigilancia y otros costes derivados.

Se han generado grandes expectativas sobre la fabricación aditiva e incluso hay autores que han afirmado que será un fenómeno más grande que internet [8]. McKinsey [49] estima que los efectos sobre la estructura de la producción tendrían un impacto de hasta 550.000 millones de dólares anuales en el 2025.

3 Estado del arte de las metodologías en fabricación aditiva

En este capítulo se presenta el estado del arte de las metodologías de diseño y fabricación para los procesos de fabricación aditiva. Dichas metodologías se aplican en la etapa de diseño con el objetivo de optimizar el proceso de ensamblaje y de fabricación. Asimismo, se presentan los estudios sobre los sistemas de soporte a la decisión que aparecen en la bibliografía y más concretamente, los sistemas expertos. Seguidamente se analizan las limitaciones de los estudios y las oportunidades de investigación y, por último, se ha realizado un esquema del proceso de la metodología.

3.1 Metodologías de diseño y fabricación

La transición de la fabricación convencional a los procesos de fabricación aditiva implican diferentes retos en los campos del diseño y los materiales para cada tecnología aditiva [50]. Las tecnologías de fabricación aditiva hacen posible la fabricación de piezas funcionales con diseños de geometrías complejas, haciendo posible la optimización de las propiedades mecánicas de la pieza minimizando el peso o la energía requerida para su fabricación [51].

Para ello, existen técnicas de optimización topológica que permiten distribuir el material en un dominio de la parte, incrementando o reduciendo la densidad de material, cambiando así la rigidez de la pieza [52]. Sin embargo, es necesario realizar una guía que permita conducir el diseño a algunos aspectos de la optimización, por lo que es requerido contar con herramientas que permitan facilitar el diseño de forma libre [32].

Una de las tecnologías más peculiares en fabricación aditiva, surgidas después de la expiración de las patentes en 2010, es *Fused Filament Fabrication* (FFF). Dicha tecnología es la más asequible económicamente y además, permite la impresión de una gran cantidad de materiales [53]. Durante los últimos años, la industria y las universidades han investigado y desarrollado soluciones que cubrían nichos de mercado convirtiendo FFF en una tecnología de producciones deslocalizadas.

En [54] se realiza una optimización topológica de una geometría realizada mediante FFF y se analizan los costes asociados a ésta. La pieza escogida es una parte de una válvula automática para la que se requerían unas 2000 piezas al año. El peso original de la pieza es de 0,862 kg y después de la optimización topológica se redujo su peso hasta 0,237 kg sin modificar la parte externa. El DfAM (*Design for Additive Manufacturing*) se validó experimentalmente de forma virtual y físicamente. La enorme reducción en masa permitió disminuir los materiales utilizados y el tiempo de proceso. Después de realizar una prospección para las diferentes piezas de plástico de la compañía Unistral

Recambios se concluyó que este tipo de optimización impacta en una reducción de costes de fabricación de hasta un 69,2% y una reducción de costes de inventario de 13,69%.

En la bibliografía existen diferentes tipos de metodologías de diseño y fabricación desarrolladas por expertos en la materia, muchas de éstas ya están implementadas en las empresas en las etapas de diseño y de concepto de productos. Una de las más utilizadas es el DFMA (*Design For Manufacturing and Assembly*) de Boothroyd-Dewhurst [18], que se compone de dos métodos conocidos: DFM (*Design For Manufacturing*) y DFA (*Design For Assembly*). Se trata de una guía de diseño de productos que impacta sobre la fabricación, reduciendo los costes y al mismo tiempo facilita el ensamblaje. Aun así, este método no contempla la producción de piezas mediante técnicas de fabricación aditiva. Existen también métodos de diseño axiomáticos [55], donde se analizan y relacionan las necesidades del cliente, los requerimientos funcionales y los parámetros de diseño y del proceso. Este modelo no considera los procesos de fabricación y sus ventajas, solamente es válido para el diseño de conceptos. Asimismo, los sistemas basados en el conocimiento [56] ayudan a eliminar elementos en el diseño y crear nuevos conceptos más innovadores. También coexisten otras metodologías puramente basadas en el diseño para ensamblar [57], [58], que evalúan la facilidad de ensamblado de componentes para optimizar el coste y el tiempo del proceso, pero tampoco tienen en cuenta los procesos de fabricación aditiva. Sin embargo, la introducción industrial de tecnologías de fabricación aditiva ha desembocado en la creación de nuevas metodologías, llamadas DfAM. Este tipo de metodologías tienen en cuenta las nuevas capacidades y posibilidades que proporcionan la fabricación aditiva y las limitaciones de los procesos convencionales [59].

Aun así, las metodologías explicadas abarcan las etapas de diseño y de concepto en la cadena de valor. No se ha encontrado una guía para el usuario que permita la modificación del diseño actual con el fin de que se pueda fabricar aditivamente de forma exitosa, y decidir si tiene sentido realizar el cambio del sistema de fabricación de convencional a aditiva. En la bibliografía existen algunas contribuciones sobre los métodos de ayuda a la toma de decisiones.

3.2 Sistemas de soporte a la toma de decisiones (DSS)

Los sistemas de soporte a la toma de decisiones, llamados en inglés DSS (*Decision Support System*), aparecieron a finales de 1960, mientras que la primera implementación se realizó en 1980 [60]. Según Turban [61], los DSS son sistemas de

información interactivos, flexibles y adaptables en base a ordenador, especializados en el desarrollo de soporte a la toma de decisiones para problemas concretos. Seguidamente, se definen las principales características para los sistemas DSS [60].

- Son sistemas diseñados específicamente para facilitar el proceso de toma de decisiones.
- Deben dar soporte más que automatizar la toma de decisiones. El objetivo es optimizar la efectividad y no la eficiencia en la decisión que se ha tomado.
- Deben responder rápidamente en dar una solución a los cambios en las necesidades.

Los sistemas de soporte a la decisión se han categorizado según diferentes criterios. Tomando como criterio el modo de asistencia que incorpora el sistema se pueden diferenciar cinco tipos [60]:

- **Document-driven:** son sistemas de soporte a la decisión basados en la búsqueda y recuperación de documentos.
- **Communication-driven (DSS-CD):** utilizan la red y la comunicación para facilitar la colaboración entre diferentes usuarios, realizando tomas de decisiones rápidas y productivas.
- **Data-driven (DSS-DD):** mediante datos provenientes de series temporales y el análisis de éstas se consigue generar información clave para la toma de decisiones.
- **Model-driven (DSS-MD):** a partir de modelos empíricos, analíticos o teóricos y mediante herramientas de optimización, se puede obtener información relevante para sugerir acciones.
- **Knowledge-driven (DSS-KD):** consiste en el soporte en la toma de decisiones basado en la experiencia y el conocimiento en un dominio en particular.

Según la interacción con el usuario, se han categorizado los sistemas DSS en tres grupos [60]:

- **DSS Pasivos:** el sistema no proporciona una decisión explícita o acciones de sugerencia, sino que ayuda en el proceso de toma de decisiones.
- **DSS Activos:** el sistema proporciona una solución explícita del problema a resolver.
- **DSS Cooperativo:** permite que las personas que toman decisiones puedan modificar las sugerencias provenientes del sistema hasta encontrar una solución adecuada.

Según el alcance del sistema a nivel de usuarios, se han determinado dos categorías [60]:

- **DSS multi-usuario:** dichos sistemas corren bajo un servidor y es utilizado por diferentes usuarios.
- **DSS único usuario:** esta tipología se ejecuta en un ordenador de un usuario.

3.2.1 Sistemas expertos (DSS-KD)

Uno de los métodos de soporte a la toma de decisiones de mayor interés es el sistema experto, basado en la experiencia o el conocimiento. Este tipo de sistema puede correr bajo un ordenador o un sistema de servidores. Dicho sistema proporciona una serie de sugerencias o posibles soluciones al usuario sobre un dominio acotado. Utiliza diferentes tipos de lógicas o algoritmos para la resolución del problema, como son: minería de datos, inteligencia artificial, métodos heurísticos y reglas si-entonces. Los DSS-KD siguen un esquema formado por cuatro componentes, tal como se muestra a continuación [60]:

- **Usuario:** que es la persona que utiliza el sistema DSS.
- **Interfaz de usuario:** es la parte del sistema que se comunica con el usuario.
- **Motor de inferencia:** es la lógica que relaciona la base de conocimiento y proporciona una conclusión al usuario.
- **Base de conocimiento:** es una base de datos que incluye la información y las reglas.

Además, existen unos vínculos que relacionan los anteriores cuatro componentes [60]:

- **Solicitudes:** referidos a los requerimientos entrados por el usuario en la interfaz y que son tratados en el motor de inferencia.
- **Resultados:** es la solución ante los requerimientos del usuario pasando por el motor de inferencia.
- **Datos:** refiere a la información requerida por la base de conocimiento para que el motor de inferencia pueda trabajar.

En la Figura 3.1 se muestra un esquema visual donde aparecen los anteriores componentes y relaciones.

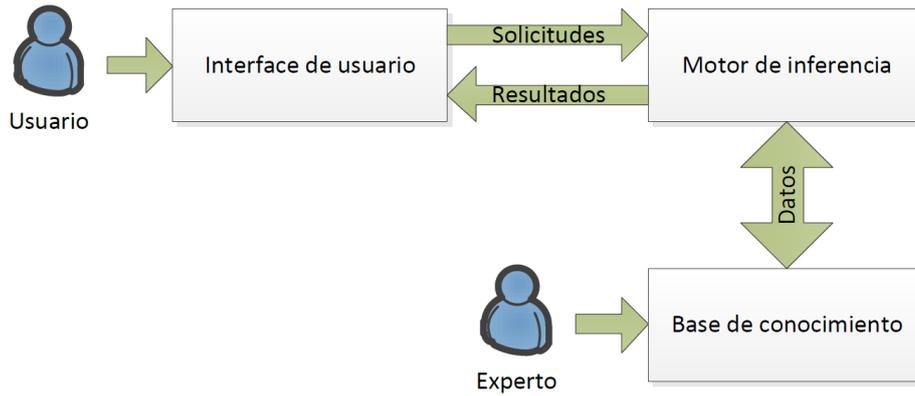


Figura 3.1. Esquema de toma de decisiones basado en el conocimiento. Fuente: [60].

En un sistema experto, la parte más importante es la base de datos de conocimiento, donde conviven una gran cantidad de datos e interrelaciones entre éstos. Lo que conlleva una serie de problemáticas que se describen a continuación [60]:

- **La representación del conocimiento:** la base de conocimientos está representada por unas reglas. Una de las estrategias más utilizadas son las reglas *if-then*, aunque la simplificación de estos sistemas es muy compleja y en ocasiones imposible.
- **Obtención del conocimiento de los expertos:** la transferencia de conocimiento desde el experto no es trivial. Se deben ir escribiendo las reglas en el código, así, es necesario una interfaz para la integración de nuevas reglas.
- **Resolución de conflictos de reglas:** la agregación de reglas por parte del experto genera conflicto entre éstas. Un algoritmo que permita la resolución de dichos conflictos es requerido por el sistema.
- **Generación de resolución:** la gran cantidad de datos y reglas pueden producir conclusiones de una forma no inmediata, siendo no práctico para el usuario.
- **Aprendizaje:** una de las técnicas más utilizadas es el aprendizaje autónomo, siendo muy atractivo para el buen mantenimiento del programa. Entre las nuevas líneas de trabajo se incorporan lógica difusa y métodos heurísticos.

3.3 DSS aplicados a la fabricación aditiva

Después de la aparición de las primeras tecnologías de fabricación aditiva, muchos otros sistemas de fabricación avanzada están entrando en el mercado. Al principio, los investigadores consideraron la posibilidad del uso de estas tecnologías para la fabricación de prototipos, y más tarde, se extendieron a la manufactura de utillajes y a la fabricación de pieza final. La selección de la tecnología, el material y los elementos del diseño más apropiados es todo un reto, y por ello, se han desarrollado varios

modelos y sistemas de soporte a la decisión. A continuación, se han recopilado los diferentes trabajos sobre DSS en el ámbito de la fabricación aditiva, siguiendo con el trabajo realizado por [62].

En 1993 Hornberger de la Universidad de Santa Clara [63] realiza el primer modelo que proporciona información sobre la elección de procesos de fabricación aditiva para el ámbito del prototipado rápido.

En 1996 Campbell y Bernie [64] mediante una base de datos con las capacidades, el volumen de fabricación y las propiedades del material de diferentes sistemas de prototipado rápido, desarrolla un sistema de toma de decisiones para elegir el proceso de fabricación.

El mismo año Muller, H., Bauer, J. y Klingenberg, H. H. [65] desarrollan un modelo para el ámbito del prototipado rápido que elige la tecnología más adecuada para una pieza dada. Se combinan los materiales con las tecnologías a partir de una base de datos que los relaciona. El criterio de selección se basa en el análisis de valor para determinar cuál es la mejor combinación material-proceso.

En 1997 Phillipson [66] desarrolla un sistema de recomendación de procesos para prototipado rápido basado en el despliegue de la función de calidad o QFD (*Quality Function Deployment*). Los criterios de selección son el tiempo de fabricación, el coste y la calidad. Se trata de un método solventado mediante una optimización multicriterio y validado por usuarios expertos.

En 1998 Durr y Kaschka [67] desarrollan dos metodologías, una de recomendación y un sistema de clasificación según unos criterios específicos. Dichos sistemas tienen en cuenta la cadena de valor, la calidad, el tiempo de proceso, el coste y el impacto ambiental. En este caso el procedimiento analiza y compara las tecnologías aditivas, la convencionales y las híbridas según unas entradas de información: la complejidad geométrica, el material, la calidad superficial, la precisión dimensional y el número de piezas a fabricar entre otros.

En 1999 Herman y Allen [68] realizan una metodología enfocada a la fabricación de moldes de inyección con tecnologías de resinas. La selección del proceso y el material más adecuado es el resultado de dicha metodología. Los criterios utilizados para la elección del material son la deformación máxima, la resistencia a la tensión y la deformación del material en función de la temperatura. En la decisión tomada para el proceso se tienen en cuenta criterios como la disponibilidad, el coste, la precisión y el tiempo de fabricación.

El mismo año Bibb [69] utilizando metodologías de sistemas expertos, compuestos por reglas y cálculos internos, es capaz de seleccionar tecnologías de prototipado rápido o de fabricación de utillajes. En este caso, la elección del material no se contempla, aunque se realiza una estimación de costes y tiempo. Los datos de entrada son la precisión dimensional y el espesor mínimo de pared.

Seguidamente Muller [70] crea un sistema basado en la comparación a pares dentro del marco de proyectos europeos llamado RAPTEC. Utilizando criterios de calidad se puede llegar a comparar diferentes tecnologías entre sí, sin llegar a decidir sobre qué proceso es el más adecuado.

En el 2000 Xu [71] realiza un modelo genérico basado en la rugosidad superficial, el tiempo de fabricación y el coste para cuatro tecnologías: SLA, SLS, FDM y LOM. Este método solamente permite realizar una comparación entre dichas tecnologías, pero no realiza una selección de la óptima.

Ese mismo año Kascha y Auerbach [72] crean una herramienta llamada *Protool*, un sistema experto formado por 180 reglas para la selección de la cadena de procesos más adecuado. El sistema esta soportado por una base de datos de máquinas, materiales y procesos.

Dos años después Masood y A.Soo [73] mediante un sistema experto basado en reglas desarrollan un selector de máquina y realizan diferentes tipos de encuestas a diferentes expertos del sector para validarlo. Este proyecto, llamado IRIS, se ha realimentado con nuevos procesos y máquinas para estar totalmente actualizado [74]. En conclusión, se trata de un sistema que ayuda al usuario en la selección de la máquina que debería adquirir para su aplicación específica sin tener en consideración los materiales.

En el 2003 Mahesh [75] propone una aproximación mediante *six sigma* para identificar las capacidades del proceso respecto el potencial, y posteriormente se valida el sistema con unos casos de estudio focalizado en el proceso DMLS, empleando una interfaz de usuario basado en plataforma web.

En 2005 Byun y Lee [76] desarrollan un sistema para la selección de máquina destinado a la fabricación de prototipos considerando algunos criterios: dimensiones, precisión, acabado superficial, esfuerzo de tensión y elongación. Mediante lógica difusa o *fuzzy logic* se determinan el tiempo y el coste de fabricación. El modelo utiliza métodos de clasificación y similitud para ayudar al usuario en la toma de decisiones.

A continuación Mahesh [77] desarrolla un sistema llamado IRPDMS (*Integrated Rapid Prototyping Decision Making System*) basado en lógica difusa para seleccionar la tecnología aditiva más adecuada para aplicaciones de prototipado y manufactura. Usando reglas tipo *if-then* se consigue tomar decisiones sobre cinco tipos de procesos: SLA, SLS, FDM, LOM y DLS.

Seguidamente Lan [78] utiliza la lógica difusa e integra sistemas expertos para el desarrollo de un sistema que selecciona el método de prototipado rápido más adecuado, teniendo en cuenta criterios de acabados superficial, costes, tiempos, dimensiones, complejidad y funcionalidad de la pieza. En este caso, no se incluye la selección de materiales.

En 2006 Hanumaiah [79] utiliza una combinación entre QFD y AHP (*Analytic Hierarchy process*) para desarrollar una herramienta de selección de tecnologías para el ámbito de los utillajes. En primer lugar, se clasifican los requerimientos mediante AHP y posteriormente se identifican cuáles son los parámetros críticos del proceso. No se contempla la selección del material y se valida a partir de algunos ejemplos industriales.

En 2007 Rao y Padmanabhan [80] crean una metodología basada en matrices gráficas, donde a través de nodos y flechas se representan los diferentes atributos que impactan sobre el proceso. Dicho sistema utiliza importancias para determinar una clasificación como resultado de la metodología. Entre los parámetros o atributos que se estudian destacan: la precisión, la calidad superficial, el tipo de material, características del diseño y de la máquina entre otros.

El mismo año Pal et al [81] combinan las técnicas de QFD y ANP (*Analytical Network Process*) para crear una metodología de colada de metales. Primeramente, se determinan los requerimientos basados en las necesidades del cliente y posteriormente el sistema selecciona los procesos más adecuados. Una de las limitaciones de dicha metodología es que no se considera la selección del material.

A continuación Pal y B. Ravi [82], basado en el trabajo realizado anteriormente [81], crean una clasificación de preferencias a partir de una base de datos incluyendo las capacidades de diferentes rutas e índices de compatibilidades para el ámbito de la fabricación de utillajes.

Seguidamente Nagahanumaiah et al. [83] evalúa la posibilidad de fabricación de utillajes mediante una metodología basada en lógica difusa y AHP utilizando tres criterios o aspectos. Éstos son: las características del molde en cuanto a su diseño, la compatibilidad y el coste. La metodología está dotada con una base de datos que

contiene elementos del proceso: la precisión dimensional, la calidad superficial y la compatibilidad a nivel geométrico. Entre las tecnologías que se contemplan destacan: los métodos convencionales, SLA, SLS y DMSL.

Por último, Armillota [84] propone un modelo de decisión basado en AHP, donde el resultado es una clasificación a partir de unos valores de prioridades. El modelo se enfoca en la selección de sistemas de prototipado rápido y de utillajes. En dicho modelo, no se considera la elección del material.

En 2008 Smith y Rennie [85] introducen una propuesta de selector para la fabricación directa llamada *RM Selector*. Se trata de una red de bases de datos interconectadas con información referente a máquinas, material y tecnologías. Principalmente, la función es de buscador ya que no ofrece una clasificación como resultado.

Ese mismo año Nagahanumaiah [86] mediante métodos QFD y siguiendo con la metodología realizada anteriormente [83], desarrolló un DSS para la fabricación rápida de utillajes, más concretamente para moldes de inyección. Con QFD relaciona los requerimientos de los utillajes versus la capacidad de los procesos y se priorizan mediante AHP. Se determinan y se comparan los costes estimados entre los moldes fabricados de forma convencional y mediante procesos aditivos.

En 2010 Gibson [87] desarrolla un modelo DSS para el ámbito de la manufactura directa basado en un sistema experto, donde el resultado es la selección de los posibles procesos y máquinas, incluyendo tiempos de operación y características del diseño. Dicho sistema está dotado con base de datos que se pueden actualizar e incluir nuevos parámetros.

También Munguia [88] realiza un sistema llamado RMADS (*Rapid Manufacturing Advice System*) basado en la combinación de lógicas difusas, sistemas expertos, bases de datos y redes neuronales. La lógica difusa se utiliza para realizar una clasificación obteniendo una estimación de costes de forma paramétrica. Las redes neuronales se utilizan para la estimación de tiempo de fabricación.

En 2011 Khrais et al. [89] utilizando técnicas de reglas es capaz de dar soporte a la decisión de sistemas de fabricación de prototipos, mediante variables cuantitativas y cualitativas. Dicha metodología se divide en dos grupos: la parte estática y la dinámica. La parte estática no depende de la aplicación, mientras que la dinámica sí.

En 2012 Mootaz [62] desarrolla una herramienta para asistir a los usuarios sobre la selección de procesos, métodos de acabado, materiales y máquinas. Se utilizan

técnicas de KBS y bases de datos. Además, el modelo se valida mediante tres casos de estudio y se somete a un proceso de evaluación con diferentes usuarios, para finalmente realizar una siguiente versión más efectiva.

En 2014 R. Bott [90] enfoca su trabajo en el ámbito de la fabricación directa. Realiza una metodología mediante técnicas de inteligencia artificial. El sistema está dotado también de una base de datos que interrelaciona materiales y máquinas. A partir de módulos de información, de costes, de tiempos y de materiales el sistema da soporte a la toma de decisiones comparando diferentes sistemas.

Seguidamente V. Shende y P. Kulkarni [91] proponen un nuevo método para la selección de procesos de prototipado rápido de acuerdo con los requisitos del usuario, mediante un sistema experto y la evaluación con lógica difusa. El proceso se divide en dos etapas: la primera se ejecuta en el entorno del sistema experto donde se obtienen las alternativas factibles. Y en la segunda, se utiliza la lógica difusa para ordenar los sistemas. Una de las características distintivas de este método es que se emplean medidas cualitativas y cuantitativas para proporcionar resultados más precisos. El sistema se compone de cuatro módulos: una base de datos, un sistema experto, un modelo con lógica difusa y una interfaz de usuario.

A continuación, B. Panda et al [92] propone una solución que integra AHP y TOPSIS (*Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution*) para la selección de sistemas de fabricación rápida de prototipos y pieza final. Como datos de entrada se contemplan los requerimientos del usuario. El método AHP se utiliza para determinar los pesos que se dan a los diferentes criterios y con TOPSIS se determinan las prioridades para las alternativas, obteniendo finalmente una clasificación de las tecnologías.

Por último, Y. Zhang et al [93] realiza un sistema de decisión basado en múltiples atributos. El resultado es la selección del proceso más adecuado para la fabricación de prototipos mediante la introducción de conocimientos y experiencias en base a indicadores. El modelo se valida con un caso de estudio obteniendo resultados satisfactorios.

En 2016 V. Kek et al [94] tiene como objetivo realizar un modelo conceptual mediante MATLAB, a partir de criterios medioambientales para seleccionar el proceso más adecuado teniendo en cuenta las propiedades mecánicas requeridas. Entre los sistemas de fabricación aditiva adaptados a esta metodología destacan SLS, SLA, 3DP y LENS.

En 2017 H.S Park y N.H. Tran [95] generan un sistema DSS a partir de los requerimientos del producto y los métodos de impresión. Utilizando las bases de datos de los materiales y las reglas se decide el sistema de fabricación más adecuado.

En 2018 J. K. Watson. y K.M.B. Tamingir [96] presentan un modelo computacional simple para determinar qué proceso es más eficiente energéticamente, si la fabricación aditiva o la fabricación sustractiva para la producción de una parte metálica dada. Las variables que se utilizan son: el volumen de envoltura y la fracción de sólido. El modelo considera todo el ciclo de vida de fabricación.

3.4 Limitaciones y oportunidades de investigación

Una vez estudiados los sistemas de soporte a la decisión y modelos realizados por parte de los diferentes autores referentes, se han analizado cuáles son los puntos comunes entre éstos y cuáles son sus limitaciones. De esta forma, se puede identificar las oportunidades de investigación y acotar la aportación del presente trabajo.

En la literatura que se ha analizado se puede observar que se han realizado multitud de modelos de decisión para diferentes ámbitos de la fabricación aditiva: *Rapid Prototyping*, *Rapid Tooling* y *Rapid Manufacturing*. Algunos de ellos integran los tres aspectos y otros solamente se centran en alguno de éstos.

Se presentan también diferencias en cuanto al enfoque de la problemática o el alcance de los estudios. Algunos autores tienen en cuenta toda la cadena de valor, otros se centran en la selección del proceso o del material, e incluso también se focalizan en la selección de la máquina y, en ocasiones, se trata de una combinación de algunas de ellas.

Algunos autores utilizan también criterios de selección: económicos, temporales, de usuario, medioambientales y energéticos. Se observan diferentes tipos de métodos para la resolución de la problemática; desde sistemas expertos, a partir de reglas, hasta sistemas de aprendizaje automático o *machine learning*, utilizando variables o datos de entrada referente a proceso, producto y material. Además, dichos sistemas pueden o no tener asociada una base de datos intermedia e interrelacionada con las diferentes variables.

Viendo la disparidad de métodos, enfoques, criterios y variables de entrada, se pueden resumir las limitaciones de las contribuciones de una forma objetiva, que se indican en los siguientes puntos:

- No se dan razones o alternativas al usuario cuando el sistema no encuentra una solución.
- Los DSS analizados se basan en la toma de decisiones de un proceso de fabricación aditiva y/o un material, dada una geometría concreta.
- No hay una integración de recomendaciones del diseño, fabricación y métodos de acabado.
- Las bases de datos que se utilizan en algunas metodologías pueden ser actualizables, siempre y cuando se modifique también la lógica de programación.
- Los sistemas observados son muy complejos para el buen entendimiento del usuario final.
- No aseguran el éxito de la fabricación de la pieza o conjunto, solamente da información sobre la selección del proceso, material o máquina.

En realidad, no todas las compañías tienen todas las tecnologías y materiales disponibles a su alcance, y por ello, los selectores desarrollados no siempre son útiles. Sin embargo, en la producción de una pieza siempre hay un diseño detrás y que en muchas ocasiones es susceptible de modificaciones para poderlo trasladar de un método de manufactura convencional a la fabricación aditiva o por capas.

3.5 Diagrama del proceso para realizar la metodología

En la Figura 3.2 se muestra de forma esquemática el diagrama de flujo de la metodología que se ha seguido a lo largo del presente trabajo. Dicha metodología se ha distribuido en tres etapas principales y en cada una de ellas se pueden identificar entre paréntesis los capítulos correspondientes.

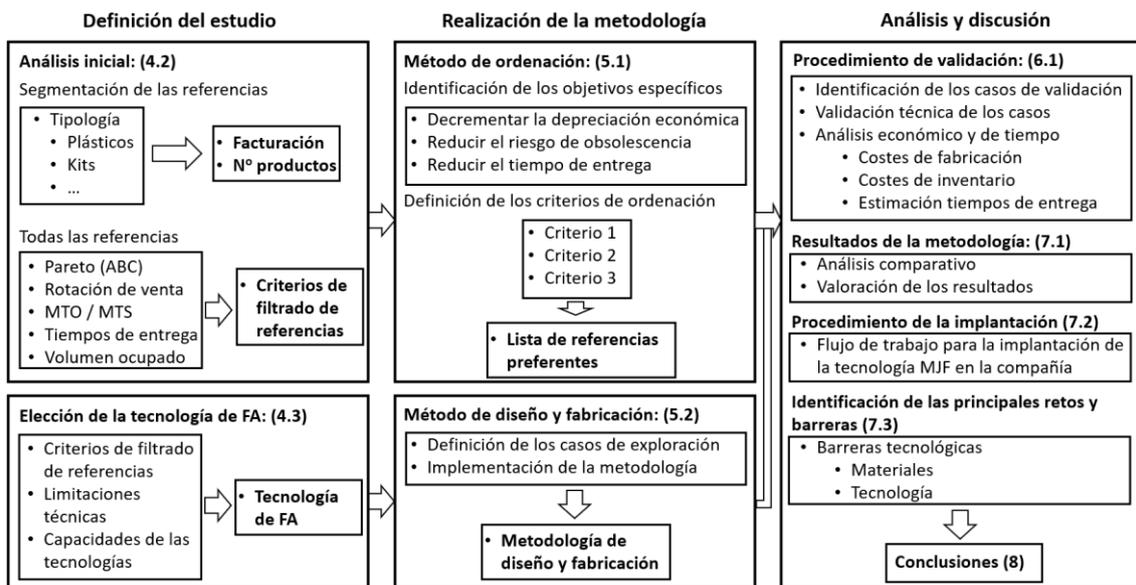


Figura 3.2. Diagrama de flujo seguido en el presente trabajo. Fuente: Propia.

En la primera etapa, llamada definición del estudio, se ha realizado un análisis inicial partiendo de la base de datos de referencias de la empresa dedicada al suministro de recambios del grupo Fluidra, Unistral Recambios. Seguidamente, se han segmentado dichas referencias por tipología y se ha analizado cuál es el impacto en la facturación y en número de productos de cada tipo. Además, se ha estudiado el Pareto, la rotación de venta, la estrategia de suministro MTO (Make To Order) o MTS (Make To Stock), los tiempos de entrega y el volumen de todas las referencias. A partir de los resultados del estudio se ha acotado el alcance de la tesis según unos criterios que han servido para filtrar las referencias que se desean analizar. Posteriormente a dicho filtrado se ha escogido cuál es la tecnología de fabricación aditiva que más se ajusta al portafolio de referencias de estudio, teniendo en cuenta la necesidad industrial y las capacidades tecnológicas.

En la segunda etapa se elabora un método de ordenación de las referencias por su preferencia persiguiendo unos objetivos específicos que son: decrementar la depreciación económica, reducir el riesgo de obsolescencia y reducir el tiempo de entrega. Para ello, se han escogido tres criterios que impactan sobre los objetivos definidos y se ha conformado una lista de referencias preferentes de ser fabricadas mediante tecnologías aditivas. En la cabeza de la lista se sitúan las referencias con mayor probabilidad de éxito en la transformación analógica-digital de la producción. Seguidamente, a partir de unos casos de exploración se ha implementado una metodología dirigida al rediseño y fabricación con la tecnología *Multi Jet Fusion* y poliamida 12. Dicha metodología contiene un bloque que se encarga de realizar una estimación de los costes para validar que el cambio en el sistema de producción es viable para el negocio.

En la tercera etapa se ha definido e implementado el proceso de validación mediante los ensayos de unos casos de estudio y su posterior análisis de costes y tiempos de suministro. Seguidamente se han valorado los resultados obtenidos de la metodología y el análisis de costes. Además, se ha procedido a la definición de un plan de implantación para la organización y se han identificado los principales retos y barreras de la tecnología y los materiales para integrar fabricación aditiva en las organizaciones industriales. Por último, se han enumerado las diferentes conclusiones fruto del trabajo realizado.

3.6 Diseño y fabricación mediante Multi Jet Fusion

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, convierte un modelo tridimensional (CAD) en un objeto físico sin la necesidad de moldes o utillajes,

transformando la manufactura de analógico a un método digital. Sin embargo, en la transición de los prototipos visuales a los prototipos funcionales o la fabricación directa aparecen nuevos retos en el ámbito mecánico y de materiales [50].

La tecnología HP *Multi Jet Fusion* (MJF) fue diseñada para abarcar el nicho de mercado referente a prototipado funcional y a la fabricación de pieza final, obteniendo resultados similares a procesos de transformación de plásticos. Este tipo de tecnología es considerado *High Speed Sintering* (HSS) o sistemas de sinterización de alta velocidad [97]. Dicho tipo de sistemas sinterizan por mascarar sin la necesidad de un láser, similar a la tecnología *Binder Jetting* (BJ). Los cabezales de MJF utilizan agentes funcionales en los lugares donde se desea fusionar el material. Siendo capaces de imprimir treinta millones de gotas por segundo en el espacio de impresión [98]. Dicho proceso, permiten una muy buena precisión dimensional ($\pm 0.2\%$), comparado con otras tecnologías [99]. La velocidad de impresión, la precisión dimensional y la alta calidad en las piezas impresas convierten esta tecnología en un interesante sistema de fabricación. El proceso de producción de la MJF se define en diferentes etapas tal como se observa en la Figura 3.3.



Figura 3.3. Flujo de trabajo propuesto para la MJF. Fuente: [100].

En primer lugar, se envían los diseños virtuales al software de la máquina que posiciona y parametriza la fabricación de la pieza. Una vez fabricado, es necesario un periodo de enfriamiento donde las piezas tienen una contracción controlada, ya que es un termoplástico. Una vez enfriadas las partes, se deben extraer las piezas y el material para su posterior separación y reciclado. Después de retirar el material sobrante de la pieza es requerido una limpieza de ésta mediante procesos abrasivos. Por último, y según la funcionalidad de la pieza final, se puede realizar un postproceso de coloreado entre otros.

3.6.1 Apariencia

En este subapartado se desea explicar en detalle los procesos de limpieza y postproceso de las piezas resultantes de la fabricación. Por ello, se exponen las diferentes alternativas y procedimientos para llevar a cabo dichas actividades.

Posteriormente a la fabricación de un lote de piezas, éstas se preparan para la limpieza. Para ello, existen diferentes alternativas como son: el granallado y el chorreado entre otros. En la Figura 3.4, se muestra el flujo de trabajo para los procesos de chorreado manual por aire y con esferas o perlas.



Figura 3.4. Flujo de trabajo de granallado y chorreado de aire. Fuente: [100].

Por lo general, la presión de operación del chorreado que se suele utilizar está entre 3,5 y 4 bar a una distancia de unos 10-15 cm. El tiempo de operación depende directamente del volumen de la pieza. Asimismo, el material de chorreado utilizado son perlas de vidrio o componentes de silicio. La ventaja principal de este tipo de sistema es que no afecta ni en dimensiones ni en propiedades mecánicas a la pieza. Las desventajas son el alto tiempo de procesado, la curva de aprendizaje y la dependencia de un operario. Sin embargo, existen otras soluciones para automatizar el proceso, como es el chorreado automático, que se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.5. Flujo de trabajo del chorreado automático. Fuente: [100].

Posteriormente a la limpieza existen diferentes tipos de postprocesos, los más extendidos son: el infiltrado de color, el pintado, el chorreado de grafito y el granallado. El infiltrado de color es una de las técnicas más utilizadas en el ámbito de la fabricación aditiva por su simplicidad. En la Figura 3.6, se puede observar el flujo de trabajo del proceso de coloración por infiltración.



Figura 3.6. Flujo de trabajo de la infiltración de color. Fuente: [100].

Este tipo de proceso consigue uniformizar el color de la pieza llegando a todos los detalles y cavidades de ésta. Es posible infiltrar varias piezas a la vez, aunque se trata de un proceso dependiente de un operario y bastante largo a nivel temporal. Las piezas fabricadas mediante SLS pueden ser coloreadas en cualquier color, en cambio, las piezas producidas mediante MJF solamente pueden ser coloreadas en negro o colores oscuros por el momento, ya que resultado de la pieza final es muy oscuro y por lo tanto no se le puede aplicar colores claros en infiltraciones. Otro proceso de homogeneización del color es el chorreado de grafito. Dicho proceso mejora la uniformidad del color mediante un chorreado de impacto de grafito. Da un aspecto muy lustroso a la pieza, aunque se va perdiendo con el tiempo. La repetitividad del proceso depende del operario, aunque las propiedades dimensionales y mecánicas no se alteran. Para introducir colores diferentes al negro o colores oscuros, la solución pasa por pintar la pieza. Dicho proceso es muy manual y costoso a nivel de tiempo, por ello, es necesario pasar por diferentes etapas: imprimado, lijado, pintado, barnizado y secado. Se trata de un proceso manual, pero con la ventaja de que las piezas pueden ser pintadas en todos los colores. En la Figura 3.7 se muestra el flujo de trabajo para el proceso de pintado.



Figura 3.7. Flujo de trabajo en el proceso de pintado. Fuente: [100].

Por lo general, el pintado es un proceso manual donde el resultado es dependiente del operador. Sin embargo, existen algunas limitaciones vinculados a la geometría ya que si hay recovecos en el diseño es posible que no se pueda llegar a pintar.

El proceso de granallado se suele utilizar para mejorar las superficies consiguiendo rugosidades más bajas mediante un proceso semiautomático. Asimismo, es importante tener en cuenta que los medios abrasivos deben ser escogidos teniendo en cuenta los requerimientos de las piezas (formas, medidas, materiales, etc.). Además, este tipo de sistemas pueden dañar algunas partes, como son, pequeños detalles del diseño o los cantos vivos. En la Figura 3.8 se muestra el flujo de trabajo del proceso de granallado.

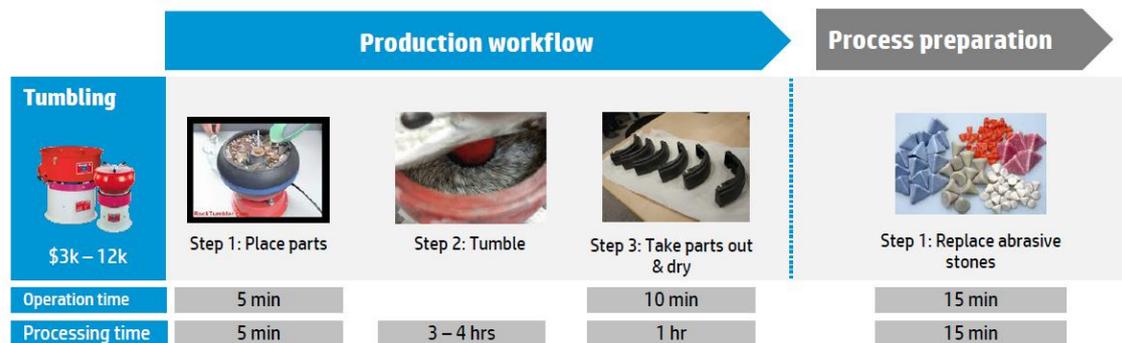


Figura 3.8. Flujo de trabajo en el proceso de granallado. Fuente: [100].

3.6.2 Diseño de piezas plásticas

En este apartado se explica en detalle las características de diseño más importantes en pieza plástica. Aunque mediante fabricación aditiva se puede fabricar cualquier geometría la integración de características de diseño de procesos convencionales es muy usual, tal como son: engarces o clips, uniones, bisagras, nerviados, etc. Por ello, seguidamente se explica en detalle cada uno de éstos y se relaciona el diseño con las tecnologías de fabricación.

Las uniones por **engarce o clips** es el método más simple y rentable de montaje. Un buen diseño de engarce permite el ensamblaje y el desmontado sin ningún efecto

adverso. Las uniones por engarces es también la forma más ecológica de montaje debido a que al ser un mismo material es fácil de reciclar. Esta solución es ideal para materiales termoplásticos debido a su elevada flexibilidad y su bajo coeficiente de rozamiento. Sin embargo, dichos elementos suelen encarecer la fabricación del molde por su complejidad, aunque, si se fabrica con tecnologías de fabricación aditiva, el coste industrial no se ve afectado. Mediante MJF, existe gran dependencia de las propiedades mecánicas según la orientación de impresión. Por ello, es necesario orientar los engarces paralelos al plano XY para conseguir mejor flexión y recuperación del material. Existen diferentes tipos de uniones por engarce, en la Figura 3.9 se muestran los más utilizados en los diseños de pieza plástica.

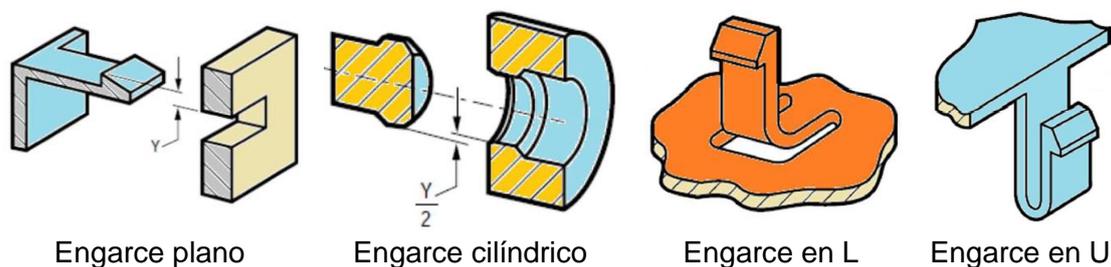


Figura 3.9. Tipos de engarces. Fuente: [101].

Mediante MJF es posible fabricarlos, pero es requerido tener en cuenta el mínimo espesor de pared que depende directamente del radio de aspecto, definido como la longitud dividido por la anchura, tal como se muestra en la Figura 3.10.

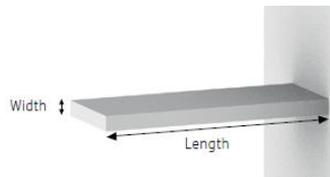


Figura 3.10. Relación de aspecto de engarces. Fuente: [102].

Para engarces con un espesor por debajo de 1 mm, la relación de aspecto debería estar por debajo de la unidad. Para espesores mayores de 1 mm no hay recomendaciones específicas [102].

La **unión con tornillos** metálicos es una alternativa que se utiliza frecuentemente para el montaje de piezas de plástico. Las uniones resultantes son capaces de soportar esfuerzos permanentes incluso para aplicaciones con altas temperaturas. Además, con el uso de elementos de sellado también se pueden obtener uniones herméticas. Las uniones atornilladas tienen como finalidad fijar de forma permanente o temporal dos o más piezas en una posición en concreto. Para ello, se requiere de una fuerza de apriete aplicada al tornillo para que permanezca en la misma posición durante un largo periodo

de tiempo. La fuerza de apriete aplicada debe ser mayor a los esfuerzos que se ejercen durante su funcionamiento, el transporte o su manipulación. Por lo general se suele sobredimensionar el tornillo cuando las características mecánicas del material plástico no son suficientes para soportar los esfuerzos. Las uniones atornilladas deben resultar fáciles de montar, por ello, se suelen utilizar tornillería que forman su propia rosca al ser atornillados a la pieza de plástico, así se crea la rosca hembra mediante el desplazamiento del material. Los tornillos formadores de roscas o también llamados tornillos autorroscantes, son muy utilizados ya que realizarlos durante la inyección significa un encarecimiento del molde y una mayor duración del ciclo. En fabricación aditiva la generación de la rosca no supone un coste adicional, sin embargo, en muchas ocasiones la precisión dimensional de la máquina no es capaz de fabricar correctamente dichas roscas cuando son muy finas. En cambio, cuando dichas roscas son gruesas la fabricación directa mediante MJF es totalmente viable sin afectación en el coste final de la pieza.

Para conformar la rosca hembra por desplazamiento del material plástico resultan adecuados los tornillos provistos de rosca para chapa y madera (DIN 7970 y DIN 7998, respectivamente). Aun así, existen toda una gama de tornillos diseñados para unir piezas de plástico. La principal diferencia con los tornillos destinados a chapa y madera radica en que tiene un diámetro del núcleo (d) menor y, por lo tanto, una mayor profundidad del filete. El ángulo del filete (α) de estos tornillos está comprendido entre los 30° y 45° . En la Figura 3.11 se muestran los tipos de tornillo según el material de aplicación.

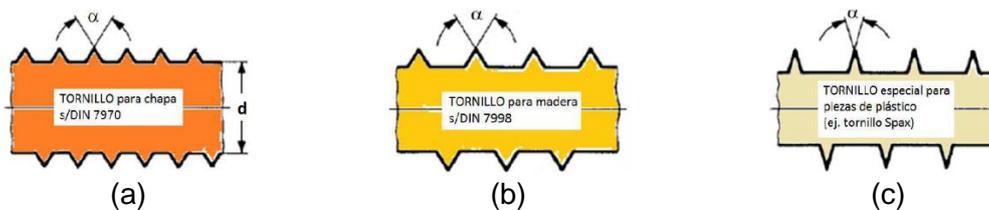


Figura 3.11. (a) Tornillo de chapa, (b) tornillo de madera y (c) tornillo para plástico. Fuente: [101].

Para que se forme la rosca matriz es imprescindible que el plástico ofrezca suficiente tenacidad, es decir, que se deforme sin agrietarse. Existen diferentes parámetros críticos en el diseño de uniones atornilladas, entre ellos, los factores que influyen en el par de apriete y las fuerzas que actúan sobre las uniones. La capacidad de carga de una unión atornillada, compuesta por la fuerza de extracción (F) y el par de apriete (M), es directamente proporcional a la superficie cilíndrica sometida a cizallamiento que resulta del producto del diámetro nominal del tornillo (d) y de la longitud de atornillado (L), tal como se muestra en la Figura 3.12.

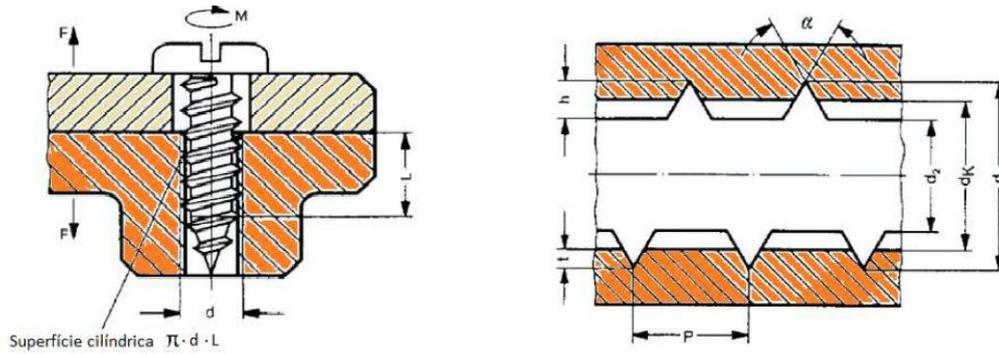


Figura 3.12. Variables que influyen en la capacidad de carga de una unión atornillada. Fuente: [101].

Por longitud de atornillado se entiende la distancia de tramo roscado por el tornillo que engarza en el plástico. La capacidad de carga de una unión atornillada depende directamente también de la penetración del filete (t). Asimismo, aumentando la profundidad del filete (h) incrementa la capacidad de carga a la unión atornillada. El paso del filete (P), entendido como la distancia entre dos hilos de roscas consecutivos, determina junto a la profundidad del filete (h), el espacio a disponer para acoger el plástico desplazado. Al introducir el tornillo en el taladro cilíndrico, el hilo de rosca penetra a modo de cuña en el plástico, formando una rosca hembra. La profundidad de penetración y , por consiguiente, la cobertura de filete (t), son tanto mayores cuanto menor es el ángulo del filete (α). El diámetro del talador (d_k) influye decisivamente sobre la penetración de filete (t) obtenible, la cual determina la capacidad de carga de la unión resultante. La fuerza previa aplicada durante el montaje produce pequeñas deformaciones en la pieza de plástico, sujeta a un esfuerzo de compresión (p), en sentido longitudinal al del tornillo, tal como se muestra en la Figura 3.13.

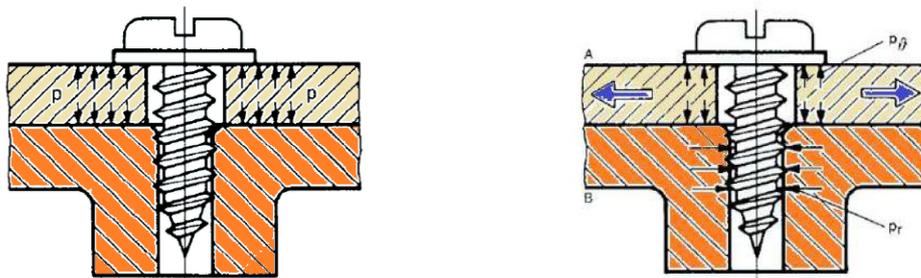


Figura 3.13. Deformación del material sometido a una fuerza de compresión. Fuente: [101].

El esfuerzo de compresión da lugar a la relajación parcial del material y produce parte de desplazamiento de éste en sentido lateral, siguiendo la dirección de las flechas azules. Para evitar problemas con las dilataciones y contracciones del material, se suelen intercalar elementos elásticos. En tales casos resultan adecuadas arandelas de resorte según DIN 137 o arandelas tensoras según DIN 6796, tal como se muestra en la Figura 3.14.

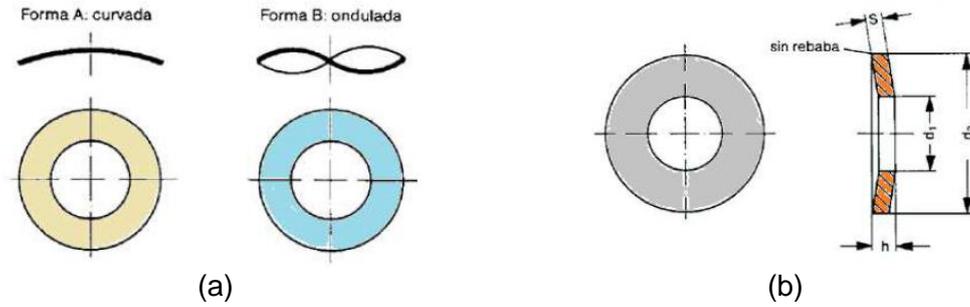


Figura 3.14. (a) Arandelas de resorte (b) Arandela tensora. Fuente: [101].

Se debe tener en cuenta que las uniones realizadas con tornillos autorroscantes pueden hacerse y deshacerse un número limitado de veces. Para ello, es necesario que los tornillos vuelvan a coincidir con la misma rosca que se formó al principio. También existen otras soluciones, en caso de que no sea posible instalar tornillos autorroscantes, que se explican a continuación y son compatibles con la fabricación aditiva.

Mediante **tuercas de fijación rápida** se puede atornillar directamente sin necesidad de tener una rosca hembra. Por ello, es una buena solución siempre que sea posible introducir en el diseño tuercas de fijación rápida. Estas tuercas fabricadas normalmente en acero disponen de dos garras adaptadas al paso del filete, que se encargan de guiar el tornillo. Al roscar el tornillo, las garras quedan apretadas contra el núcleo de la rosca con lo que la unión obtenida es autoblocante y a prueba de vibraciones. Diseñando adecuadamente las tuercas éstas pueden instalarse previamente en la pieza de plástico, de manera que no puedan extraviarse. En la Figura 3.15 se muestran las tuercas de fijación rápida.

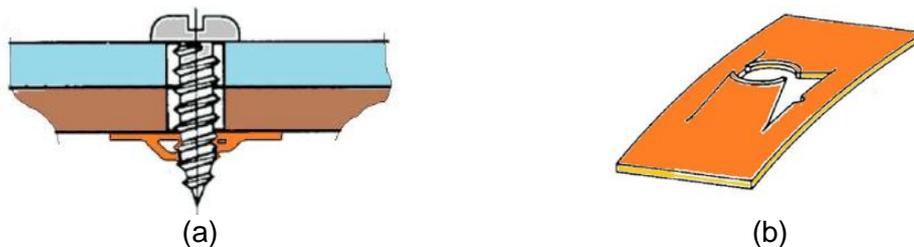


Figura 3.15. (a) Unión con tornillo (b) Tuerca de fijación rápida. Fuente: [101].

También es posible utilizar **tornillos métricos**, se suelen utilizar DIN 13 ya que resultan los más indicados para introducirlos directamente en piezas de plástico, debido a su profundidad de filete relativamente escasa. En la Figura 3.16 se muestra una unión realizada con tornillo y tuerca en piezas plásticas.

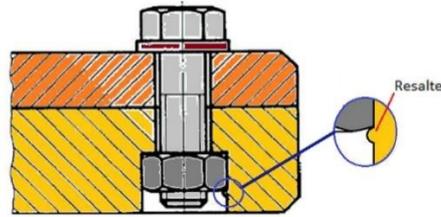


Figura 3.16. Unión realizada con tornillo y tuerca. Fuente: [101].

Para facilitar el montaje, la tuerca se fija frecuentemente en una escotadura provista de resaltes. Para evitar la deformación de las piezas de plástico a causa de la fuerza aplicada a los tornillos, se puede introducir adicionalmente en el taladro delgado un casquillo metálico estriado externamente. La longitud de dicho casquillo corresponde a la suma de los gruesos de las paredes de ambas piezas de plástico, tal como se muestra en la Figura 3.17.

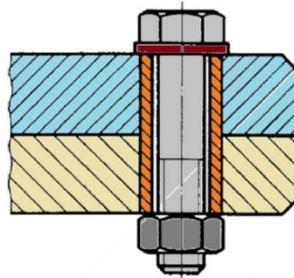


Figura 3.17. Unión realizada con tornillo, tuerca y casquillo. Fuente: [101].

Además, este tipo de solución ofrece ventajas en piezas sometidas a variaciones en la temperatura. Para aplicaciones donde el montaje y el desmontaje de las piezas plásticas son frecuentes, se acostumbra a introducir **insertos metálicos** en el interior de las piezas plásticas. En la inyección de plástico se suele introducir dichos insertos dentro del molde y posteriormente se introduce el polímero. Esta técnica, llamada sobremoldeo, automatiza el proceso y disminuye el coste industrial de la pieza. En fabricación aditiva no es posible automatizar el proceso por el momento. Por ello, es requerido introducir los insertos metálicos posteriormente a la fabricación. Existen diferentes procedimientos de introducción de insertos: por moldeo (a), por ultrasonidos (b y c), térmicamente, anclado mecánicamente (d y e) o por expansión (f). En la Figura 3.18 se muestran los diferentes tipos de insertos para cada proceso.

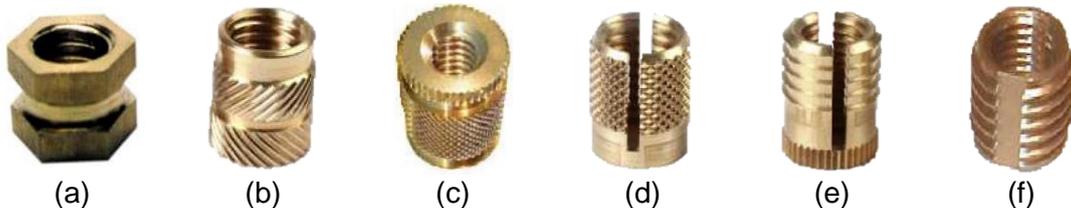


Figura 3.18. Tipos de insertos metálicos roscados. Fuente: [101].

Los insertos metálicos que se pueden introducir en las piezas resultantes de MJF son los insertos anclados térmicamente, por ultrasonidos, mecánicamente y por expansión. Todos éstos se deben introducir posteriormente a la fabricación, limpieza y postproceso de la pieza final.

En caso de que se requiera de un macho, en vez de una hembra, existen uniones por espárragos roscados. También existen de diferentes tipos y se pueden introducir durante la inyección o posteriormente. En la Figura 3.19 se muestran los dos esquemas de uniones posibles.

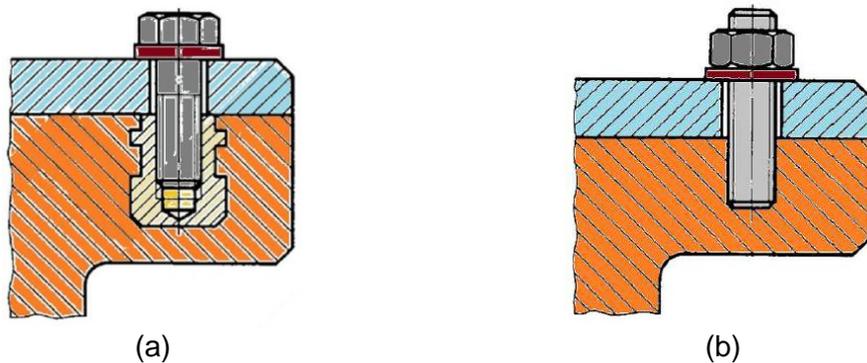


Figura 3.19. (a) Inserto metálico hembra (b) Inserto metálico macho. Fuente: [101].

Al dimensionar alojamientos destinados a casquillos y espárragos roscados, hay que tener en cuenta que resulta necesario un grueso mínimo de paredes para evitar agrietamientos. Se considera suficiente con diámetro exterior (D) mayor o igual a 1,6 veces el diámetro interno (d_B), tal como se muestra en la Figura 3.20.

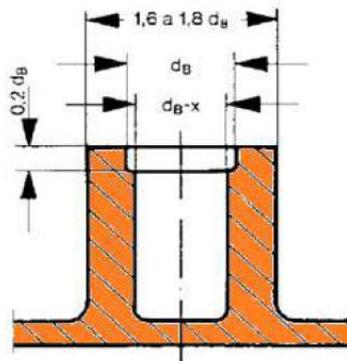


Figura 3.20. Reglas de diseño para los insertos roscados. Fuente: [101].

Al introducir mediante ultrasonidos o térmicamente casquillos se debe dejar una distancia mínima en el taladro de aproximadamente 0,4 mm, tal como se muestra en la Figura 3.21.

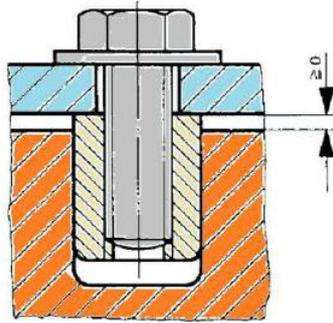


Figura 3.21. Disposición de un casquillo. Fuente: [101].

Para todos los casquillos se procura que la arista superior engrase con el alojamiento, con lo que la fuerza longitudinal de los tornillos se transmitirá directamente al casquillo. Hay procurar también que exista contacto entre el inserto y con los casquillos insertados, tal como se muestra en la Figura 3.22, donde se contemplan las buenas prácticas para casquillos insertados.

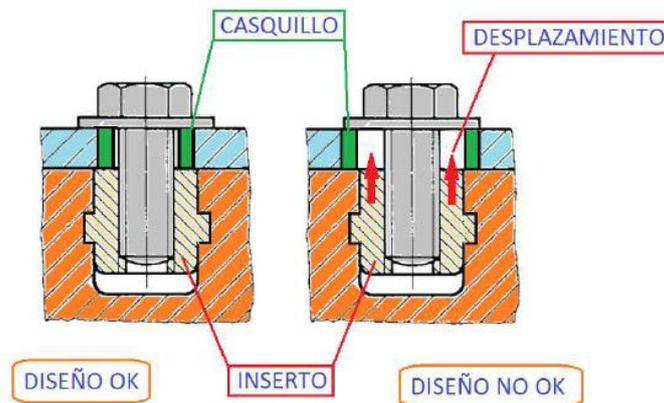


Figura 3.22. Disposición de los topes y casquillos. Fuente: [101].

Los métodos de **soldadura** permiten la unión permanente de dos piezas, ya sea porque se debe introducir algún dispositivo en el interior o por que las restricciones en la fabricación no permiten realizarlo en una sola pieza. En fabricación aditiva dicha restricción desaparece permitiendo la generación de diseños huecos o geometrías complejas siempre y cuando la aplicación lo requiera.

Las técnicas de soldadura se aplican cuando dos piezas, cuyos materiales son compatibles han de ser unidos. La soldadura es una interconexión de cadenas moleculares que se consigue mediante un aumento de la temperatura durante un tiempo determinado. Debido al punto de fusión relativamente bajo de los termoplásticos es una alternativa técnicamente viable para las uniones permanentes. El calor en la línea de soldadura se puede generar directamente a través del contacto o indirectamente a

través del movimiento o por inducción. En la Tabla 3.1 se muestran diferentes técnicas de soldaduras.

Tabla 3.1. Técnicas de soldadura y generación de calor. Fuente: [101].

Fuente	Técnica	Fenómeno
Calor	Placa caliente	Contacto/Radiación
	Gas caliente	Convección
	Infrarrojos	Radiación
Fricción	Vibración	Fricción dinámica
	Rotación	
Sonotrodo	Ultrasonido	Pérdida por amortiguación
Eléctrica	Inducción	Pérdidas por histéresis
	Resistencia	Conductor de calentamiento

Los **adhesivos** se utilizan primordialmente cuando es necesario unir materiales que son químicamente incompatibles o porque la aplicación lo requiere. Para conseguir una buena unión es necesario tener una buena adhesión a la superficie y la cohesión en la capa del adhesivo. La adhesión es una combinación de fenómenos químicos y mecánicos, y a menudo son necesarios tratamientos superficiales para mejorar la adhesión a la superficie del plástico. En el caso de los materiales semi-cristalinos, como son las poliamidas de MJF, tienen una baja polaridad o tensión superficial que necesita ser aumentada para permitir la unión de los adhesivos. Los procesos de oxidación, como son los tratamientos de plasma, llama y radiación UV incrementan su polaridad. Además de esto, en ocasiones son necesarias imprimaciones para conseguir una buena adhesión. A nivel de cargas y de diseño se prefiere siempre las fuerzas de separación a cortadura, a compresión y a tracción. En la Figura 3.23 se muestran algunos consejos de diseño para encolar dos piezas plásticas.

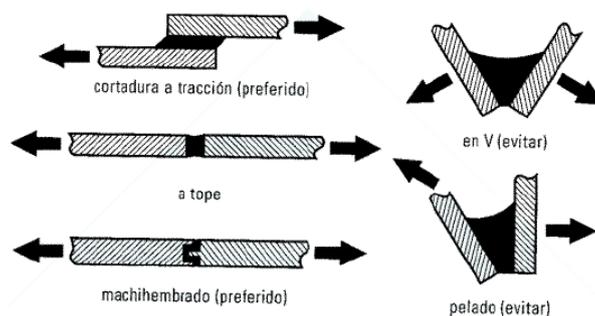


Figura 3.23. Diseño para unión mediante adhesivos. Fuente: [101].

La rigidez de una pieza se define como la relación entre la fuerza y la deflexión y puede ser aumentada a partir de **nervios** en el diseño. La propiedad mecánica del material que caracteriza la rigidez es el módulo de Young, que puede ser extraída de la curva tensión-deformación. Se distinguen tres tipos de cargas que puede sufrir un plástico: tracción-compresión, flexión y torsión. En fabricación aditiva el diseño

de nervios no supone un coste asociado siendo posible fabricar cualquier geometría sin tener en cuenta las limitaciones del proceso. En la Figura 3.24 se pueden observar diferentes configuraciones de nerviado para la resistencia a la flexión.

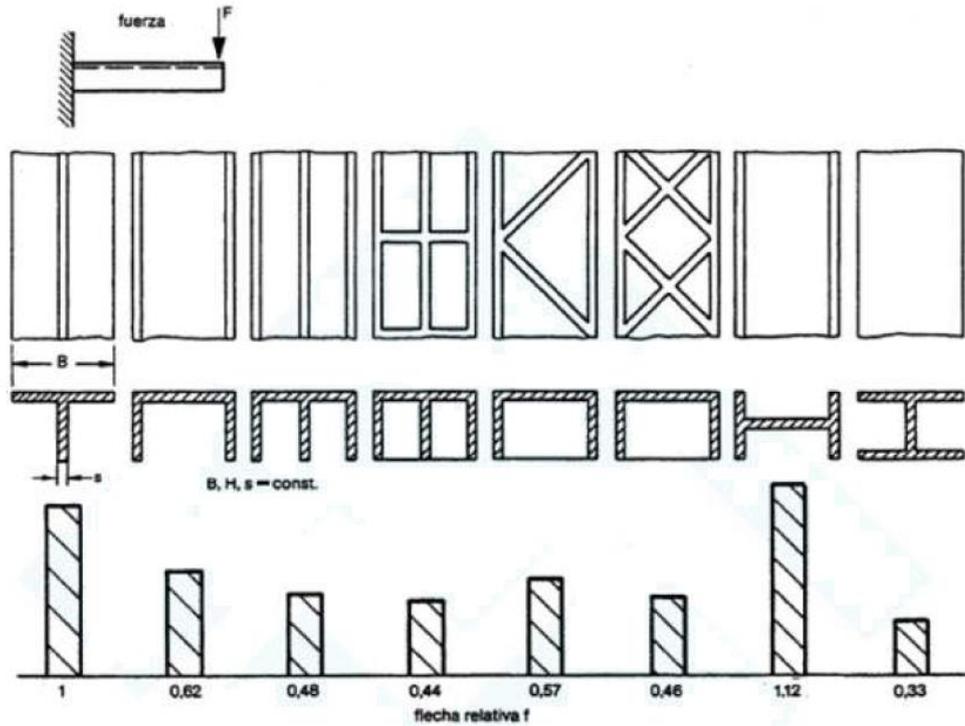


Figura 3.24. Resistencia a la flexión para diferentes estructuras. Fuente: [101].

En la Figura 3.25 se pueden observar diferentes configuraciones de nerviado para la resistencia a la torsión con los valores de rigidez relativa.

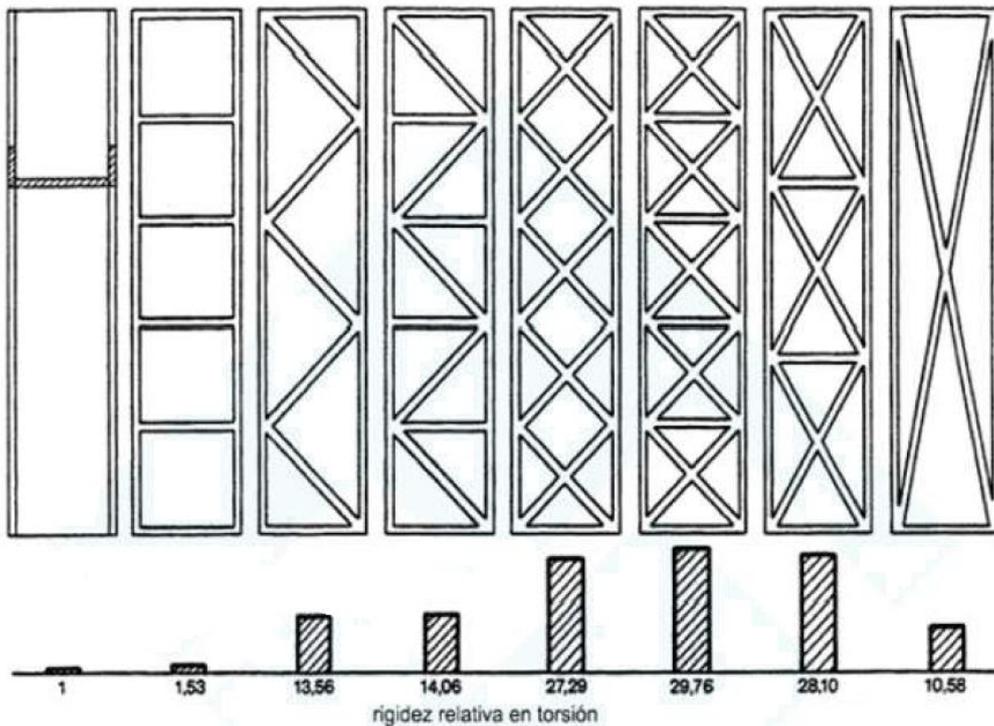


Figura 3.25. Resistencia a la torsión para diferentes estructuras. Fuente: [101].

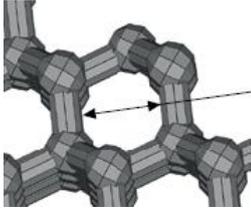
Las articulaciones, denominadas también **bisagras integrales**, son uniones elásticas entre dos piezas realizadas con el mismo material termoplástico. En inyección de plásticos es muy crítico el diseño de dichas bisagras, ya que en el proceso de moldeo supone un obstáculo para el paso del polímero. Esto puede ocasionar diferentes problemas, como son atrapamientos de aire y el no llenado completo de la pieza. En fabricación aditiva esta restricción no existe, aunque es necesario tener en cuenta el espesor de película para conseguir la funcionalidad deseada. Para el diseño de bisagras los materiales más utilizados son el PP, PE y las poliamidas por su alto módulo de elasticidad.

3.6.3 Fabricación con MJF

En este apartado se pretende explicar detalladamente las diferentes limitaciones de la fabricación de la tecnología MJF, concretamente HP Jet Fusion 3D 4200. Para ello, se ha recopilado toda la información relativa obtenida del fabricante [102] y se ha representado en la Tabla 3.2, donde se muestra en detalle las características técnicas de fabricación con MJF que se deben tener en cuenta.

Tabla 3.2. Características técnicas de fabricación de MJF. Fuente: [102].

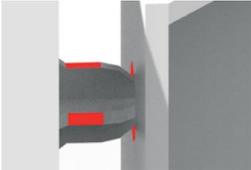
Característica	Explicación
	<p>El diámetro mínimo de agujeros y extrusiones debe ser de 0,5 mm, para asegurar la creación de éste.</p>
	<p>Se permiten realizar rendijas de hasta 0,5 mm. Por debajo de estas medidas puede haber riesgo de que no se genere rendija por la fusión del polvo.</p>
	<p>MJF permite los grabados con buena resolución y definición con tamaños de letra a partir de 6 pt y una profundidad/altura a partir de 1 mm. Los grabados extruidos es mejor situarlos cara arriba mientras que los grabados internos es mejor situarlos cara abajo en la cámara de fabricación a causa de las contracciones del material.</p>
<p>Precisión dimensional</p>	<p>MJF puede llegar a precisiones de $\pm 0,2\text{mm}$ hasta 100 mm, por encima de dicho valor se considera $\pm 0,2\%$. Para conseguir buenos resultados en términos de precisión dimensional se recomienda orientar las partes críticas en el plano XY. Los cuerpos cilíndricos se deben orientar de forma vertical siempre que sea posible.</p>



Para mallas tridimensionales el hueco mínimo debe ser de 1 mm para asegurar la salida del material después de su fabricación. Normalmente, se utiliza aire comprimido para facilitar la salida del material.

Espesor mínima de pared

En general, el espesor mínimo de pared recomendado es de 0,3 mm para pequeñas paredes orientadas en el plano XY y 0,4 mm para paredes cortas orientadas en el plano Z.



Para que dos piezas impresas puedan ensamblarse de forma correcta se recomienda dejar distancias entre las superficies de contacto de 0,4 mm, ya que las tolerancias de fabricación se sitúan en $\pm 0,2$ mm.



El espacio mínimo para las piezas ensambladas que se imprimen juntas debe ser de 0,7 mm. Aquellas piezas con un grueso de pared por encima de los 50 mm deben tener un espaciado mayor para preservar el adecuado comportamiento.

Geometrías huecas cerradas

MJF construye piezas fundiendo el área de forma selectiva capa a capa. Si la parte contiene una geometría hueca cerrada es necesario diseñar orificios de drenaje. Por ello, se recomienda realizar dos orificios, entrada y salida de aire comprimido, con un diámetro mínimo recomendado de 2 mm.

Dimensiones de la parte



Las piezas pueden ser tan grandes como la capacidad máxima de la cubeta (380x284x380 mm). Si la pieza es mayor es requerido realizar una división de la parte y unir las mediante adhesivos. Se recomienda realizar un diseño de enclavamiento para posicionar las piezas y facilitar el proceso de encolado. Se sugiere dejar un espacio entre las piezas de 0,1-0,2 mm entre las paredes. Para la PA12 se utilizan adhesivos como: cianoacrilato, resinas epoxis o adhesivos base neopreno. Se recomienda también quitar el exceso de adhesivos que puede cambiar el color, la apariencia o el brillo de la parte visible, también lijar y limpiar la superficie con adhesivo.



Para retirar el material de conductos estrechos, se suele considerar el diseño de un tira o cadena en el interior del conducto. Cuando las piezas están impresas se estira de dicha cadena para desalojar la mayor parte del material. El material restante se puede retirar mediante el proceso de limpieza normal.

Rugosidad

La rugosidad de las caras expuestas en el plano XY o paralelas es de 12-14 $\mu\text{m Ra}$. Mientras que el resto de las caras tienen una rugosidad de 8 $\mu\text{m Ra}$. Para conseguir rugosidades menores existen diferentes métodos: mecánicos y químicos. Mediante vibradoras con abrasivos (plásticos o cerámicos) se puede alcanzar hasta 1,5 $\mu\text{m Ra}$, aunque puede ser agresivo con detalles de diseño, ya que los puede romper. Con ataques químicos se puede alcanzar fácilmente 1 $\mu\text{m Ra}$ e incluso 0,1 $\mu\text{m Ra}$ en los mejores casos, similar a la inyección. Este último proceso puede impactar sobre las propiedades dimensionales y las propiedades mecánicas.

Superficies curvas o texturizados

El efecto escalón es un fenómeno que aparece en muchas tecnologías de fabricación aditiva por el mero hecho de construir piezas capa a capa. Para poder evitar dicho efecto en las superficies inclinadas o curvas, se recomienda evitar siempre que sea posible posicionar la parte con ángulos menores de 30° en el plano horizontal (XY). Para conseguir superficies lo más suavizadas posibles se recomienda posicionar la parte crítica cara abajo y cuando se trata de superficies texturizadas con ángulos agudos se recomienda enfocarlos cara arriba.

4 Análisis de la situación actual

En el presente capítulo se ha realizado un estudio de la situación actual de la compañía, enfatizando en mostrar la problemática a partir del análisis de los datos de fabricación y de operación de las referencias. El objetivo es identificar las referencias susceptibles de ser producidas mediante la tecnología de fabricación aditiva, por ello, la investigación se va a centrar en el conjunto de piezas con mayor impacto económico.

4.1 Contexto

Como se ha dicho inicialmente, el grupo Fluidra trabaja con más de 20.000 artículos, existiendo referencias con una alta variabilidad en la demanda. Las piezas se fabrican en los centros productivos de todo el mundo y son enviadas hacia un almacén centralizado en Maçanet de la Selva (Girona). Una vez en el almacén, se empaquetan las piezas y posteriormente se envían a los clientes. En la Figura 4.1 se muestra un esquema identificando cual es la infraestructura interna de la empresa y su flujo de trabajo.

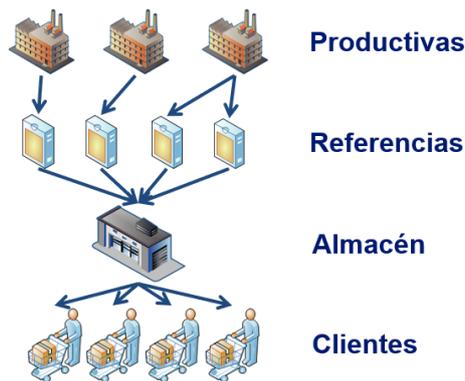


Figura 4.1. Infraestructura interna del grupo Fluidra. Fuente: Propia.

El análisis se ha realizado en la empresa que se dedica al suministro de recambio del grupo Fluidra, llamada Unistral Recambios. El principal problema es el suministro de los recambios con baja rotación, ya que la empresa está obligada por ley a suministrarlos a sus clientes por un tiempo mínimo de cinco años. Los productos que han tenido pocas ventas, descatalogados y/o con mucha antigüedad al final del ciclo de vida sus recambios suelen ser poco demandados y los costes asociados unitarios muy elevados.

En el presente trabajo se pretende solventar, mediante la introducción de tecnologías aditivas, el problema derivado de la gran disparidad de demandas en los recambios, más concretamente, las referencias con baja demanda. Este hecho dificulta el proceso de gestión de logística e incrementan los costes asociados al suministro. Por política de empresa y por la tipología de producto, las referencias que no roten por encima de los

5 años pierden todo su valor monetario contablemente y entran en riesgo de obsolescencia. Asimismo, aquellas referencias que se conviertan en obsoletas es muy probable que tengan un coste asociado por reciclado.

Analizando a nivel temporal un artículo de recambio el proceso es el siguiente: en primer lugar, la productiva fabrica una cantidad determinada de dicho recambio, llamado lote óptimo. Dicho lote es fabricado por alguna de las siguientes causas: por una rotura de stock, también llamado *Make To Stock* (MTS), o por una nueva comanda, o *Make To Order* (MTO). Dependiendo de la rotación de la referencia y otros criterios, se decide qué metodología de inventario se utiliza. De las dos formas siempre se crea un lote dedicado al suministro de recambios. En el mejor de los casos, se consumirán las referencias a un ritmo lo bastante rápido para que no exista casi depreciación económica y/o riesgo de obsolescencia, permaneciendo la referencia en inventario el tiempo mínimo imprescindible. La realidad casi nunca se asemeja a un escenario ideal, por ello en muchas ocasiones las unidades no vendidas permanecen en el inventario durante largos periodos de tiempo. En la Figura 4.2, se muestra un esquema del modelo de suministro explicado anteriormente. En color rojo se ha marcado el trayecto de las referencias del tipo MTO.

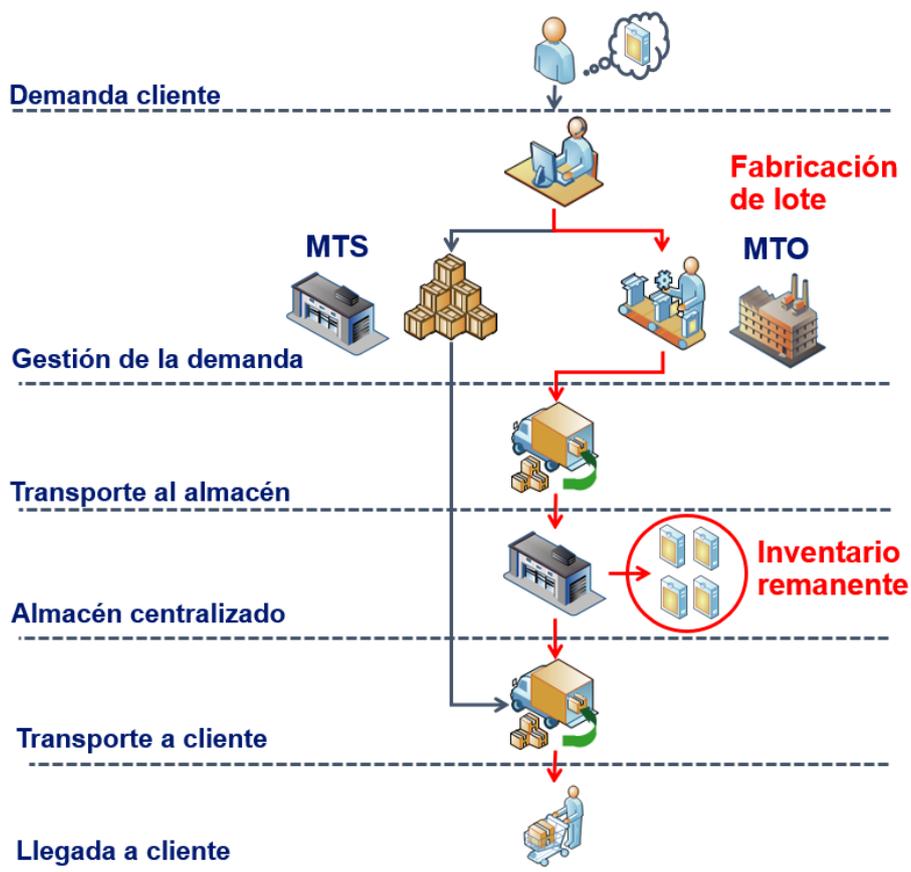


Figura 4.2. Flujo de trabajo de suministro de recambios. Fuente: Propia.

Según Raymond Vernon [103], en su teoría del ciclo de vida de un producto define cuatro etapas en función del tiempo. La primera etapa es la introducción del producto al mercado, donde los clientes aún no son conscientes de su existencia y la demanda de éste es baja. La segunda etapa, denominada crecimiento, las ventas del producto aumentan de forma exponencial. La madurez del producto llega en la siguiente etapa, donde se estabilizan las ventas a causa de que dicho producto ya está introducido en el mercado hasta que finalmente se satura. La última etapa es llamada declive, donde las ventas disminuyen por la introducción de otros productos más llamativos e innovadores. En esta última etapa, la demanda de producto y de recambios se ven afectadas, siendo el momento ideal para la introducción de tecnologías de fabricación de baja productividad, como es la fabricación aditiva. Esta aproximación puede ser muy beneficiosa para cualquier industria, ya que el mercado poco a poco tiende a ciclos de vida de producto más cortos, un ejemplo es la industria del móvil, donde cada vez se lanzan más modelos y gamas por unidad de tiempo. Por esta razón nació *lean manufacturing*, que en pocas palabras lo que intenta es alcanzar que el ritmo de fabricación sea igual al ritmo del consumo.

A continuación, se enumeran los objetivos específicos que se persiguen con la implementación de dicha metodología en la empresa de suministro de recambios:

- Evitar la depreciación económica por remanencia en el inventario.
- Disminuir el riesgo de obsolescencia.
- Reducir los costes asociados al suministro.
- Mejorar significativamente la experiencia del cliente, decrementando el tiempo de espera con un sistema de suministro de recambios más eficiente.

4.2 Procedimiento del análisis

En primer lugar, se ha realizado un análisis exploratorio de los datos obtenidos del ERP- *Enterprise Resources Planning* proveniente de Unistral Recambios, para un periodo de tiempo determinado. En una primera búsqueda sin acotar o filtrar, se han encontrado 8.403 referencias, que se han categorizado de la siguiente forma:

- Kits: es un conjunto de diferentes piezas, que pueden estar compuesto de una pieza plástica, una junta de estanqueidad y tornillería.
- Plásticos: son piezas plásticas provenientes de inyección, soplado o mecanizado.
- Químicos: son sustancias químicas como puede ser: cloro, ácidos y bases.
- Eléctrico: comprenden motores, cables eléctricos y conectores entre otros.

- Mecánicos: son elementos estándar como son: tornillería, sellos mecánicos y arandelas.
- Elastómeros: comprenden elementos basados en materiales elásticos, principalmente juntas de estanqueidad y membranas.
- Filtración: incluyen lechos filtrantes, membranas y cartuchos de filtración.
- Medición: comprende sensores y dispositivo de medición de temperatura, alcalinidad y oxígeno activo entre otros.
- Otros: incluye elementos comprados por proveedores externos o elementos plásticos estándar, como pueden ser cajas de conexiones.

Si se analizan en número de referencias las anteriores categorías se puede intuir cuáles son los niveles de importancia de cada una.

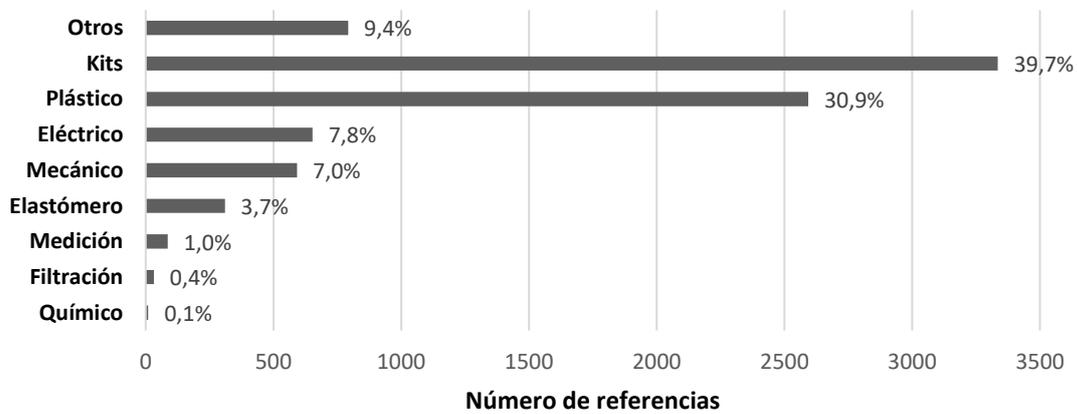


Figura 4.3. Número de referencias y porcentaje de las categorías de producto. Fuente: Propia.

Tal como se puede observar en la Figura 4.3, las piezas tipo “plástico” y “kits” son las que tienen más impacto sobre las demás, suman más de un 70% de las referencias totales. Para determinar cuál es el impacto económico máximo que puede tener el presente trabajo, se ha analizado de dichas categorías la facturación total que suponen.

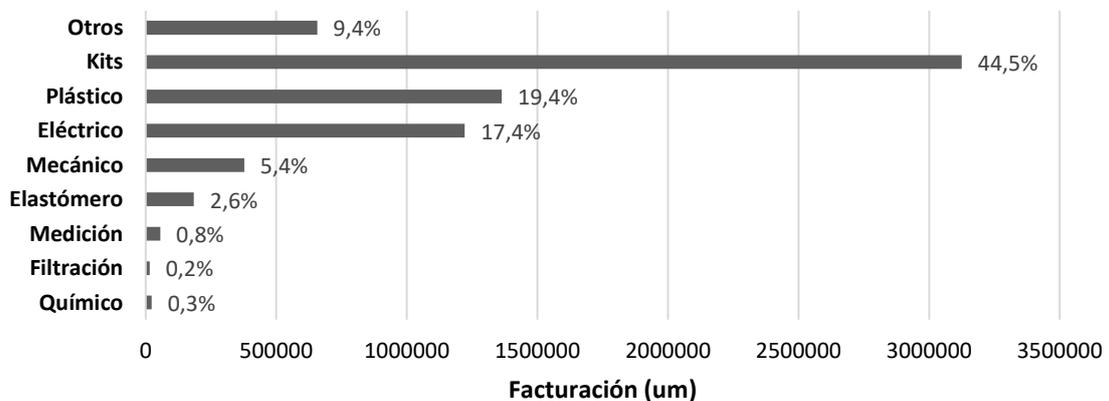


Figura 4.4. Facturación y porcentaje sobre el total de las categorías. Fuente: Propia.

Como se muestra en la Figura 4.4, las categorías “kits” y “plástico” suman alrededor del 64% de la facturación total de la empresa. La hipótesis más optimista contempla que si todos los componentes plásticos pudieran ser impresos mediante fabricación aditiva, impactaría sobre más de la mitad de la facturación total. Uno de los aspectos más relevante en la decisión de qué piezas son más susceptibles a ser fabricadas aditivamente, es la rotación de las referencias. En la Figura 4.5 se muestra una gráfica tipo Pareto donde se percibe una distribución del número de líneas o pedidos de cada referencia.

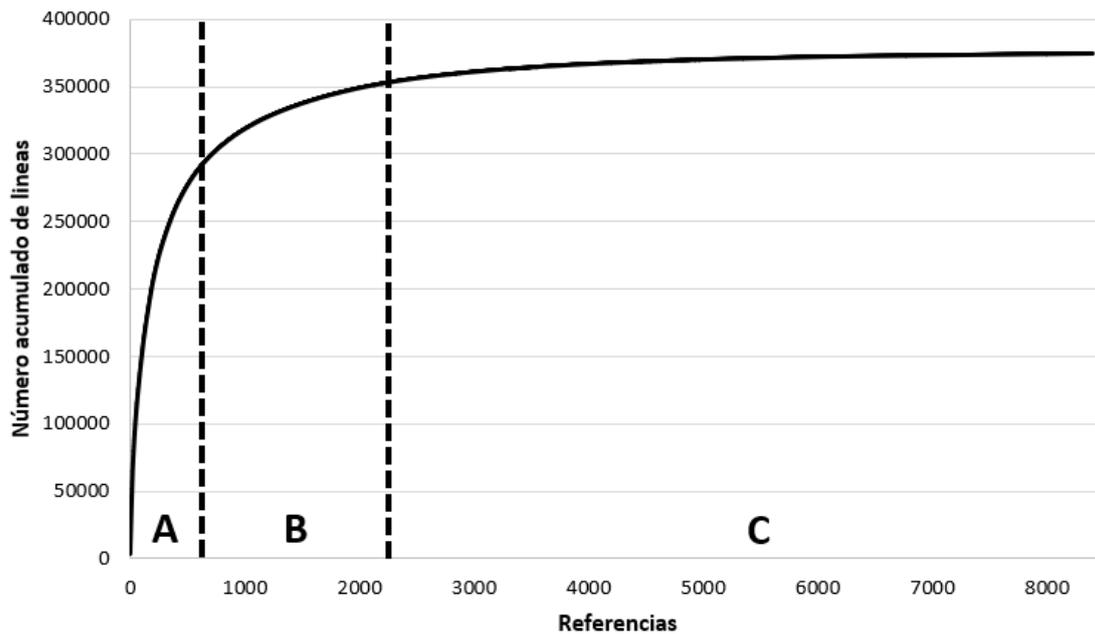


Figura 4.5. Distribución A-B-C de todas las referencias. Fuente: Propia.

La anterior gráfica de Pareto sectoriza tres niveles de población “A”, “B” y “C”. El sector “A” comprende el 80% de los pedidos o comandas. El sector “B” se refiere al 15% de los pedidos y, por último, el sector “C” que incluye el 5% de los pedidos restantes. En la Tabla 4.1 se muestran los datos obtenidos para cada sector.

Tabla 4.1. Datos obtenidos del conjunto de todas las referencias de Pareto. Fuente: Propia.

	Sector A	Sector B	Sector C
Nº de referencias	713	1760	5930
Nº comandas o líneas (Máxima)	3541	82	12
Nº comandas o líneas (Media)	420	32	3
Nº comandas o líneas (Mínima)	82	12	1

Es evidente que existe una cola de referencias, correspondiente al sector C, que se traducen en problemas en la cadena de suministro. Asimismo, el número de líneas o comandas no representa la rotación de los productos, sino la frecuencia de pedidos por referencia. La rotación de venta de las referencias se ha contabilizado como la relación

entre el número de unidades vendidas respecto el número de líneas para cada referencia, y se ha representado en la Figura 4.6.

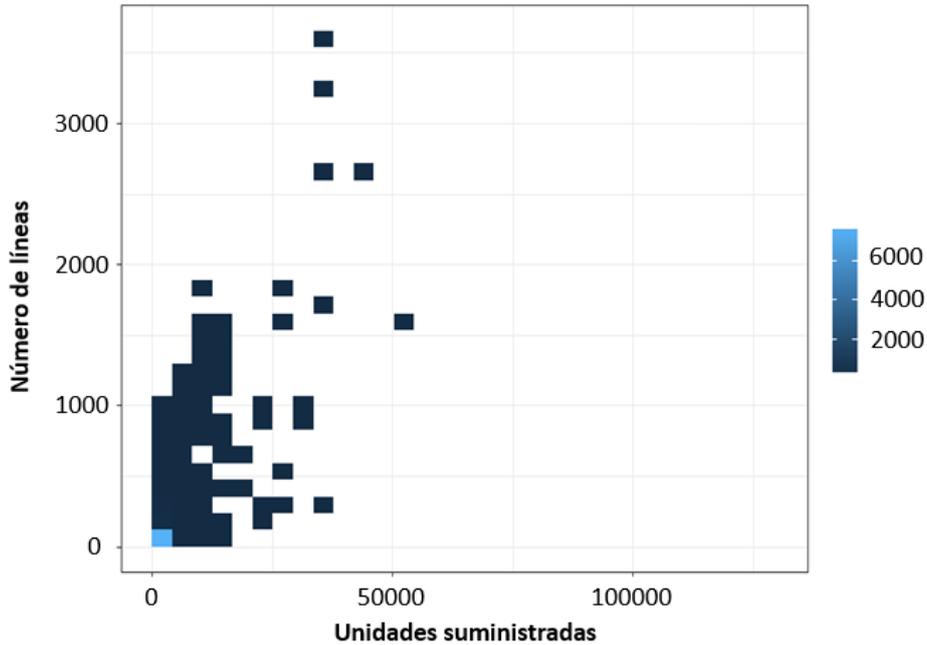


Figura 4.6. Representación de la rotación para todas las referencias. Fuente: Propia.

Se puede observar una tendencia muy clara donde por cada comanda o línea las unidades asociadas son escasas, aunque existe una dispersión de los valores. Es un resultado lógico, cuando se analiza una empresa que se dedica al suministro de recambios. Este hecho conlleva a pensar que la producción unitaria con procesos de fabricación digital tiene sentido aplicarlo en el grupo Fluidra.

Además, a nivel de estrategia de inventario por la rotación de dichas referencias la mayoría de éstas se han clasificado como MTO, es decir, que se fabrican cuando se demandan. En la Figura 4.7 se observa la clasificación de las referencias en MTO, MTS y MT? (no clasificado).

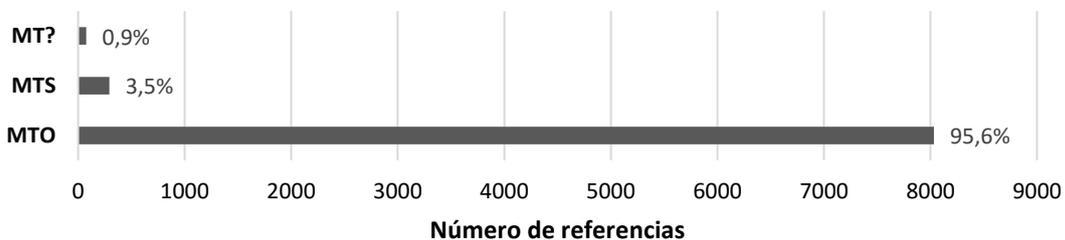


Figura 4.7. Clasificación de las referencias en MT?, MTS y MTO. Fuente: Propia.

En cuanto al tiempo de entrega de las referencias, existe una disparidad de valores significativa. En la Figura 4.8 se muestran los valores obtenidos del análisis representado en un diagrama de caja. Se entiende como tiempo de entrega, el tiempo

transcurrido desde la petición de la comanda hasta el momento de entrega del recambio al cliente final.

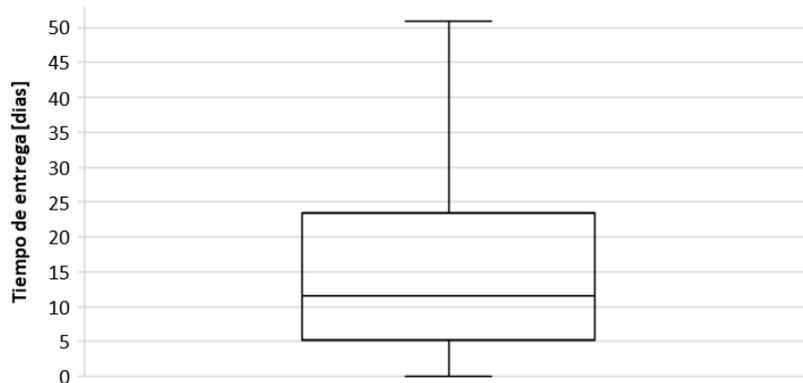


Figura 4.8. Diagrama de caja para los tiempos de entrega de las referencias. Fuente: Propia.

Lo que se puede observar, es que el 25% de las comandas se entregan entre 0 y 5 días. De hecho, el 50% de las comandas se entregan en 12 días o menos. Por tanto, el 50% restante de las comandas se entregan entre 12 y 53 días. No se puede concretar un tiempo de entrega objetivo, ya que depende del tipo de producto y la urgencia para el cliente. Asimismo, se pretende reducir el tiempo de entrega de aquellas referencias más críticas.

Las tecnologías de fabricación aditiva, por lo general, no son capaces de fabricar piezas de grandes dimensiones, el volumen de fabricación suele estar por debajo de los 4 dm³. Además, las piezas de grandes dimensiones no suelen ser viables económicamente, ya que el coste es directamente proporcional al volumen de impresión entre otros parámetros. Por ello, se analiza la dispersión de volúmenes ocupados de pieza a partir de los resultados obtenidos que se muestran en la Figura 4.9.

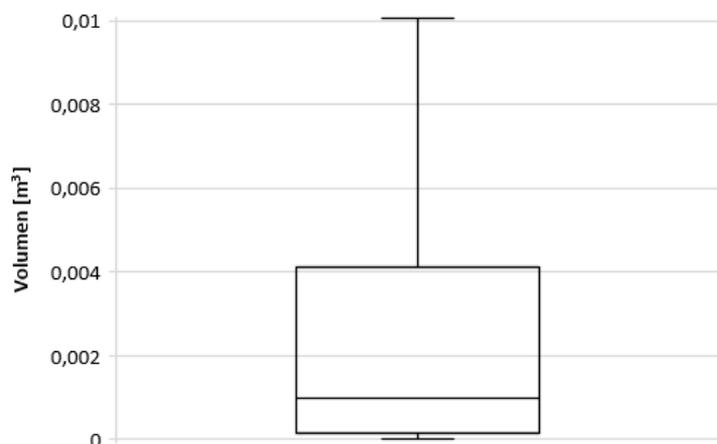


Figura 4.9. Diagrama de caja para los volúmenes de las referencias. Fuente: Propia.

El 75% de las referencias están por debajo de 4 dm³ aproximadamente. Aun así, existe una tendencia en términos de frecuencia de piezas cuyo volumen está por debajo de 1 dm³, correspondiente al 50% de la muestra.

Una vez realizado el análisis de la empresa de recambios del grupo Fluidra, Unistral Recambios, es coherente tomar una decisión sobre el alcance del proyecto y concretar cuál será el dominio de aplicación de la metodología. A partir del anterior análisis se ha decidido acotar la investigación siguiendo las siguientes directrices:

- En una primera instancia solamente se contemplará el grupo categorizado como “Plásticos”, ya que supone más del 30% de todas las referencias. Siendo la transformación de plástico una de las unidades de negocio más expandida es coherente observar dichos resultados. Además, coincide la necesidad industrial con la capacidad tecnológica, ya que las tecnologías de fabricación aditivas dedicadas al plástico son las que están más al alcance.
- Se pretenden analizar las referencias categorizadas como MTO, que suponen un 95% del total de las referencias y cuyos tiempos de entrega son mayores por la naturaleza de producción y suministro. No se tienen en cuenta las referencias MTS, ya que existe un stock de seguridad por su relativa alta rotación. Dichas referencias no tienen riesgo de depreciación y obsolescencia.
- Se considerarán solo las referencias con volúmenes inferiores a 4 dm³, que como se ha dicho, corresponden a un 75% de las referencias.

4.3 Elección de la tecnología de fabricación aditiva

Entendiendo el dominio del proyecto y las características de las referencias de estudio, se ha podido establecer una serie de puntos que definirán la tecnología apropiada para la cual se basará la metodología de diseño y fabricación. La tecnología escogida debe cumplir los siguientes requerimientos:

- Debe ser una tecnología de fabricación aditiva enfocada a la transformación de plásticos.
- Debe estar preparada para la producción de series cortas asegurando la calidad dimensional y la repetitividad.
- Debe poder fabricar piezas totalmente funcionales, con materiales durables y con propiedades de estanqueidad.

Actualmente, existen diferentes tecnologías de fabricación aditiva que trabajan con plásticos o resinas como son: SLS, SLA, FDM y MJF. Las piezas fabricadas con tecnologías de hilo, como es FDM, tienen propiedades anisotrópicas [104] y además es

necesario realizar recubrimientos para conseguir propiedades de estanqueidad [105], siendo los costes asociados a la fabricación de la pieza más elevados. La tecnología SLA, junto a otras tecnologías en base a resinas, utiliza materiales que son sensibles a la luz ultravioleta y puede incluso degradarse con el tiempo y perder propiedades mecánicas, tal como se ha visto en algún estudio [106]. Además, dichas resinas en contacto con agua o humedad cambian las dimensiones de las piezas, no siendo una buena solución para la fabricación directa [107]. En cuanto a la tecnología SLS, al trabajar con termoplásticos semicristalinos no hay un impacto significativo en el envejecimiento, pero es necesario realizar infiltraciones o recubrimientos para conseguir estanqueidad en las piezas por causa de la porosidad interna [108]. La tecnología de HP MJF consigue fabricar piezas con isotropía planar y con propiedades de estanqueidad a partir de materiales termoplásticos [109]. Finalmente, se ha decidido escoger la tecnología MJF para el desarrollo de la metodología de diseño y fabricación por las razones técnicas comentadas anteriormente y por cubrir la necesidad industrial con la capacidad tecnológica.

5 Desarrollo de la metodología

En este capítulo se explica en detalle la metodología de diseño y fabricación propuesta. En primer lugar, se desarrolla una primera metodología para identificar las referencias más susceptibles de ser fabricadas mediante fabricación aditiva, con el fin de confeccionar una lista de referencias prioritarias. En segundo lugar, se desarrolla la metodología de diseño y fabricación para la tecnología de fabricación aditiva escogida, *Multi Jet Fusion* de HP. Por último, se expone la integración de la metodología propuesta en un sistema informatizado.

5.1 Método de ordenación

El volumen de artículos susceptibles de ser transformados es demasiado alto para abarcarlo todo en el presente trabajo uno a uno. Por ello, en la primera fase se realiza una ordenación para identificar aquellas referencias que son más susceptibles de ser fabricadas mediante fabricación aditiva. Para hacer dicha lista de referencias preferentes es requerido un procedimiento de ordenación, donde las primeras referencias son las que tienen más sentido fabricar mediante métodos aditivos y las últimas las que tienen menos viabilidad.

Tal como se ha comentado anteriormente, se enumeran los objetivos específicos que se quieren alcanzar:

1. Decrementar la depreciación económica-contable de la referencia causada por el tiempo de permanencia en inventario. Según la política de la organización, cuando una referencia permanece más de dos años en inventario, se pierde hasta el 50% de su valor.
2. Reducir o eliminar el riesgo de obsolescencia de las referencias. Una referencia que no tiene rotación durante cuatro años o más pierde el 100% de su valor.
3. Reducir el tiempo de entrega de recambios para dar un mejor servicio de suministro al cliente.

Los dos primeros puntos son cruciales para la empresa ya que impactan sobre la cuenta de resultados contables, siendo muy importante para el crecimiento, la optimización de costes y mejora de la percepción para futuros inversores. El tercer punto, no menos importante, proporcionara al cliente final satisfacción sobre la marca y la compañía, contentándole con un servicio más rápido y eficiente.

Como se ha dicho anteriormente, el alcance del presente trabajo abarca solamente las referencias cuya categoría es “plástico”, MTO y que el volumen ocupado sea menor a 4 dm³, tal como se ha comentado en el capítulo anterior. Después de filtrar la búsqueda

de las referencias extraídas del ERP según los criterios anteriores se han obtenido unas 1847 referencias que constituyen el 13,8% de la facturación total, que serán las que se evaluarán.

El resultado de dicha búsqueda es una lista de referencias, a la que posteriormente se le aplicarán unos criterios que permitirán obtener una lista priorizada de referencias. Los criterios escogidos tienen relación con los objetivos que se desean alcanzar y se basan en las siguientes consideraciones:

- Criterio 1: Asociado al valor añadido en el diseño

El primer criterio tiene una correlación directa con la probabilidad de éxito de traspasar el proceso de fabricación del proceso convencional a aditivo. Asimismo, para hacer dicho traspaso, el coste asociado a la fabricación para una pieza, cuyo diseño es complejo, deberá ser muy similar que, para el proceso convencional, así las piezas complejas en el diseño serán factibles económicamente para el negocio.

- Criterio 2: Asociado a las referencias con baja rotación

El segundo criterio impacta sobre el objetivo de la depreciación económica y el riesgo de obsolescencia. Aquellas referencias con baja rotación tienen una probabilidad alta de que su inventario sea remanente en el tiempo, desembocando en problemas financieros para la empresa. El primer y segundo criterio tienen como objetivo reducir los costes asociados a la fabricación y el inventario.

- Criterio 3: Asociado a los tiempos de entrega

Del tercer criterio depende la satisfacción del cliente final. Las referencias cuyo tiempo de entrega sean más alto, tendrán más sentido realizarlas mediante fabricación aditiva. Así, se pretende conseguir un suministro de recambios mucho más eficiente en términos de costes y tiempo. Dicho criterio tiene como objetivo aumentar los ingresos de la compañía con la confianza y la fidelidad de los clientes.

5.1.1 Criterio 1: Alto valor añadido en el diseño

Las tecnologías de fabricación aditiva permiten la producción de piezas con diseños complejos sin penalizar los costes asociados a la fabricación. En cambio, con las tecnologías de transformación de plásticos convencionales la complejidad de la pieza se refleja en un incremento de los costes sobre los utillajes.

La complejidad geométrica no es un concepto cuantificable, por lo tanto, no se puede tratar de forma numérica, además, dicho valor no aparece en el ERP. Por ello se ha

relacionado la complejidad geométrica con el coste de fabricación de cada pieza. El coste industrial de una referencia se calcula en función del coste del lote, tal como se muestra en la Ecuación (5.1):

$$C_{Referencia} = \frac{C_{Lote}}{n^{\circ} \text{ de piezas por lote}} \quad (5.1)$$

Y el coste de fabricación de un lote para una referencia dada se observa en la Ecuación (5.2):

$$C_{Lote} = C_H + C_{MAT} + C_E + C_{TOL} \quad (5.2)$$

Donde:

- C_{Lote} : es el coste de fabricación de un lote de referencias.
- C_H : es el coste imputado por mano de obra a la fabricación de un lote.
- C_{MAT} : es el coste del material que se emplea para la fabricación de un lote.
- C_E : es el coste de la máquina dividido por las horas de vida sumado al coste asociado al consumo energético o de recursos en la fabricación de un lote.
- C_{TOL} : es el coste del utillaje dividido por el número de piezas que se pueden fabricar o se estiman fabricar. Entre los parámetros que afectan al coste de un molde destacan: el número de cavidades, la complejidad de la figura, si es un molde de colada caliente o fría y si se trata de un molde automático o manual.

Asumiendo que el coste de amortización de utillaje es el más significativo y los otros costes son insignificantes, se puede afirmar que, para un diseño complejo, si se comparan los costes de fabricación para los dos sistemas de producción, la diferencia entre éstos será siempre más pequeña que si se realiza el mismo ejercicio para un diseño más simple. En fabricación aditiva el coste de la pieza es directamente proporcional al volumen que ocupa, por ello, las piezas más interesantes para fabricar son aquellas cuyo diseño es complejo y tienen un volumen reducido.

Asimismo, se han capturado los datos del ERP para poder graficar una nube de puntos referenciados en función del coste de fabricación respecto su volumen físico, tal como se observa en la Figura 5.1.

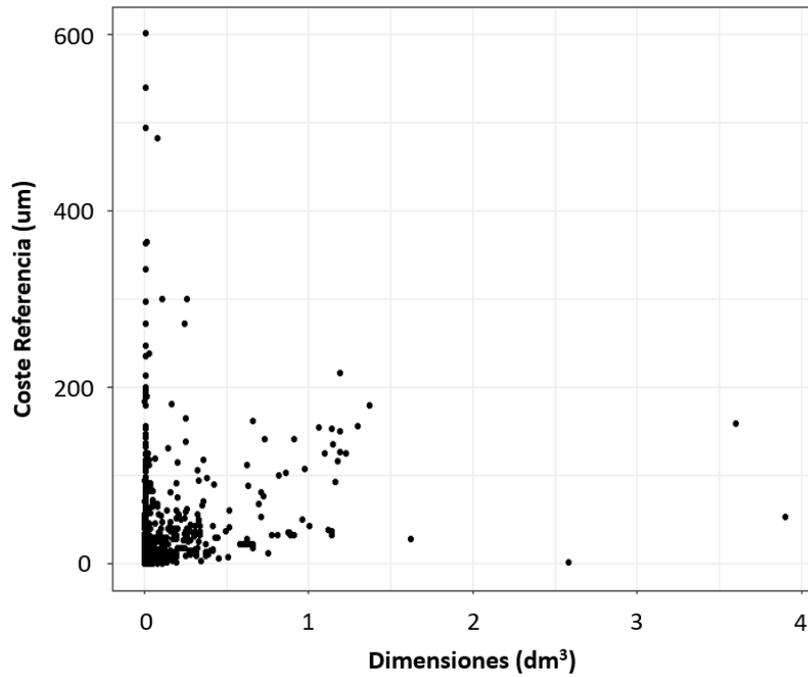


Figura 5.1. Representación de dispersión de la lista de referencias. Fuente: Propia.

En la anterior figura se observa una gran densidad de referencias que tienen unos costes bajos con unas dimensiones reducidas. Sin embargo, se identifican tres categorías de referencias según la relación (Coste [um]/Dimensión [m³]). La primera categoría o grupo corresponde a piezas pequeñas pero costosas, en el segundo grupo se encuentran referencias cuyo coste aumenta cuando las dimensiones son mayores. Por último, el tercer grupo son referencias grandes, pero poco costosas. En la Figura 5.2 se muestra una aproximación de las tendencias de dichos grupos.

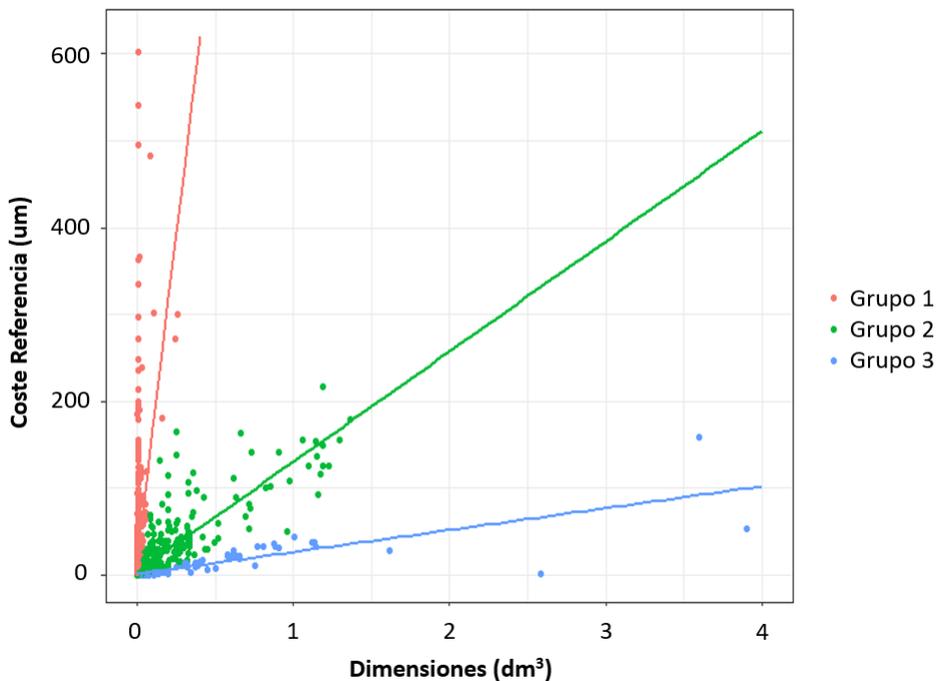


Figura 5.2. Representación de dispersión de la lista de referencias por grupos. Fuente: Propia.

- **Grupo 1:** se compone de referencias con diseños complejos. Son aquellas que, para un volumen de pieza bajo, el coste de fabricación es significativamente alto. Por ejemplo: hélices, rodetes de bomba, etc.
- **Grupo 2:** se compone de referencias que siguen una tendencia de escala. Es decir, cuanto más grande es la pieza plástica, más grandes son los moldes utilizados, y consecuentemente, el coste de fabricación es mayor. Por ejemplo: componentes de válvulas, cuerpos de bombas, etc.
- **Grupo 3:** se agrupan referencias que siguen también una tendencia de escala, con la diferencia que son de tamaño mayores y el proceso de producción está muy optimizado. Por ejemplo: filtros de soplado, pies de filtros termo conformados, etc.

A partir de los grupos obtenidos, se han diferenciado dos tipos de referencias, tal como se muestra en la Figura 5.3. El área roja corresponde a los artículos atípicos, es decir, piezas muy pequeñas que son muy costosas, o piezas muy grandes cuyo coste industrial es reducido. El área verde corresponde a los artículos típicos que son aquellos cuyo coste industrial aumenta a medida que aumenta su tamaño.

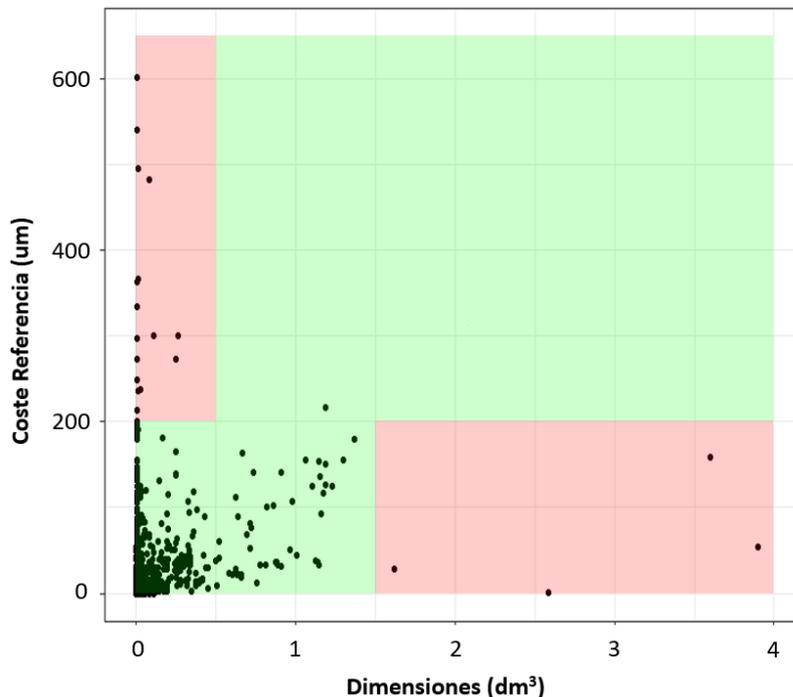


Figura 5.3. Representación de las áreas de la lista de referencias. Fuente: Propia.

Con el objetivo de que los costes asociados a la fabricación sean reducidos al transformar el proceso productivo, de convencional a aditivo, en la lista de referencias se tomarán como preferentes aquellas cuya relación (Coste [μm]/Dimensión [m^3]) sea mayor, que corresponde mayormente a aquellas referencias pequeñas en cuanto dimensión y muy costosas.

5.1.2 Criterio 2: Baja rotación de ventas

Otro de los criterios de evaluación para la lista de artículos preferentes es el riesgo de depreciación contable, que consecuentemente, integra la posibilidad de tener riesgo de obsolescencia en el caso en que no se suministren más recambios durante un periodo largo de tiempo. Según el histórico obtenido, se puede aproximar como referencias con un grado de riesgo en depreciación u obsolescencia, aquellas piezas que rotan menos. Las referencias cuyo número de comandas es reducida son de interés, ya que son artículos que quedan remanentes en stock y provoca un impacto negativo en la cuenta de resultados de la compañía. Por ello, se ha analizado el número de comandas por referencia tal como se observa en Figura 5.4. En dicha grafica se presentan todas las líneas de las referencias tipo “Plástico” filtrando por MTO y volumen ocupado por debajo de 4 dm³ (1847 artículos).

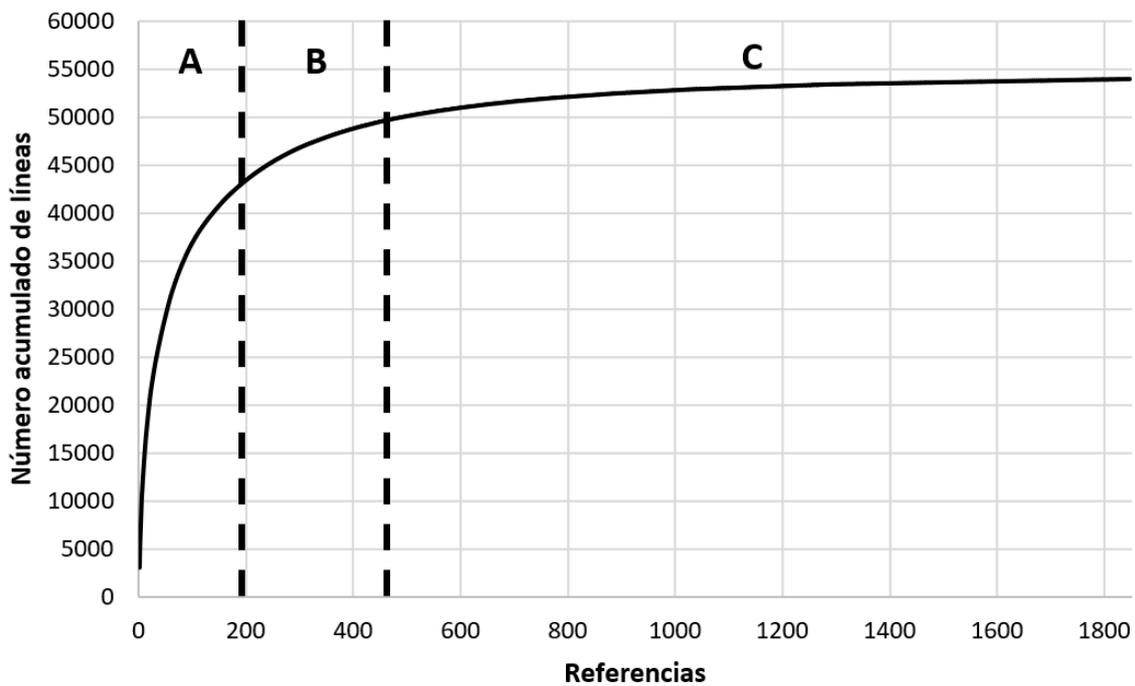


Figura 5.4. Distribución A-B-C de la lista de referencias. Fuente: Propia.

En la Tabla 5.1 se muestran los datos obtenidos de cada uno de los sectores, que se han explicado anteriormente.

Tabla 5.1. Datos obtenidos del conjunto de referencias de Pareto. Fuente: Propia.

	Sector A	Sector B	Sector C
Nº de referencias	194	448	1205
Nº comandas o líneas (Máxima)	3078	46	7
Nº comandas o líneas (Media)	223	18	2
Nº comandas o líneas (Mínima)	47	7	1

Como se ha comentado anteriormente, el número de líneas o comandas no representa la rotación de los productos, sino la frecuencia de pedidos por referencia. Asimismo, la

rotación de las referencias se ha contabilizado como la relación entre el número de unidades vendidas respecto el número de líneas para cada referencia, y se ha representado en la Figura 5.5.

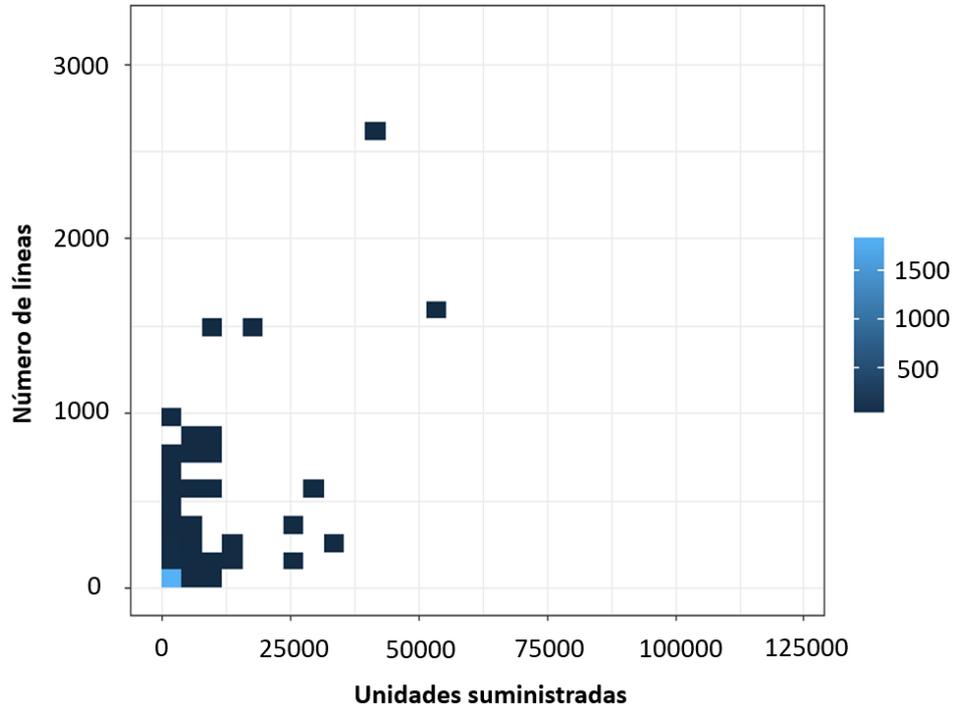


Figura 5.5. Representación de la relación de la lista de referencias. Fuente: Propia.

Se observa un alto número de referencias que por cada comanda o línea, las unidades asociadas son reducidas. Aunque existe una dispersión de los valores es un resultado lógico cuando se analiza una empresa que se dedica al suministro de recambios. La fabricación aditiva es flexible a los cambios de demanda y una tecnología ideada para pequeñas series de unidades, por ello, en los primeros puestos de la lista de referencias preferentes deben estar aquellas cuya relación de rotación (unidades vendidas/comandas) sea lo más cercana a la unidad. Dichas referencias corresponden a las demandas unitarias y son las que provocan tener stock, ya que siempre se fabrica mediante tecnologías convencionales el lote mínimo de unidades.

5.1.3 Criterio 3: Tiempos de entrega

El último criterio que se quiere evaluar son los tiempos de entrega ya que incide directamente en el suministro y en la satisfacción del servicio por parte del cliente final. Dichos tiempos dependen de muchos factores como son: la disponibilidad de máquina y los recursos materiales y humanos, además, de la distancia entre la productiva y el centro logístico. Se considera que la acumulación de todos estos factores repercute de forma directa sobre el tiempo de entrega de los recambios. Para el cliente final aquellos artículos cuyo tiempo de suministro es más elevado forman parte de las referencias más problemáticas, situándose en la cabeza de la lista de referencias prioritarias. Por cada

referencia existen una o más líneas realizadas en el histórico con tiempos de entrega diferentes, por ello, se tomará el tiempo medio aritmético de cada referencia.

Asimismo, si se despejan los factores a asociados a los bienes materiales y humanos, y se centra el análisis de tiempos de entrega en función del centro productivo se obtienen los resultados presentados en la Figura 5.6. En la gráfica se muestra una representación del tiempo de entrega máximo, mínimo y medio aritméticos según el centro productivo.

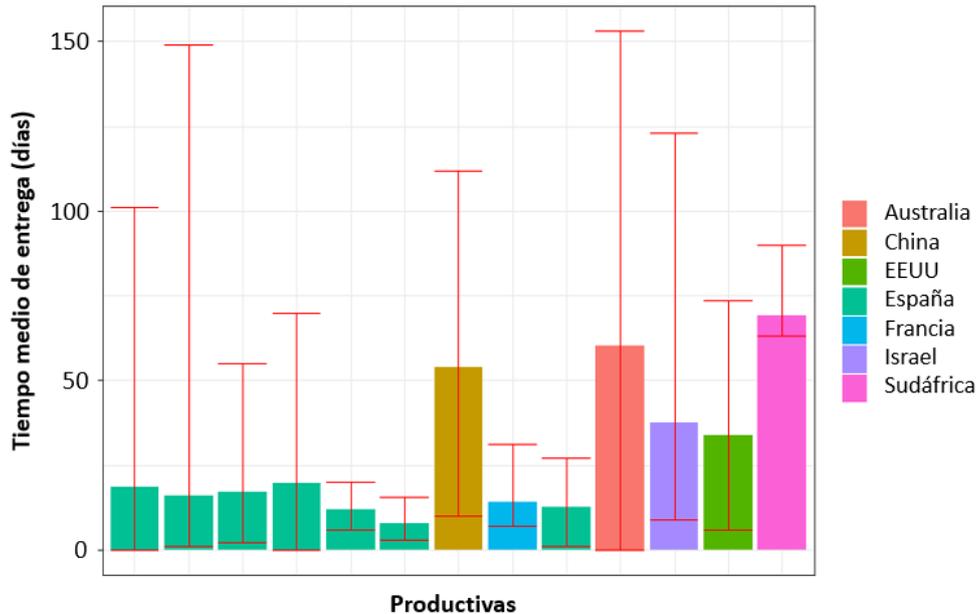


Figura 5.6. Tiempos de entrega por productiva. Fuente: Propia.

Se puede observar que los centros productivos que están más alejados del centro logístico, ubicado en Maçanet de la Selva, tienen un tiempo de entrega medio aritmético mayor respecto los que están más cerca. Por ello, las referencias que provienen de los centros productivos más alejados se situarán en las primeras posiciones de la lista de referencias prioritarias.

5.1.4 Ponderación de los criterios

El siguiente paso es realizar una ponderación, a partir de la asignación de pesos o importancias para cada variable o criterio y conseguir un valor resultante que determinará la prioridad en la lista de referencias, tal como se muestra en la Ecuación (5.3).

$$P = p_1 \cdot K_1 + p_2 \cdot K_2 + p_3 \cdot K_3 \quad (5.3)$$

Donde:

- P es el valor de prioridad.
- p_i son los pesos o importancias de cada criterio.

- K_i son los criterios de evaluación.

Para obtener resultados coherentes es requerido realizar una normalización de los criterios basada en la unidad. De esta forma, los valores de los criterios se convierten en valores dentro del rango del 0 al 1 mediante la Ecuación (5.4).

$$K'_i = \frac{K_i - K_{\text{mínimo}_i}}{K_{\text{máximo}_i} - K_{\text{mínimo}_i}} \quad (5.4)$$

Obteniendo así, para cada referencia los criterios normalizados, tal como se observa en la Ecuación (5.5):

$$P' = p_1 \cdot K'_1 + p_2 \cdot K'_2 + p_3 \cdot K'_3 \quad (5.5)$$

En cuanto a los criterios definidos para las referencias preferentes deben cumplir las siguientes condiciones: el valor del primer y tercer criterio debe ser alto y el segundo criterio debe ser bajo. Por ello, el segundo criterio tiene que restar al primero y el tercero, tal como se observa en la Ecuación (5.6).

$$P' = p_1 \cdot K'_1 - p_2 \cdot K'_2 + p_3 \cdot K'_3 \quad (5.6)$$

De esta forma, encabezará la lista de referencias prioritarias aquellas cuyo valor de P' sea más alto a causa de:

- Las referencias con alto valor añadido, cuyo valor relación Coste/dimensión es alto.
- Las referencias con rotación baja, cuyo valor unidades vendidas/líneas será similar a la unidad.
- Las referencias con altos tiempos de entrega, cuyo valor en días será alto.

Finalmente, se ha decidido repartir el peso de todos los criterios de forma equitativa (33% para cada criterio), ya que se han considerado igual de importantes. Por último, se ha obtenido la lista de referencias con un total de 1847 referencias.

5.2 Método de diseño y fabricación

En este apartado se explica en detalle la metodología de diseño y fabricación propuesta para la tecnología MJF y PA12. Posteriormente a la realización del estado del arte de los sistemas de soporte a la toma de decisiones (DSS) aplicados a la fabricación aditiva, se han identificado las principales limitaciones y, por lo tanto, las oportunidades de investigación que se desarrollan en el presente trabajo. Dichas oportunidades se resumen en generar un sistema que ayude en la toma de decisión para traspasar el método de producción de convencional a aditivo mediante unos criterios técnicos.

Dicha metodología pretende resolver un problema real de la industria, la incertidumbre de si es viable técnica y económicamente fabricar o no una pieza dada mediante MJF y PA12. Dado un diseño específico, las preguntas que pretende resolver esta metodología son:

- La posibilidad o imposibilidad de fabricar el diseño especificado.
- Una guía de rediseños y postproceso para adaptar el modelo a la fabricación aditiva.
- Categorizar los diseños en función de la “facilidad” de realización teniendo en cuenta los aspectos técnicos.
- Formar a un usuario inexperto con explicaciones sobre tecnologías de impresión, tipos de postproceso, técnicas intermedias, etc.

El conjunto de los anteriores puntos proporciona una información muy relevante para decidir la fabricación de recambios mediante MJF. La metodología propuesta está basada en la experiencia adquirida durante el transcurso de la tesis, que se ha obtenido a partir de diferentes casos de estudio que han aportado a la metodología información sobre: reglas de diseño, postprocesos, materiales, tecnologías, etc. Dicho conocimiento combinado con los criterios de las metodologías de DfAM del estado del arte han conformado el cerebro de la metodología propuesta. En la Figura 5.7 se muestra un esquema de la metodología de diseño y fabricación propuesta.

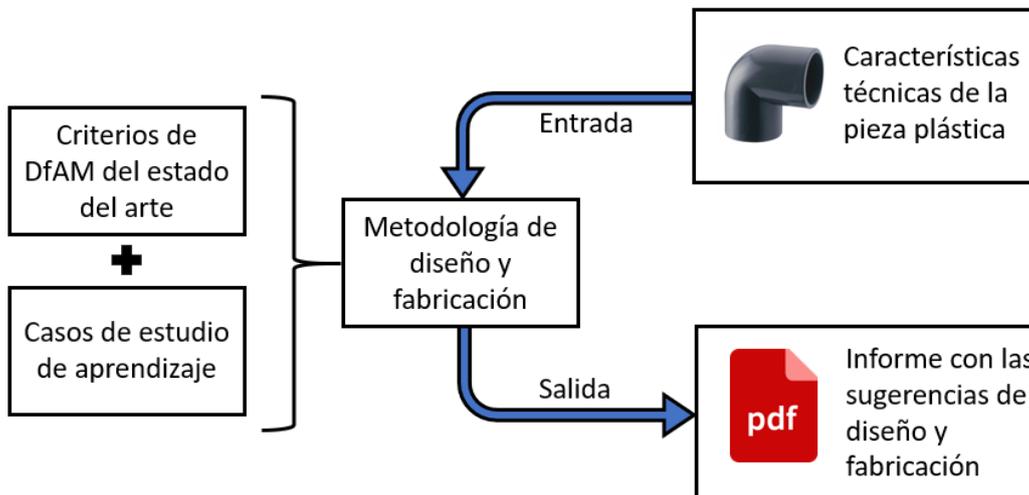


Figura 5.7. Esquema de entradas y salidas del sistema experto propuesto. Fuente: Propia.

La entrada a la metodología de diseño y fabricación son las características técnicas de la pieza plástica que se quiere estudiar. Dichas características abarcan la apariencia externa de la pieza, los elementos del diseño, las características de fabricación y la funcionalidad de la pieza. A partir de estos datos, que son introducidos por el usuario,

el sistema empieza a correr su lógica para obtener como salida un informe cuya información da soporte al usuario para la toma de decisiones sobre si fabricar la referencia mediante tecnologías convencionales o con tecnologías de fabricación aditiva. Dicho informe se compone de las siguientes partes:

- Una serie de sugerencias de diseño y fabricación que ayudarán al usuario en la transformación digital de producción de la referencia.
- Una aproximación de la factibilidad técnica o probabilidad de éxito de la transformación de la producción.
- Un análisis de costes punta a punta de dicha referencia para los dos procesos de producción para validar si la fabricación aditiva tiene viabilidad económica para el negocio.

5.2.1 Casos de exploración o aprendizaje

En este apartado se han enumerado los casos de exploración utilizados para alimentar la base de conocimiento. En la Figura 5.8 se muestra de forma esquemática las etapas de la cadena de valor de un producto y las aportaciones de las tecnologías de fabricación aditiva en cada una de éstas.

Etapas	•Aportaciones FA
Ideación	•Modelos y maquetas
Diseño	•Prototipos visuales
Desarrollo	•Prototipos funcionales
Industrialización	•Moldes o matriceria prototipo
Fabricación	•Piezas finales
Producción	•Utillajes de manipulación, control y ensamblaje
Comercialización	•Personalizaciones
Post venta	•Piezas de recambio

Figura 5.8. Cadena de valor de un producto y aportación de la FA. Fuente: Propia.

Aunque la tesis está referida a la realización de una metodología para la fabricación de piezas, se ha obtenido información de casos de exploración cuya aplicación no es la fabricación final. Dichos casos de estudio han surgido de la necesidad industrial de dar solución a problemas que la fabricación convencional no puede solventar. Algunos otros casos de exploración son fruto de la mejora de algún producto existente para aportar valor o minimizar los costes asociados a la fabricación.

A continuación, se resumen los casos de exploración realizados en las diferentes fases de la cadena de valor y la aportación de conocimiento que ha supuesto a la metodología propuesta. Dichos casos de exploración se explican en detalle en los anexos.

Anexo A: Válvula de diafragma. En este caso de exploración se ha realizado un rediseño de una válvula de diafragma existente. El objetivo es reducir el número de piezas del diseño original aplicando los fundamentos de las metodologías de diseño para fabricar con tecnologías aditivas. Este caso de exploración ha aportado a la metodología de diseño y fabricación propuesta conocimientos de:

- Fabricación y diseño de roscas gruesas mediante MJF y mecanizado de roscas finas.
- Diseño de piezas auto ensambladas con movimientos relativos y absolutos.
- Diseño de geometrías huecas y salidas del material.

Anexo B: Venturi. En este caso de exploración se ha realizado la fabricación en serie de unos venturi mediante fabricación aditiva. El objetivo de este caso es resolver un problema de precisión dimensional con una pieza que no es posible conseguir con tecnologías convencionales. Por ello, se ha utilizado la tecnología SLA para la fabricación de dichos venturi de precisión. Este caso de exploración ha aportado a la metodología de diseño y fabricación los siguientes conocimientos:

- Precisiones dimensionales de las diferentes tecnologías de fabricación aditiva.
- Materiales con propiedades de transparencia basados en resinas.
- El comportamiento de las resinas bajo presión de agua y su envejecimiento.

Anexo C: Soporte para válvula. En este caso de exploración se ha realizado una optimización topológica y un rediseño para la fabricación de una serie corta de unos adaptadores para una válvula de diafragma automática. El objetivo de este caso es reducir el material utilizado y que resista los esfuerzos durante su funcionamiento. El rediseño final se ha fabricado mediante la tecnología FDM. A continuación, se enumeran los diferentes conocimientos que se han adquirido con el presente caso.

- Orientación de las piezas para conseguir mejor resistencia o calidad superficial.
- Comportamiento anisotrópico de las tecnologías de fabricación aditiva.
- Optimización topológica para reducir los tiempos de fabricación y el consumo de material.
- Modelo económico para cotizar piezas fabricadas mediante tecnología convencional y aditiva.

Anexo D: Manipulador de inyección. En este caso de exploración se ha diseñado y fabricado un manipulador que se conecta a un brazo robótico y tiene como misión extraer unas piezas de una máquina de inyección. El objetivo es reducir el peso del manipulador mecanizado en aluminio ya que el robot no es capaz de soportar dicha carga. Por ello, se ha fabricado en plástico mediante fabricación aditiva rediseñando el interior mediante estructuras ligeras. Además, para conservar la estanqueidad se ha infiltrado la pieza resultante con resinas epoxi. Seguidamente, se enumeran los diferentes aspectos de conocimiento que se han adquirido:

- Configuración y diseño de estructuras ligeras o *lattice* para disminuir el peso.
- Recubrimientos o infiltraciones de resinas epoxi para mantener la estanqueidad.

Anexo E: Customización de un robot. En este caso de exploración se ha diseñado dos piezas que forman parte de un robot de piscina. El objetivo es validar la viabilidad de fabricar piezas personalizadas para productos de alto valor añadido. En este caso se han rediseñado dos piezas susceptibles a la customización y se han fabricado mediante tecnologías aditivas. Para ello, se han utilizado dos tecnologías diferentes, SLS y PJ, ya que las especificaciones técnicas lo requerían. Este caso de exploración ha aportado a la metodología de diseño y fabricación propuesta conocimientos de:

- Procesos de infiltrado de color y pintado e imprimado por necesidad del cliente.
- Tecnologías basadas en resinas fotosensibles multicolor.
- Procesos de limpiado de piezas mediante abrasivos, como el granallado.

Anexo F: Bomba hidráulica. En este caso de exploración se ha realizado el diseño y fabricación de una bomba hidráulica para verificar el comportamiento hidráulico de ésta. Se han fabricado todos los componentes plásticos y posteriormente se ha procedido al montaje. La tecnología utilizada ha sido MJF ya que son elementos con altas prestaciones mecánicas y de presión. Por último, se ha ensayado la bomba en el banco de pruebas y se ha extraído las curvas hidráulicas características. A continuación, se enumeran los diferentes conocimientos que se han adquirido con el presente caso.

- Incorporación de los insertos metálicos en la pieza fabricada aditivamente.
- Rediseño de engarces, nervios y atornillados por cambio de material.
- Proceso de diseño y adhesivo de diferentes partes de una pieza por exceder el volumen de impresión.

Anexo G: Válvula de bola. En este caso de exploración se ha fabricado el cuerpo y las tuercas de una válvula de bola industrial. El objetivo es validar la fabricación de

dispositivos con altas prestaciones de presión mediante MJF. Se ha ensayado el resultado en los bancos de presión y se ha realizado un modelo de fugas y la caracterización mecánica de la PA12. Seguidamente, se enumeran los diferentes aspectos de conocimiento que se han adquirido:

- Caracterización mecánica de la PA12 para las diferentes direcciones de fabricación.
- Caracterización de las fugas según la orientación de la pieza y el espesor de pared.

En la Tabla 5.2 se muestra la matriz de conocimiento adquirida, donde se clasifica los diferentes puntos aprendidos y de donde provienen. Tal como se ha comentado anteriormente, las fuentes de conocimientos son dos: los criterios de DfAM de la bibliografía y los casos de exploración o aprendizaje.

Tabla 5.2. Matriz de conocimiento y su fuente de adquisición. Fuente: Propia.

L	Conocimientos	Bibliografía	Casos de exploración
A	Chorreado		X
B	Pintado		X
C	Infiltrado de color		X
D	Otros acabados	X	
E	Engarces o clips		X
F	Roscas y atornillados		X
G	Insertos metálicos		X
H	Soldaduras	X	
I	Adhesivos	X	
J	Nervios		X
K	Bisagras integrales	X	
L	Diámetro mínimo de agujero	X	
M	Rendijas	X	
N	Grabados	X	
Ñ	Precisión dimensional		X
O	Estructuras ligeras	X	
P	Espesor mínimo de pared	X	
Q	Tolerancias de ensamblaje		X
R	Autoensamblajes	X	
S	Geometrías huecas		X
T	Dimensiones máximas de fabricación	X	
U	Impresión de conductos	X	
V	Rugosidad superficial	X	
W	Texturizados y superficies curvas	X	
X	Resistencia a la temperatura		X
Y	Esfuerzos mecánicos		X
Z	Resistencia química		X
AA	Resistencia a la presión		X

En conclusión, el 50% del total del conocimiento adquirido proviene de la bibliografía mientras que el 50% restante proviene de la experiencia de los casos de estudio.

5.2.2 Representación muestral de la metodología

En este apartado se pretende justificar el peso de la representación del conocimiento adquirido de los casos de aprendizaje y la bibliografía respecto de la muestra de las referencias que se desean estudiar. Para ello, se han escogido 50 referencias aleatorias de la lista de referencias preferentes adquirida anteriormente y se ha cuantificado si la base de conocimiento es representativa para todas las referencias de la lista. Para ello, se ha utilizado la matriz de conocimiento y se han analizado dichas 50 referencias para observar cuantas de éstas están dentro del marco de conocimiento y cuantas están fuera de este marco. De esta manera es posible conocer si el conocimiento adquirido es significativamente representativo y el modelo es válido para analizar la lista de piezas o referencias preferentes. En la Tabla 5.3 se muestran los resultados obtenidos de dicho análisis.

Tabla 5.3. Resultado del análisis de las referencias. Fuente: Propia.

Ref.	Base de conocimientos		Conocimientos no contemplados
	Contemplados	No contemplados	
44	X		
6		X	Cromados y niquelados Transparentes tintados Serigrafiados o marcado laser

Posteriormente al análisis realizado con 50 referencias se puede afirmar que los conocimientos incorporados en la metodología abarcan hasta un 88% de las piezas que se quieren estudiar, quedando fuera el 12% restante. Seguidamente se ha realizado una réplica, con otras 50 referencias aleatorias, para verificar que los resultados anteriores son consistentes. Posteriormente al análisis no se ha observado ningún conocimiento no contemplado adicional llegando a analizar más del 5% de la lista de referencias preferentes.

En conclusión, la metodología de diseño y fabricación que se propone es suficientemente representativa para los casos que se quieren estudiar. Además, se han identificado cuales son los conocimientos no contemplados, que en este caso son:

- Piezas con acabados de cromados o niquelados o que provienen de la tecnología *In Mold Label*. Dicha tecnología añade una etiqueta, que puede ser informativa o simulando un acabado, durante el proceso de inyección de plástico en la pieza.
- Piezas que son transparentes y están tintadas en algún color.
- Piezas que están serigrafiadas con algún logo o se realiza un marcado laser.

Estos conocimientos forman parte de las líneas futuras de trabajo a realizar y de esta forma se puede aumentar el porcentaje de representación muestral de la metodología.

5.2.3 Implementación de la metodología

Mediante los casos de estudio realizados se ha generado el conocimiento para crear una metodología de diseño y fabricación que pretende solucionar la incertidumbre en la factibilidad técnica y económica de la fabricación y suministro de recambios. Dicho conocimiento adquirido se ha integrado en un sistema de soporte a la toma de decisiones (DSS-KD), o sistema experto. Dicho sistema está formado por cuatro bloques, tal como se muestra en la Figura 5.9.

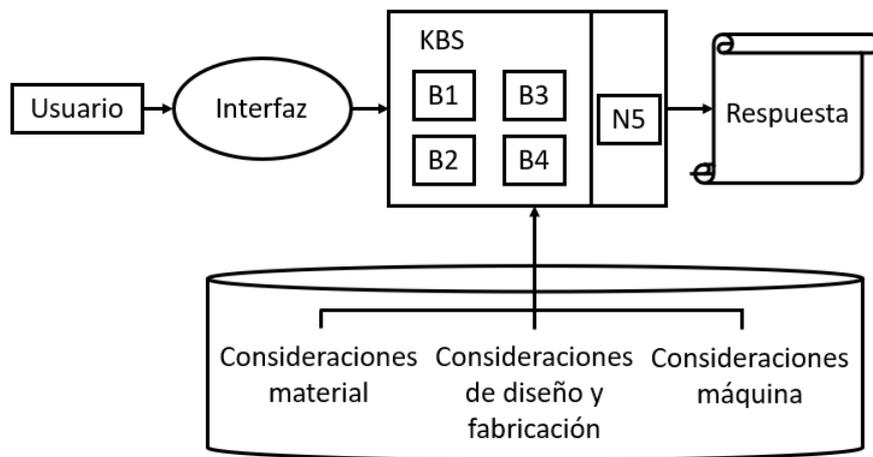


Figura 5.9. Esquema de elementos del sistema KBS. Fuente: Propia.

- **Bloque 1:** apariencia. En esta parte se evalúan los requerimientos de la pieza en términos de calidad superficial, coloración y el acabado para generar alternativas de postprocesos.
- **Bloque 2:** elementos del diseño. Este bloque se centra en el análisis de los diferentes elementos del diseño de la pieza (clips, insertos, entre otros) para dar sugerencias de rediseño y adaptar la pieza a las potencialidades de la fabricación aditiva.
- **Bloque 3:** características del diseño. En esta parte se recopila información de las características de la pieza para revisar la factibilidad de su fabricación mediante MJF.
- **Bloque 4:** funcionalidad. En este bloque se introduce los requerimientos de funcionalidad de la pieza para revisar la compatibilidad de las propiedades del material y las características de la máquina.

Se ha dividido el sistema en cuatro subsistemas para simplificar la resolución del problema. La gran cantidad de variables suponen un gran número de posibles

combinatorias, y consecuentemente, hace dificultosa o inviable su resolución. Cabe destacar que los diferentes bloques son independientes entre ellos, pudiendo así realizar la aproximación de dividir un problema en problemas más pequeños. Se ha realizado un modelo IDEF (*Icam DEFinition for Function Modeling*), donde ICAM (*Integrated Computer Aided Manufacturing*), para mostrar y describir el funcionamiento de la metodología propuesta. Este tipo de modelo permite representar de forma gráfica el desarrollo de un sistema [110]. Se ha utilizado IDEF0, que es una variante de la familia IDEF, utilizado para describir una serie de actividades de un modelo automatizadas o no para sistemas existentes o no [111]. En la Figura 5.10 se representa el esquema de nodos que contempla el sistema por completo.

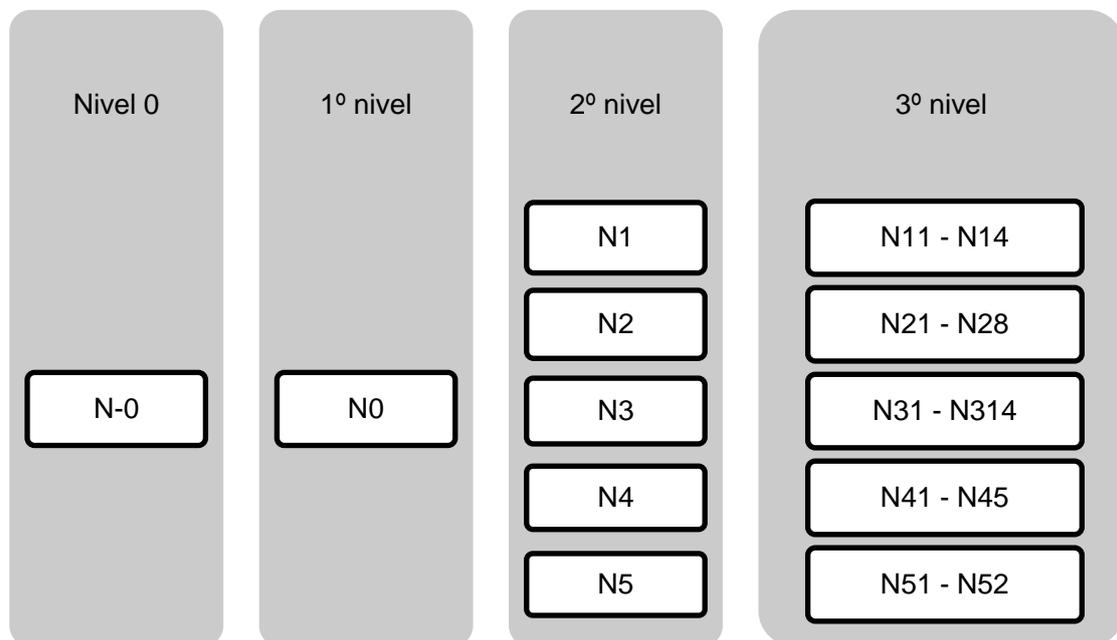


Figura 5.10. Esquema de nodos para el sistema KBS. Fuente: Propia.

El nivel cero (N-0) corresponde a las entradas y las salidas del sistema, donde la letra “N” significa nodo. El primer nivel (N0) corresponde a la relación entre los cuatro bloques independientes que se han explicado anteriormente. El segundo nivel (N1-N5) corresponde a la lógica de los cuatro bloques (N1 = bloque 1, N2 = bloque 2, N3 = bloque 3 y N4 = bloque 4) donde el N5 es la lógica que combina las diferentes sugerencias de diseño y fabricación y las conclusiones. El tercer nivel (N11-N52) corresponde a las permutaciones.

5.2.4 N-0: Entradas y salidas del sistema DSS

En este apartado se contempla el funcionamiento del sistema en el Nivel 0, la capa más alta. En la Figura 5.11 se representa el sistema experto o KBS.

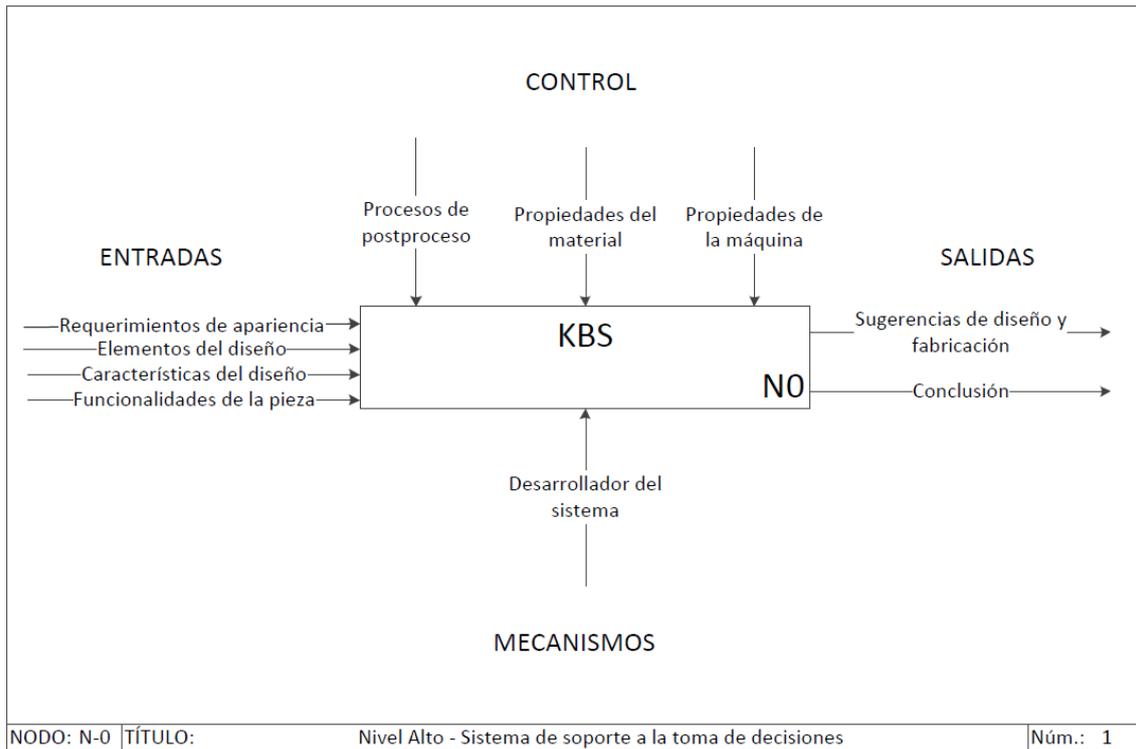


Figura 5.11. Representación de IDEF0 para el nodo N-0. Fuente: Propia.

En la anterior figura se muestran las entradas (flechas de la izquierda), las salidas (flechas de la derecha), el control (flechas superiores) y los mecanismos (flechas inferiores) del sistema experto. En primer lugar, se debe introducir los diferentes requerimientos de entrada de una referencia en concreto, y según las variables de control, se obtendrán unas sugerencias de diseño y fabricación y una conclusión o salida.

5.2.5 N0: Representación de los bloques

En el siguiente apartado se representa el primer nivel del sistema, donde se muestran los diferentes bloques independientes explicados anteriormente. En la Figura 5.12 se muestra el nodo 0 del sistema DSS propuesto.

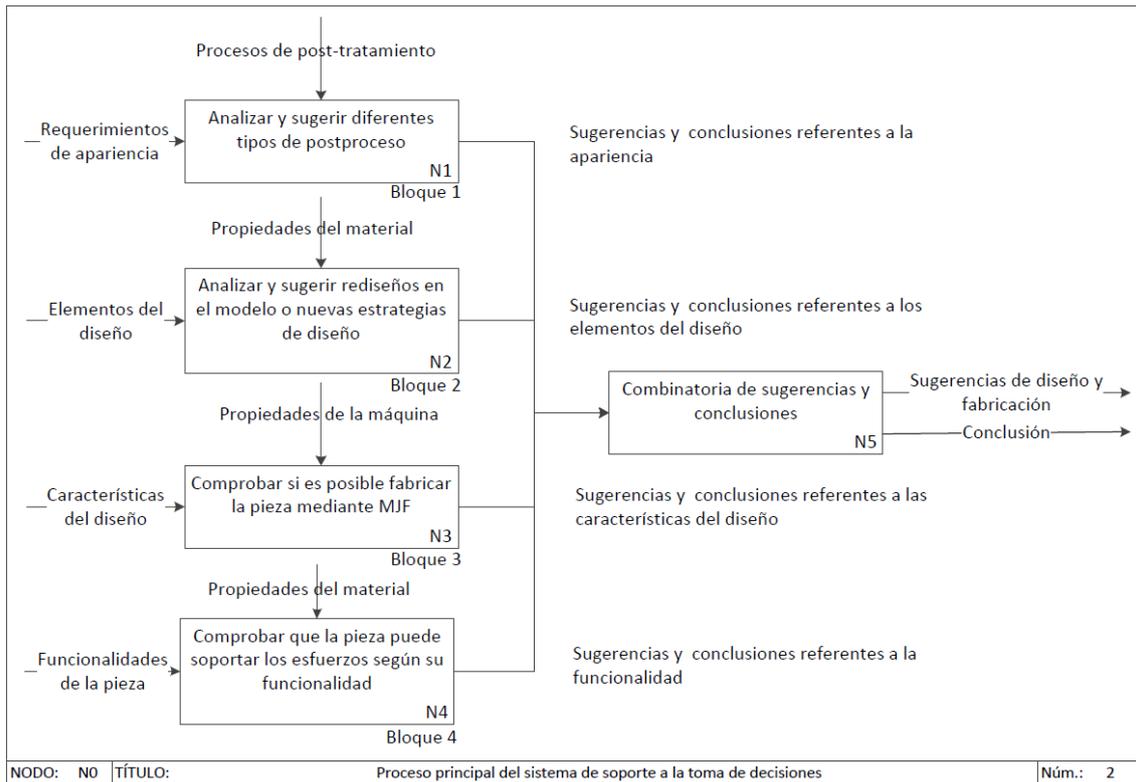


Figura 5.12. Representación de IDEF0 para el nodo N0. Fuente: Propia.

En el primer nodo (N1) el usuario introduce los requerimientos de apariencia en el sistema, y según los postprocesos existentes, se proporciona una sugerencia y una conclusión. En el segundo nodo (N2) el sistema requiere de los elementos del diseño de la referencia para analizar y sugerir rediseños en el modelo. El tercer nodo (N3) el sistema comprueba si es posible fabricar la pieza mediante MJF según una serie de variables que introduce el usuario en el sistema. El cuarto nodo (N4) comprueba si dicha pieza puede soportar las condiciones de contorno externas para cumplir con su funcionalidad, según unas variables requeridas por el sistema. El quinto nodo (N5) a partir de los resultados de cada nodo (N1, N2, N3 y N4) genera una o varias conclusiones que se enumeran seguidamente:

- **Directo de máquina:** si se considera que no es necesario la realización de rediseños o postprocesos en la pieza.
- **Cambio en el diseño o en el proceso:** en caso de que sea requerido un cambio en el diseño original o el proceso de producción de la pieza.
- **Comprobar compatibilidad de materiales:** si existe algún proceso químico o físico que pueda alterar el material.
- **Postproceso:** si es necesario realizar un postproceso de cualquier tipo.
- **No es posible:** si por las capacidades del proceso o del material no es posible realizar dicha pieza.

A continuación, se explica en detalle cada uno de los bloques del sistema mostrando el esquema IDEF de funcionalidad, los diferentes resultados y la base de conocimiento. Cada bloque está compuesto por una serie de permutaciones (N11-N14, N21-N29, N31-N314 y N41-N45) que corresponde a una combinatoria de variables que desembocan en una conclusión y una sugerencia a partir de la base de conocimiento.

5.2.6 N1: Apariencia

En este bloque se contemplan los diferentes aspectos sobre la apariencia de la pieza de una forma simplificada. Se analizan aspectos como son: el color, la transparencia, el tipo de acabado y la importancia de la apariencia.

En la Figura 5.13 se muestra el diagrama IDEF0 para el primer nodo. Las entradas de información que debe introducir el usuario son: si la pieza tiene color o es transparente, el tipo de acabado y la importancia de la apariencia, es decir, si para el cliente final el color de la pieza es importante. La salida del primer bloque son unas sugerencias de fabricación y postproceso a parte de una conclusión.

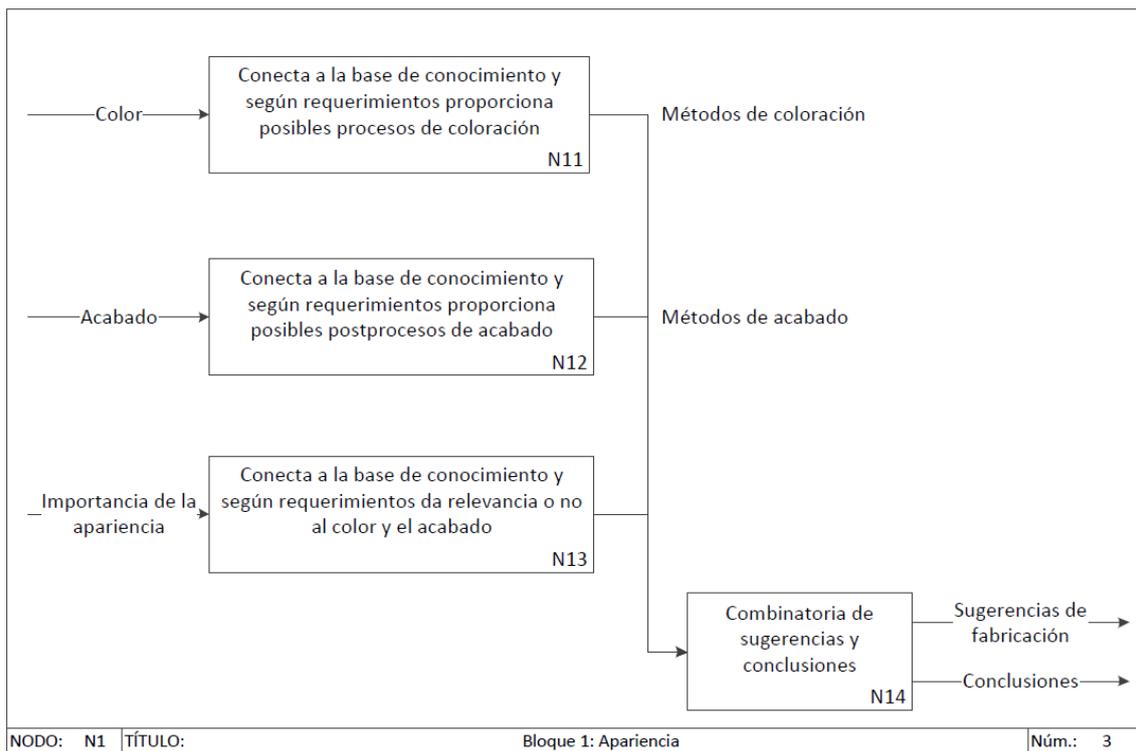


Figura 5.13. Representación de IDEF0 para el nodo N1. Fuente: Propia.

- En el N11 el usuario introduce la variable color (Color o Transparente) conectando con la base de conocimiento de los diferentes procesos de coloración y tecnologías.

- En el N12 se introduce la variable acabado (Mate o Pulido) y el sistema genera información sobre procesos de acabado.
- Por último, en el N13 se define la variable importancia de la apariencia (Sí o No) consolidando el proceso de coloración y el método de acabado adecuado.

El N14 es la combinatoria de sugerencias o conclusiones, también llamado motor de inferencia, que agrupa las diferentes sugerencias de diseño y fabricación de cada sub-nodo (N11, N12 y N13). En la Figura 5.14 se muestra el árbol de decisiones y las diferentes permutaciones o combinación de variables.

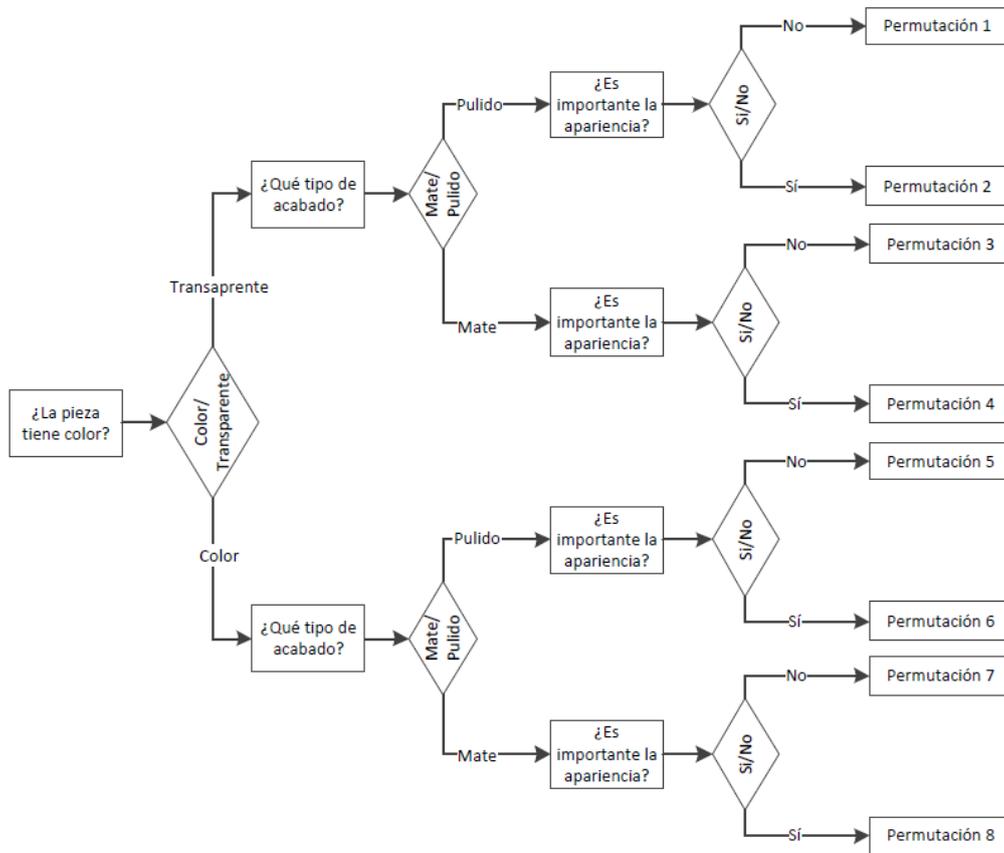


Figura 5.14. Árbol de decisión del bloque 1 y las diferentes permutaciones. Fuente: Propia.

Cada una de las permutaciones proporciona una sugerencia de diseño y fabricación y una conclusión o salida. En la Tabla 5.4 se muestran las diferentes permutaciones del N1 o bloque 1.

Tabla 5.4. Sistema de permutaciones para el bloque 1. Fuente: Propia.

Permutación	Conclusión	Sugerencia de diseño y fabricación
1	Directo de máquina	No es necesario realizar ningún tipo de pintado o infiltrado de color. Después de la fabricación del lote es requerido realizar una limpieza de las piezas mediante un chorreado para eliminar el material sobrante.

2	No es posible	No es posible realizar piezas transparentes mediante MJF. Existen otras tecnologías basadas en resinas como SLA y PJ que lo permiten. Sin embargo, las piezas resultantes no son aptas como piezas finales por dos razones. En primer lugar, dichas resinas tienen sensibilidad a los rayos UV y sufren un envejecimiento afectando directamente a las propiedades mecánicas. En segundo lugar, si las piezas están en contacto con agua o humedades altas la pieza se deforma perdiendo las tolerancias de fabricación.
3	Directo de máquina	No es necesario realizar ningún tipo de pintado o infiltrado de color. Después de la fabricación del lote es requerido realizar una limpieza de las piezas mediante un chorreado para eliminar el material sobrante.
4	No es posible	No es posible realizar piezas transparentes mediante MJF. Existen otras tecnologías basadas en resinas como SLA y PJ que lo permiten. Sin embargo, las piezas resultantes no son aptas para la fabricación de piezas finales por dos razones. En primer lugar, dichas resinas tienen sensibilidad a los rayos UV y sufren un envejecimiento afectando directamente a las propiedades mecánicas. En segundo lugar, si las piezas están en contacto con agua o humedades altas la pieza se deforma perdiendo las tolerancias de fabricación.
5	Directo de máquina	No es necesario realizar ningún tipo de pintado o infiltrado de color. Después de la fabricación del lote es requerido realizar una limpieza de las piezas mediante un chorreado para eliminar el material sobrante.
6	Postproceso	Posteriormente a la fabricación de lote de piezas, se deber realizar un chorreado para su limpieza. Para aplicar color a la pieza existen dos vías: pintado o coloreado. El pintado es un proceso manual que tiene tres fases: la imprimación, el pintado y el lacado. No se recomienda dicho proceso para geometrías con diseños complejos, ya que es posible no llegar a las partes internas. Un proceso más rápido y económico es la infiltración de color o coloreado que es capaz de llegar a cualquier parte de la pieza. La desventaja de este proceso para MJF, es que solamente se puede aplicar colores oscuros y para conseguir el efecto brillante es necesario lacar la pieza posteriormente.
7	Directo de máquina	No es necesario realizar ningún tipo de pintado o infiltrado de color. Después de la fabricación del lote es requerido realizar una limpieza de las piezas mediante un chorreado para eliminar el material sobrante.

8	Postproceso	<p>Posteriormente a la fabricación de lote de piezas, se debe realizar un chorreado para su limpieza. Para aplicar color a la pieza existen dos vías: pintado o coloreado. El pintado es un proceso manual que tiene dos fases: la imprimación y el pintado. No se recomienda dicho proceso para geometrías con diseños complejos, ya que es posible no llegar a las partes internas. Un proceso más rápido y económico es la infiltración de color o coloreado que es capaz de llegar a cualquier parte de la pieza. La desventaja de este proceso para MJF, es que solamente se puede aplicar colores oscuros.</p>
---	-------------	--

5.2.7 N2: Elementos del diseño

En el presente bloque se valoran los elementos que forman parte del diseño. En cuanto a elementos del diseño se entienden: engarces, atornillados, uniones roscadas, etc. Para conseguir que la pieza plástica original tenga las mismas funcionalidades de diseño que la fabricada mediante MJF, es requerido en ocasiones realizar algunos cambios en el diseño o incluso en el proceso. En la Figura 5.15 se muestra el diagrama IDEF0 para el segundo nodo (N2). Las entradas de información que debe introducir el usuario son los diferentes tipos de elementos del diseño y la salida del segundo bloque son unas sugerencias de diseño para adaptar los elementos del diseño al proceso de fabricación.

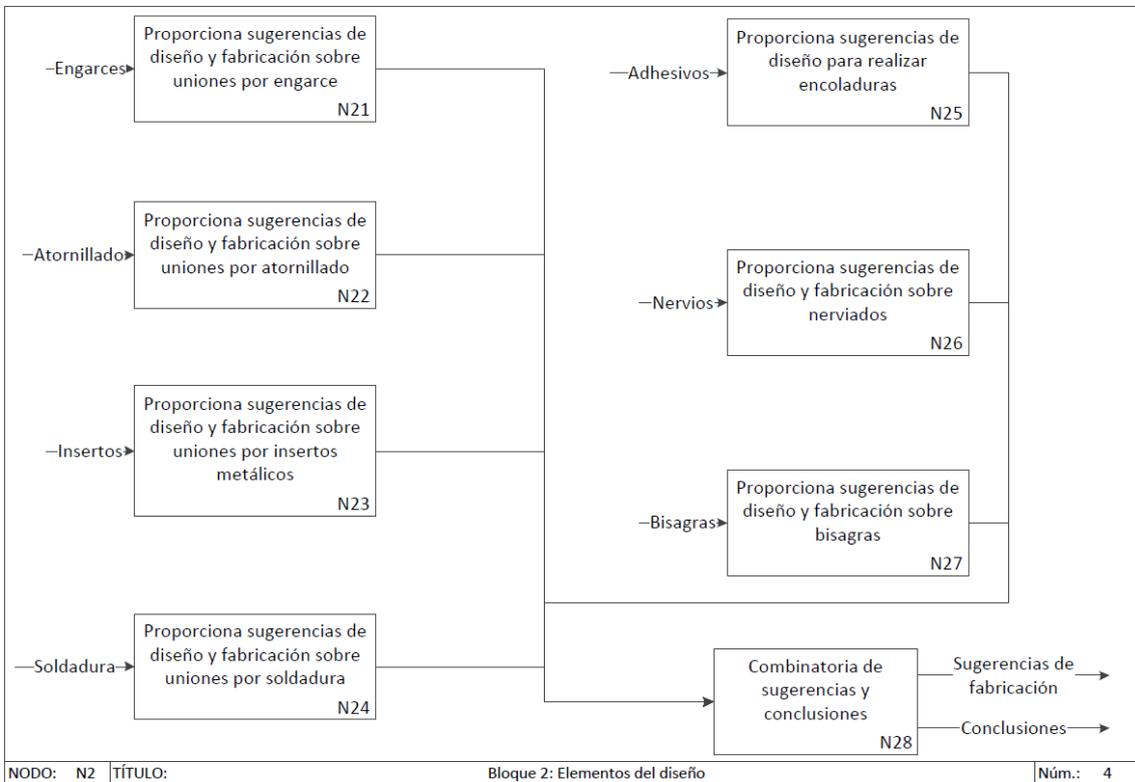


Figura 5.15. Representación de IDEF0 para el nodo N2. Fuente: Propia.

En segundo nodo (N2) todas las variables de entrada son elementos en el diseño y su respuesta es binaria (Sí o No). Por cada uno de los subnodos (N21-N27) el sistema genera unas sugerencias de rediseño para aplicarlo al modelo tridimensional.

- En el N21 el sistema pregunta al usuario si el diseño tiene engarces.
- El N22 cuestiona si el diseño tiene roscas.
- En el N23 se debe introducir si el diseño original tiene insertos.
- El N24 se pregunta si la pieza es parte de un ensamblaje unido por soldadura.
- El N25 pregunta si la pieza es parte de un ensamblaje adhesivado.
- El N26 cuestiona si la pieza contiene un nerviado.
- El N27 que refiere si el diseño contiene bisagras integrales.

El N28 es la combinatoria de sugerencias o conclusiones, también llamado motor de inferencia, que agrupa las diferentes sugerencias de diseño y fabricación de cada subnodo (N21, N22, N23, N24, N25, N26 y N27). En la Figura 5.16 se muestra el árbol de decisiones y las diferentes permutaciones.

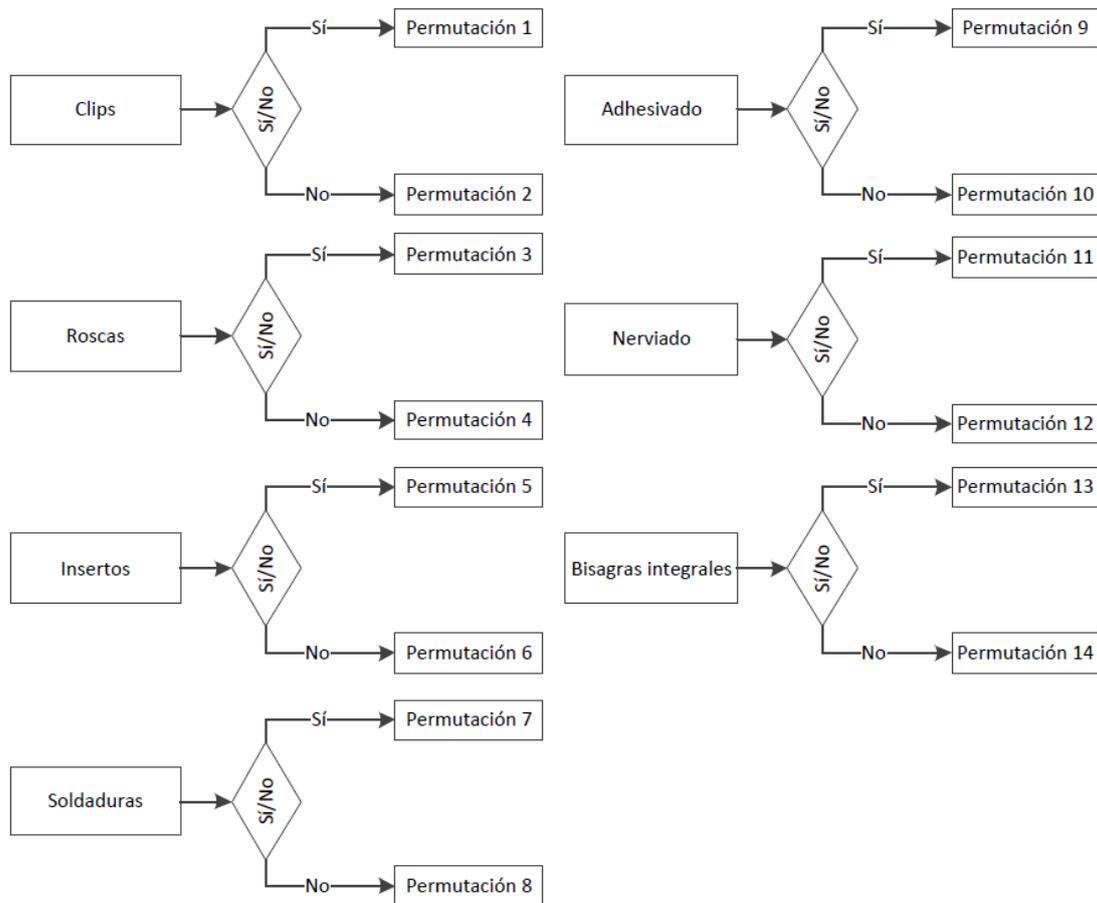


Figura 5.16. Árbol de decisión del bloque 2 y las diferentes permutaciones. Fuente: Propia.

Cada una de las permutaciones proporciona unas sugerencias de diseño y fabricación y una conclusión o salida. En la Tabla 5.5 se muestra una tabla con las diferentes permutaciones del bloque 2.

Tabla 5.5. Sistema de permutaciones para el bloque 2. Fuente: Propia.

Permutación	Conclusión	Sugerencia de diseño y fabricación
1	Cambio en el diseño	Al transformar el proceso de fabricación es necesario tener en cuenta que, si el material origen es diferente a la PA12, es requerido realizar un cambio en el diseño de los engarces para conseguir la misma fuerza de montaje y de desmontaje teniendo en cuenta la deformación máxima del material. Además, se recomienda enfocar la zona de flexión en el plano XY para conseguir mejores resultados de funcionamiento a flexión.
2	Directo de máquina	-
3	Cambio en el proceso	Las roscas también son elementos muy comunes en los diseños de pieza plástica. Mediante MJF es posible imprimir roscas dependiendo de sus características. Las roscas gruesas (más grandes que M8) pueden imprimirse directamente. Para las roscas finas es necesario realizar un cambio en el diseño, realizando un agujero siguiendo el tamaño que marca la ISO 965-2. Dependiendo la aplicación final, es posible realizar una modificación para adaptar el diseño a tornillos autorroscantes, tuercas de fijación rápida, tornillos y tuercas métricas.
4	Directo de máquina	-
5	Cambio en el proceso	Los insertos metálicos no se pueden montar durante el proceso de impresión. Por ello, se debe realizar posteriormente. Los insertos metálicos aptos para las piezas resultantes de MJF son los que se anclan mediante ultrasonidos y de forma mecánica o por expansión. Los insertos que se anclan por ultrasonidos son los más utilizados para pieza final porque tienen muy buenos resultados de torque y de resistencia a la extracción. Además, dichos insertos son poco dependientes del tamaño del agujero ya que se funden sus alrededores.

6	Directo de máquina	-
7	Compatibilidad de materiales	La soldadura es la unión de dos piezas plásticas. Para ello, es necesario que exista compatibilidad de materiales entre las dos piezas. Existen diferentes métodos de soldadura, pero el más extensivo para MJF es realizarlo mediante ultrasonidos. Sin embargo, se puede realizar por placas calientes o incluso por fricción.
8	Directo de máquina	-
9	Compatibilidad de materiales	Una alternativa a la soldadura es aplicar adhesivo entre dichas piezas. Para la PA12 se suele utilizar adhesivos en base acrilato. Para unir dos partes, primero es necesario modificar el diseño y hacer un anclaje con una holgura de 0,1 - 0,2 mm.
10	Directo de máquina	-
11	Cambio en el diseño	En cuanto al diseño de nervios es conveniente en primer lugar comparara las propiedades mecánicas del material origen con la PA12 de MJF. Dependiendo de los requerimientos de la aplicación y la diferencia de los materiales en términos de flexión y torsión es necesario realizar un cambio en el diseño de nervios. E incluso es muy usual en fabricación aditiva reforzar la pieza a partir de una simulación de elementos finitos topológica o generar estructuras ligeras o lattice.
12	Directo de máquina	-
13	Cambio en el diseño	Las bisagras integrales en fabricación convencional pueden ocasionar diferentes problemas, como son atrapamientos de aire y el no llenado completo de la pieza. En fabricación aditiva esta restricción no existe, aunque es necesario tener en cuenta el espesor de película para conseguir la funcionalidad deseada. Las familias de las poliamidas son ideales para este tipo de aplicaciones por su elasticidad. Sin embargo, es requerido realizar un cambio de espesor de bisagra si hay un cambio del material. MJF permite hacer espesor mínimo de pared de 0,3 mm para pequeñas paredes orientadas en el plano XY y 0,4 mm para paredes cortas orientadas en el plano Z.

5.2.8 N3: Características del diseño

En este bloque se valoran diferentes aspectos sobre las características integras del diseño. Se analizan aspectos como son: el espesor mínimo de pared, las tolerancias de fabricación y la rugosidad superficial entre otros. La tecnología MJF puede fabricar piezas siempre en un rango de operaciones determinado. Por ello, es importante identificar las características del diseño y analizar su viabilidad técnica.

Seguidamente, se muestra el diagrama IDEF0 para el tercer nodo. Las entradas de información que debe introducir el usuario son las diferentes características del diseño. La salida del tercer bloque son unas sugerencias de fabricación y de diseño, tal como se muestra en la Figura 5.17.

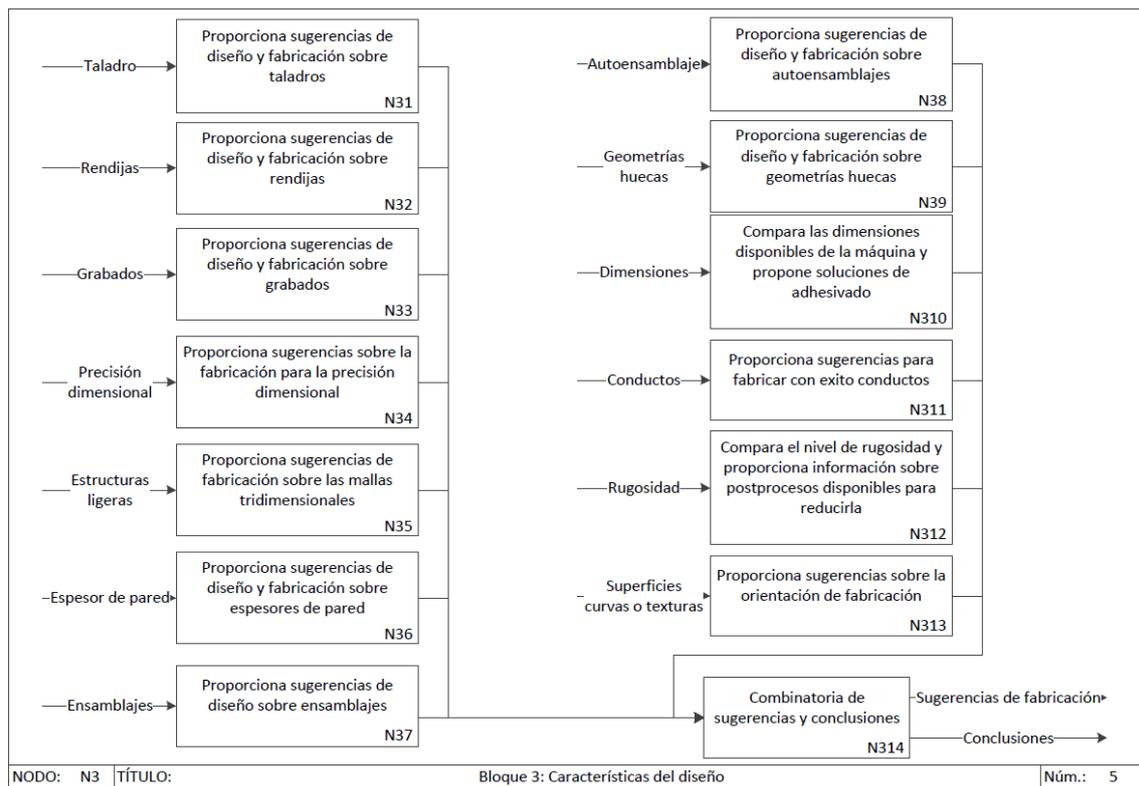


Figura 5.17. Representación de IDEF0 para el nodo N3. Fuente: Propia.

En el tercer nodo (N3) todas las variables de entrada son características de fabricación y sus repuestas son binarias (Sí o No). Por cada uno de los subnodos (N31-N313) el sistema genera unas sugerencias de fabricación para aplicarlo al modelo tridimensional.

- En el N31 se cuestiona si el diseño tiene agujeros o taladros por debajo de 0,5 mm.
- En el N32 se pregunta si el diseño contiene rendijas por debajo de 0,5 mm.
- En el N33 se cuestiona si el diseño tiene algún grabado.
- En el N34 se cuestiona si la pieza debe tener una precisión dimensional por encima del 0,2%.
- En el N35 se cuestiona si el diseño original contiene estructuras ligeras.
- En el N36 se pregunta si el diseño contiene alguna parte con un espesor de pared por debajo de 0,4 mm.
- En el N37 se pregunta si la pieza tiene que montarse por ajuste entre piezas formando parte de un ensamblaje.
- En el N38 se cuestiona si la referencia es un ensamblaje, es decir, dos o más piezas ensambladas.
- En el N39 se pregunta si la pieza es una geometría hueca, es decir, una pieza que contiene solamente aire en su interior.
- En el N310 se pregunta si el volumen de la pieza es mayor al volumen de impresión efectivo, en este caso, 380x284x380 mm.
- En el N311 se pregunta si la pieza es un tubo para la conducción de fluidos.
- En el N312 se cuestiona si la rugosidad superficial de la pieza es mayor o igual a 15 um Ra.
- En el N313 se pregunta si la pieza contiene alguna parte cuya superficie debe ser suave o tiene algún texturizado.

El N314 es la combinatoria de sugerencias o conclusiones, también llamado motor de inferencia, que agrupa las diferentes sugerencias de diseño y fabricación de cada subnodo (N31, N32, N33, N34, N35, N36, N37, N38, N39, N310, N311, N312 y N313). En la Figura 5.18 se muestra el árbol de decisiones y las diferentes permutaciones del tercer bloque.

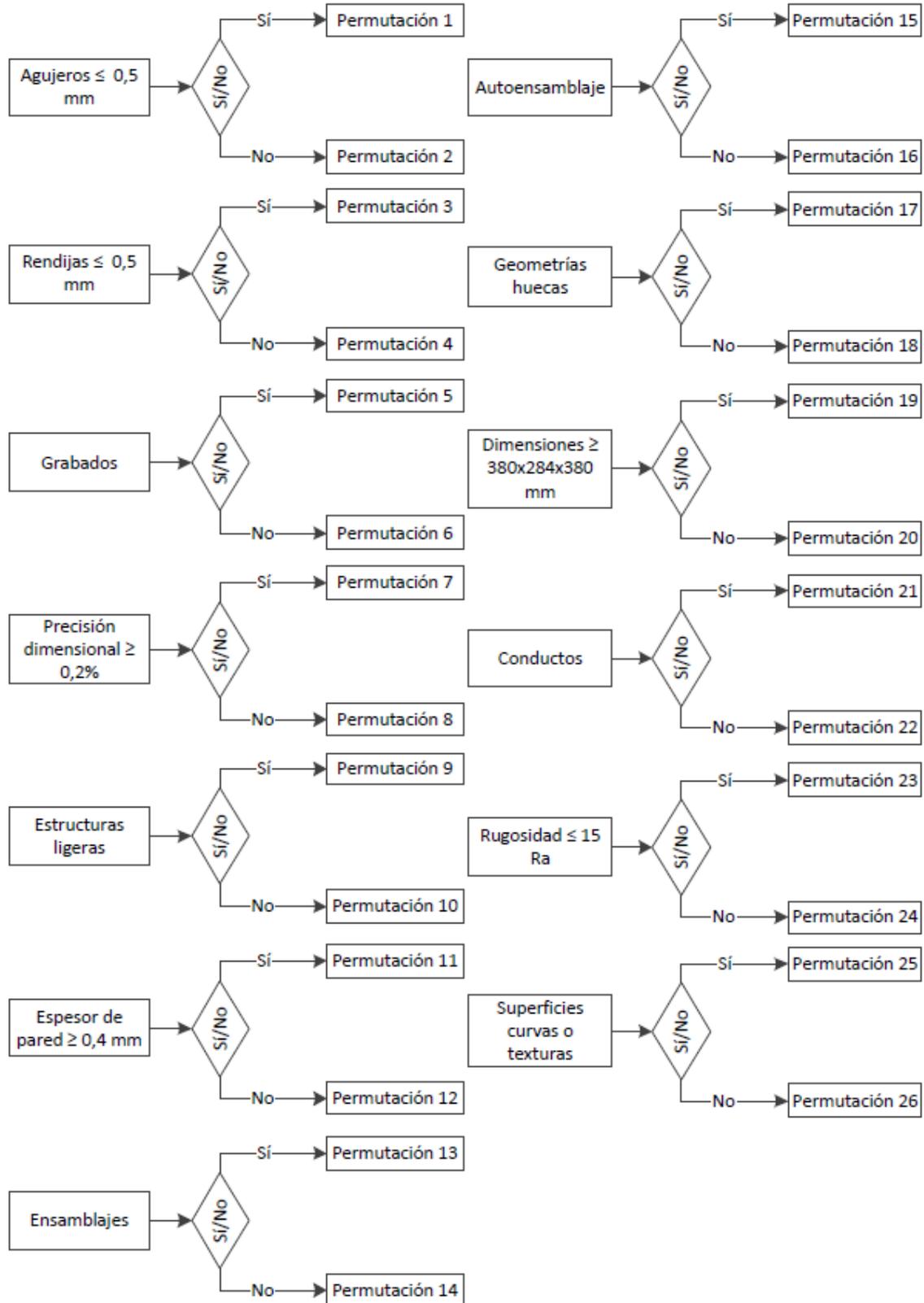


Figura 5.18. Árbol de decisión del bloque 3 y las diferentes permutaciones. Fuente: Propia.

Cada una de las permutaciones proporciona unas sugerencias de fabricación y una conclusión o salida. En la Tabla 5.6 se muestran las diferentes permutaciones.

Tabla 5.6. Sistema de permutaciones para el bloque 3. Fuente: Propia.

Permutación	Conclusión	Sugerencia de diseño y fabricación
1	Cambio en el proceso	El diámetro mínimo de agujeros y extrusiones es de 0,5 mm, para asegurar la creación de éste. Por ello, es necesario realizar un cambio en el proceso y realizar un mecanizado de la pieza posteriormente a la fabricación.
2	Directo de máquina	-
3	Cambio en el proceso	Se permiten realizar rendijas de hasta 0,5 mm. Por debajo de estas medidas puede haber riesgo de que no se genere rendija por la fusión del polvo. Por esto es necesario realizar un mandrinado de las rendijas.
4	Directo de máquina	-
5	Cambio en el diseño	MJF permite los grabados con buena resolución y definición con tamaños de letra a partir de 6 pt y una profundidad/altura a partir de 1 mm. Los grabados extruidos es mejor situarlos cara arriba mientras que los grabados internos es mejor situarlos cara abajo en la cámara de fabricación a causa de las contracciones del material.
6	Directo de máquina	-
7	Directo de máquina	MJF puede llegar a precisiones de $\pm 0,2$ mm hasta 100 mm, por encima de dicho valor se considera $\pm 0,2\%$. Para conseguir buenos resultados en términos de precisión dimensional se recomienda orientar las partes críticas en el plano XY. Los cuerpos cilíndricos se deben orientar de forma vertical siempre que sea posible.
8	Cambio en el proceso	Es necesario realizar un mecanizado posteriormente a la fabricación de la pieza en las partes donde la precisión dimensional de máquina no sea suficiente.
9	Cambio en el diseño	Para mallados tridimensionales el hueco mínimo debe ser de 1 mm para asegurar la salida del material después de su fabricación. Normalmente, se utiliza aire comprimido para facilitar la salida del material.
10	Directo de máquina	-

11	Directo de máquina	En general, el espesor mínimo de pared recomendado es de 0,3 mm para pequeñas paredes orientadas en el plano XY y 0,4 mm para paredes cortas orientadas en el plano Z.
12	Cambio en el proceso	Es necesario realizar un mecanizado posteriormente a la fabricación de la pieza en las partes donde el espesor mínimo no se ha alcanzado.
13	Cambio en el diseño	Para que dos partes impresas puedan ensamblarse de forma correcta se recomienda dejar distancias entre las superficies de contacto de 0,4 mm, ya que las tolerancias de fabricación se sitúan en $\pm 0,2$ mm.
14	Directo de máquina	-
15	Cambio en el diseño	El espacio mínimo para las partes ensambladas que se imprimen juntas debe ser de 0,7 mm. Aquellas partes con un grueso de pared por encima de los 50 mm deben tener un espaciado mayor para preservar el adecuado comportamiento.
16	Directo de máquina	-
17	Cambio en el diseño	MJF construye partes fundiendo el área de forma selectiva capa a capa. Si la parte contiene una geometría hueca cerrada es necesario diseñar orificios de drenaje. Por ello, se recomienda realizar dos orificios, entrada y salida de aire comprimido, con un diámetro mínimo recomendado de 2 mm.
18	Directo de máquina	-
19	Cambio en el proceso	Las partes pueden ser tan grandes como la capacidad máxima de la cubeta (380x284x380 mm). Si la pieza es mayor es requerido realizar una división de la parte y unir las mediante adhesivos. Se recomienda realizar un diseño de enclavamiento para posicionar las partes y facilitar el proceso de encolado. Se recomienda dejar un espacio entre las partes de 0,1-0,2 mm entre las paredes. Para la PA12 se utilizan adhesivos como: Ciano acrilato, resinas epoxis o adhesivos base neopreno. Se recomienda también quitar el exceso de adhesivos que puede cambiar el color, la apariencia o el brillo de la parte visible, también lijar y limpiar la superficie con adhesivo.

20	Directo de máquina	-
21	Cambio en el diseño	Para retirar el material de conductos estrechos, se suele considerar el diseño de un tira o cadena en el interior del conducto. Cuando las partes están impresas se estira de dicha cadena para desalojar la mayor parte del material. El material restante se puede retirar mediante el proceso de limpieza normal.
22	Directo de máquina	-
23	Post-procesado	La rugosidad de las caras expuestas en el plano XY o paralelas es de 12-14 um Ra. Mientras que el resto de las caras tienen una rugosidad de 8 um Ra. Para conseguir rugosidades menores existen diferentes métodos: mecánicos y químicos. Mediante vibradoras con abrasivos (plásticos o cerámicos) se puede alcanzar hasta 1,5 um Ra, aunque puede ser agresivo con detalles de diseño, ya que los puede romper. Con ataques químicos se puede alcanzar fácilmente 1 um Ra e incluso 0,1 um Ra en los mejores casos, similar a la inyección. Este último proceso puede impactar sobre las propiedades dimensionales y las propiedades mecánicas.
24	Directo de máquina	-
25	Cambio en el proceso	El efecto escalón es un fenómeno que aparece en muchas tecnologías de fabricación aditiva por el mero hecho de construir partes capa a capa. Para poder evitar dicho efecto en las superficies inclinadas o curvas, se recomienda evitar siempre que sea posible posicionar la parte con ángulos menores de 30° en el plano horizontal (XY). Para conseguir superficies lo más suavizadas posibles se recomienda posicionar la parte crítica cara abajo y cuando se trata de superficies texturizadas con ángulos agudos se recomienda enfocarlos cara arriba.
26	Directo de máquina	-

5.2.9 N4: Funcionalidad

En este bloque se valoran diferentes aspectos sobre los requerimientos de funcionalidad de la pieza. Se analizan aspectos como son: si la pieza está sometida a presión, a altas

temperaturas, a esfuerzos mecánicos y/o químicos. La tecnología MJF con el material PA12 puede fabricar piezas funcionalidades siempre en un rango de operaciones determinado.

En la Figura 5.19 se muestra el diagrama IDEF0 para el cuarto nodo. Las entradas de información que se deben introducir son las diferentes funcionalidades de la pieza. La salida del cuarto bloque son unas sugerencias de fabricación y de diseño.

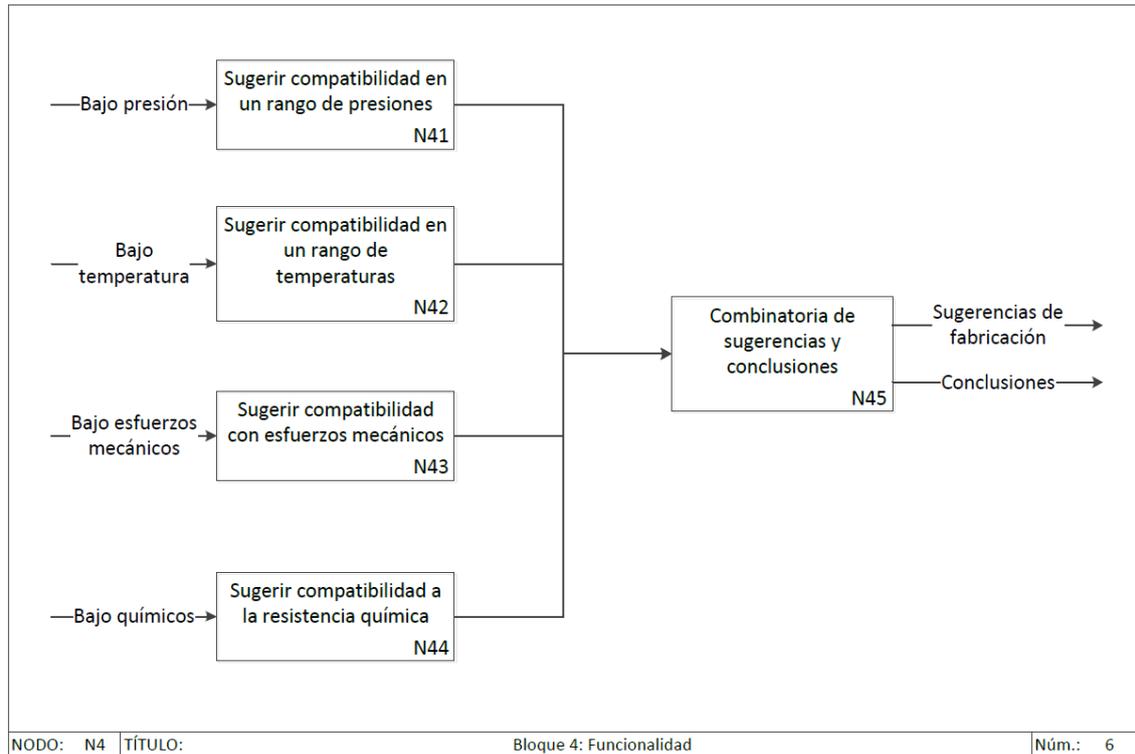


Figura 5.19. Representación de IDEF0 para el nodo N4. Fuente: Propia.

En el cuarto nodo (N4) todas las variables de entrada son funcionalidades de la pieza y sus repuestas son binarias (Sí o No). Por cada uno de los subnodos (N41-N44) el sistema genera unos rangos de funcionamiento u operación.

- En el N41 se pregunta si la pieza resiste a los esfuerzos de presión dado un estudio de resistencia a la presión de las piezas fabricadas con PA12 y MJF.
- En el N42 se cuestiona si la pieza resiste a la temperatura dado un estudio rango de temperaturas proveniente de un estudio de estabilidad térmica.
- En el N43 se pregunta si la pieza resiste a los esfuerzos mecánicos dado un estudio con los parámetros mecánicos según su orientación de impresión.
- En el N44 se cuestiona si la pieza tiene resistencia química a las substancias en contacto dado una tabla de compatibilidad química de la PA12.

El N45 es la combinatoria de sugerencias o conclusiones, también llamado motor de inferencia, que agrupa las diferentes sugerencias funcionalidad de cada sub-nodo (N41, N42, N43 y N44). En la Figura 5.20 se muestra el árbol de decisiones y las diferentes permutaciones.

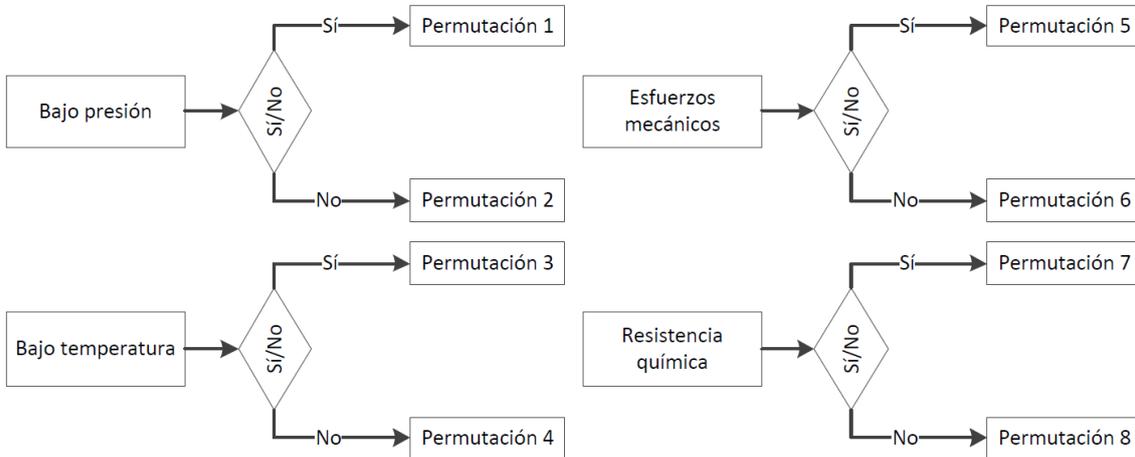


Figura 5.20. Árbol de decisión del bloque 4 y las diferentes permutaciones. Fuente: Propia.

Cada una de las permutaciones proporciona unas sugerencias de fabricación y una conclusión o salida. En la Tabla 5.7 se muestran las diferentes permutaciones del tercer bloque.

Tabla 5.7. Sistema de permutaciones para el bloque 3. Fuente: Propia.

Permutación	Conclusión	Sugerencia de diseño y fabricación
1	Directo de máquina	-
2	Cambio en el diseño	Es necesario realizar un cambio en el diseño aumentando el grueso de la pared, siempre y cuando sea posible.
3	Directo de máquina	-
4	No es posible	-
5	Directo de máquina	-
6	Cambio en el diseño	Es necesario realizar un análisis de elementos finitos para introducir más material donde sea necesario.
7	Directo de máquina	-
8	No es posible	-

5.2.10 N5: Combinaciones de sugerencias y conclusiones

En este bloque se recogen las diferentes conclusiones y sugerencias de diseño y fabricación de los anteriores bloques y se somete a un algoritmo que genera una conclusión y una sugerencia integrada. En la Figura 5.21 se muestra el diagrama IDEF0 para el quinto nodo.

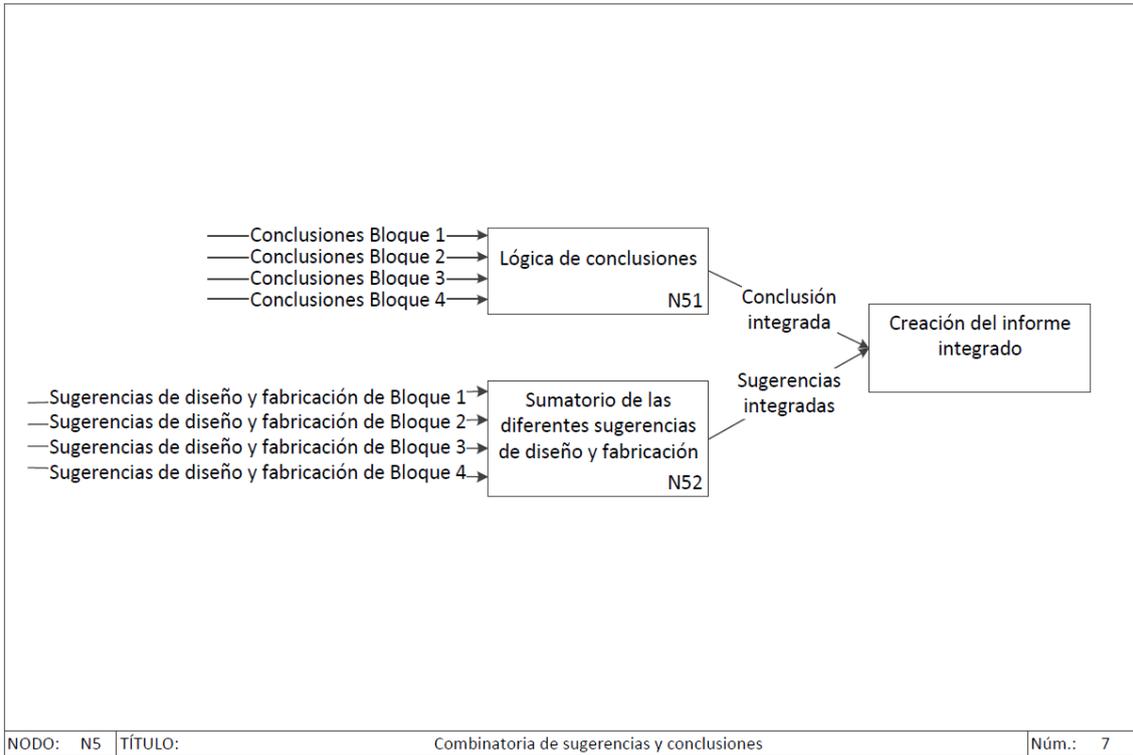


Figura 5.21. Representación de IDEF0 para el nodo N5. Fuente: Propia.

Seguidamente se muestra en detalle la lógica de conclusiones que se ha adoptado. Siendo: 1) Directo de máquina; 2) Cambio en el diseño; 3) Cambio en el proceso y 4) Postproceso; 5) Comprobar compatibilidad de materiales y 6) No es posible.

- Si en algún bloque existe la conclusión 6, la conclusión integrada es la conclusión 6.
- Si en todos los bloques la conclusión es 1, la conclusión integrada es la conclusión 1.
- Si en alguno de los bloques la conclusión es 2 o 3 o 4 o 5, la conclusión integrada es la compilación de las conclusiones anteriores, sin tener en cuenta ni la 1 ni la 6.

La creación del informe integrado contiene todas las sugerencias de diseño y fabricación recogidas de los diferentes bloques. Además, de la conclusión y la sugerencia integrada. Además, existen consideraciones genéricas que se deben tener en cuenta para cualquier diseño que son las siguientes [102]:

- **Contracciones:** El proceso de impresión produce pequeñas contracciones en el área de fusión de cada capa. Para conseguir la mejor precisión, las piezas deben ser compensadas según la contracción del material. Esto se realiza mediante HP SmartStream 3D Build Manager y las extensiones de Magics y Netfabb.

- **Repetitividad para producciones en serie:** Para conseguir resultados similares en producción de series se recomienda utilizar los mismos parámetros de impresión. Antes de realizar una producción es recomendable realizar una pequeña serie con diferentes orientaciones y seleccionar la mejor.
- **Distancia entre las piezas en el volumen de fabricación:** Se recomienda dejar un espacio entre las piezas de al menos 2 mm.
- **Minimización de la deformación:** Para geometrías planas y largas es recomendable posicionar la pieza en el plano horizontal (XY) de la parte inferior de la cubeta siempre y cuando sea posible. Para las piezas que son críticas se recomienda situarlas en la parte central de la zona de impresión, donde el enfriamiento es homogéneo.

5.3 Integración de la metodología en un sistema informatizado

En este apartado se explica de forma detallada la integración de la metodología de diseño y fabricación en un sistema informatizado. El objetivo de la integración es transferir la lógica de la metodología a un sistema informático que permita al usuario poder ejecutarlo en cualquier dispositivo: ordenador, móvil o tableta informática. Para dicha integración se ha utilizado el programa R Studio y sus complementos ya que es un software abierto con disponibilidad para crear interfaces de usuario y servidores web. La integración de la metodología se ha dividido en tres fases, tal como muestra la Figura 5.22.

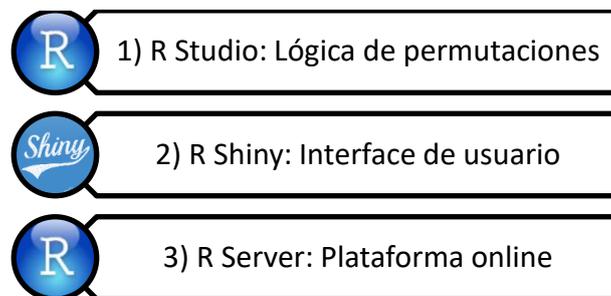


Figura 5.22. Esquema de programas y aplicativos utilizados para la integración. Fuente: Propia.

En la primera fase se ha programado la lógica de control mediante la herramienta R Studio, incluyendo las variables de entrada, las combinatorias de los cuatro bloques, la lógica de conclusiones y las variables de salida.

En la segunda fase se ha implementado una interfaz de usuario mediante la plataforma R Shiny, un módulo conectado a R Studio que permite crear interfaces gráficas, conteniendo las listas y campos de texto de las variables de entrada. En la Figura 5.23 se muestra una parte de la interfaz de usuario para el sistema DSS.

Figura 5.23. Interfaz de usuario del sistema DSS (1/2). Fuente: Propia.

En la anterior figura se muestran las variables de entradas que tiene que introducir el usuario. En primer lugar, hay una información general que se compone por el autor y la referencia. Seguidamente se requiere la información relevante a cada una de las partes o bloques. En cada uno de dichos bloques se realizan las cuestiones pertinentes para posteriormente utilizar la lógica computacional para dar soporte a la toma de decisión técnica de fabricar de manera convencional o aditiva. En la Figura 5.24 se muestra la otra parte de la interfaz de usuario para el sistema DSS.

Figura 5.24. Interfaz de usuario del sistema DSS (2/2). Fuente: Propia.

En la segunda parte de la interfaz de usuario se muestran las entradas del análisis de costes. Con los datos de entrada y a partir de unos cálculos, el sistema genera un gráfico que pretende ayudar en la toma de decisión económica de fabricar de manera convencional o aditiva. Una vez se han introducido todos los datos requeridos se procede a la creación de un informe que contempla los siguientes puntos:

- **Información inicial:** incluye la fecha de aplicación de la metodología y el número de referencia de la pieza de estudio.
- **Resultados gráficos:** una tabla donde las columnas son las conclusiones y las filas son las variables de entrada. El objetivo de dicha tabla es decidir con un simple vistazo si es posible o no fabricar la referencia de estudio mediante MJF

y PA12. Si todos los puntos están en la zona verde significa que dicha referencia se puede fabricar de forma directa. Si existe algún punto en la zona amarilla es que es necesario realizar un rediseño o una comprobación de la compatibilidad de materiales antes de la impresión o un cambio en el proceso y/o postratamiento después de la impresión. Sin embargo, si hay algún punto en la zona roja es que no es posible fabricar la referencia mediante la tecnología y material especificado. En la Figura 5.25 se muestra un ejemplo de lo explicado.

Pregunta	Respuesta	1	2	3	4	5	6
¿Color, aspecto superficial e importancia de la pieza?	No	●					
¿La pieza contiene clipajes?	No	●					
¿La pieza contiene roscas?	Sí		●				
¿La pieza contempla insertos metálicos?	No	●					
¿La pieza esta soldada con otra?	No	●					
¿La pieza esta adhesivada con otra?	No	●					
¿La pieza tiene nervios?	Sí		●				
¿La pieza contiene bisagras integrales?	No	●					
¿Los diámetros de los agujeros < 0,5 mm?	No	●					
¿El ancho de las rendijas < 0,5 mm?	No	●					
¿Contiene grabados?:	No	●					
¿La precisión dimensional es >= 0,2 mm?	Sí	●					
¿Contiene estructuras ligeras?	No	●					
¿El espesor de la pared >= 0,4mm?	Sí	●					
¿Esta pieza es parte de un ensamblaje?	Sí		●				
¿Esta pieza forma parte de un autoensamblaje?	No	●					
¿Contiene geometrías huecas?	No	●					
¿Las dimensiones son >= 380x284x380 mm?	No	●					
¿Contiene conductos?	No	●					
¿La rugosidad es <= 15 Ra?	No	●					
¿Contiene superficies curvas o texturizados?	Sí			●			
¿Soporta la presión de operación?	Sí	●					
¿Soporta las altas temperaturas?	Sí	●					
¿Soporta el estrés mecánico?	Sí	●					
¿Tiene resistencia química?	Sí	●					

- 1 - Directo de máquina
- 2 - Modificación de diseño requerida
- 3 - Modificación del proceso requerida
- 4 - Postratamiento requerido
- 5 - Comprobación de la compatibilidad de materiales
- 6 - No es posible

Figura 5.25. Resultados gráficos del informe. Fuente: Propia.

- **Información general:** en este apartado se muestra un pequeño resumen donde se especifica el funcionamiento del sistema experto y una descripción de los diferentes bloques del sistema DSS.
- **Análisis de costes:** se muestra una estimación de costes de fabricación y suministro a partir del modelo Hopkinson and Dickens, 2003. En esta parte se comparan los costes de fabricar la referencia mediante MJF y PA12 en el centro logístico y fabricarlo mediante inyección de plástico en el centro productivo. A partir de los datos introducidos por el usuario en el análisis de costes, se genera la gráfica para determinar cuál es el punto de corte, que separa la viabilidad económica de fabricar mediante MJF o por inyección. En la Figura 5.26 se muestra un ejemplo de dicha gráfica.

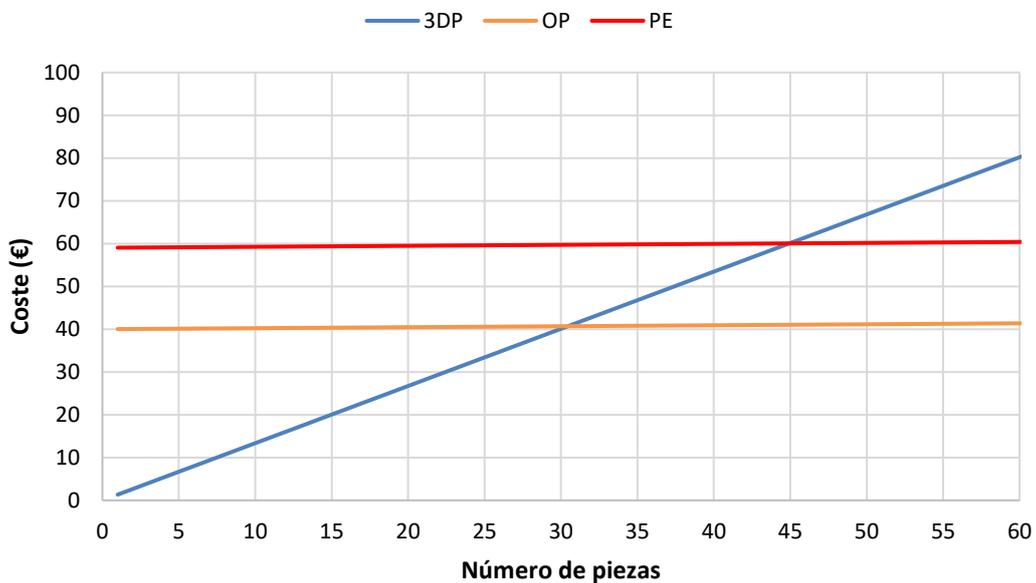


Figura 5.26. Análisis de costes del informe. Fuente: Propia.

En inyección de plásticos se distinguen los costes fijos de los variables. Los fijos son básicamente la inversión de tiempo que se necesita para la preparación de un lote de piezas, que se compone de la logística del molde y la preparación de la máquina. Los costes variables son el coste de la pieza siendo la suma del coste del material y el uso de la máquina por pieza.

Además, para la inyección de plástico o tecnología convencional hay dos escenarios. El primer escenario es el optimista donde, aunque la demanda es menor al lote óptimo, las piezas se venderán en menos de un año y consecuentemente no se le aplica los costes de depreciación y obsolescencia. El segundo escenario es el pesimista, donde las piezas quedaran remanentes en inventario durante un largo periodo de tiempo y, a consecuencia, se le aplica

los costes de inventario, depreciación y obsolescencia. Además, se desglosan todos los costes asociados a la fabricación (máquina, operario y material) y los de suministro (inventario, transporte, depreciación y obsolescencia). Según estudios internos de la cadena de suministro de la organización los costes de transporte suponen entre 2%-5% sobre el valor del inventario dependiendo de la unidad de producción. Y los costes de stock un 26% sobre el valor del inventario. Además, en el caso más pesimista, si la pieza permanece en inventario más de un año, el coste asociado a la depreciación económica es de un 6% del valor del inventario y el riesgo de obsolescencia es de un 11% sobre el valor de la pieza.

- **Variables de entrada:** se muestra una tabla con los diferentes valores de entrada para cada una de las variables. En la Figura 5.27 se muestra un ejemplo de las variables de entrada del informe final.

Pregunta	Respuesta
¿La pieza tiene color o es transparente?:	Color
¿Como es el aspecto superficial de la pieza?	Pulido
¿Es importante la apariencia de la pieza?	No
¿La pieza contiene clipajes?	No
¿La pieza contiene roscas?	No
¿La pieza contempla insertos metálicos?	No
¿La pieza esta soldada con otra?	No
¿La pieza esta adhesivada con otra?	No
¿La pieza tiene nervios?	Sí
¿La pieza contiene bisagras integrales?	No
¿Los diámetros de los agujeros < 0,5 mm?	No
¿El ancho de las rendijas < 0,5 mm?	No
¿Contiene grabados?:	No
¿La precisión dimensional es $\geq 0,2$ mm?	Sí
¿Contiene estructuras ligeras?	No
¿El espesor de la pared $\geq 0,4$ mm?	No
¿Esta pieza es parte de un ensamblaje?	Sí
¿Esta pieza forma parte de un autoensamblaje?	No
¿Contiene geometrías huecas?	No
¿Las dimensiones son $\geq 380 \times 284 \times 380$ mm?	No
¿Contiene conductos?	No
¿La rugosidad es ≤ 15 Ra?	No
¿Contiene superficies curvas o texturizados?	Sí
¿Soporta la presión de operación?	Sí
¿Soporta las altas temperaturas?	Sí
¿Soporta el estrés mecánico?	Sí
¿Tiene resistencia química?	Sí

Figura 5.27. Variables de entrada del informe. Fuente: Propia.

- **Resultados:** se determinan las variables de salidas o conclusiones para cada uno de los bloques y el cómputo final. En la Figura 5.28 se muestra un ejemplo.

Section outputs:

- Part 1 (Appearance): **Post treatment is required**
- Part 2 (Design Elements): **Direct from machine**
- Part 3 (Design Characteristics): **It is not possible**
- Part 4 (Functionality): **Direct from machine**

Figura 5.28. Resultados del informe. Fuente: Propia.

- **Consideraciones de diseño y fabricación:** según las variables de entrada introducidas y las combinatorias se representan las consideraciones de diseño y fabricación oportunas para el caso de estudio en cuestión.

En tercera fase se ha subido el contenido de las dos anteriores fases a la red mediante el módulo R Server, con el objetivo de que el usuario pueda tener el aplicativo disponible en cualquier momento a través de un dispositivo conectado a internet. A través de [112] se puede acceder al aplicativo.

6 Aplicación de la metodología a casos prácticos

En este apartado se pretende validar la metodología de diseño y fabricación propuesta a partir de unos casos de estudio correspondientes a las primeras cuatro referencias obtenidas de la lista de artículos preferentes. Se ha analizado la efectividad de la metodología y se ha realizado un estudio comparativo de costes respecto los procesos de fabricación convencional.

6.1 Procedimiento de la validación

El sistema de recomendaciones realizado se ha generado a partir de la introducción del conocimiento de unos casos de exploración concretos, con los cuales se ha entrenado el modelo. Se espera que si se analizan otros casos de estudio diferentes a los anteriores el sistema proporcione al usuario las mismas consideraciones que le daría un experto en la materia. Por esto, los nuevos casos de estudios, que tienen como objetivo validar la metodología, se han fabricado y se han verificado en condiciones reales.

Posteriormente a la validación, se ha realizado un estudio de costes punta a punta y se ha comparado el método tradicional versus realizarlo mediante MJF. Seguidamente se muestran los diferentes casos de estudio, su validación técnica y los resultados obtenidos de los costes asociados.

6.2 Caso de estudio 1: Rodete de bomba

El primer caso de estudio es un rodete de bomba fabricado en la unidad de producción situada en china mediante inyección de plásticos. Se trata de una parte crítica de la bomba, ya que sin el rodete el equipo no funciona y por esta razón se debe proporcionar un suministro lo más rápido posible. Además, este es un artículo clasificado como MTO por su baja rotación, generando unos altos tiempos de entrega y costes asociados. El material de fabricación origen es PPO + GF y la conexión con el eje del motor es mediante roscado directo. En la Figura 6.1 se muestran las imágenes del rodete y la bomba.



Figura 6.1. (a) Bomba hidráulica (b) Rodete de bomba. Fuente: Propia.

El rodete presentado es una pieza plástica cuya conexión con el eje del motor se realiza mediante una rosca. Es muy importante conservar la rugosidad superficial de los álabes, ya que puede afectar en el rendimiento, y la precisión dimensional tiene que ser suficiente para el correcto montaje. En la Tabla 6.1 se muestra la matriz de conocimiento marcado con una “X” los conocimientos utilizados para el presente caso.

Tabla 6.1. Matriz de los puntos de conocimientos utilizados. Fuente: Propia.

Puntos de conocimientos	
X	Chorroado Pintado Infiltrado de color Otros acabados Engarces o clips
X	Roscas y atornillados Insertos metálicos Soldaduras Adhesivos
X	Nervios Bisagras integrales Diámetro mínimo de agujero Rendijas Grabados
X	Precisión dimensional Estructuras ligeras
X	Espesor mínimo de pared
X	Tolerancias de ensamblaje Autoensamblajes Geometrías huecas
X	Dimensiones máximas de fabricación Impresión de conductos
X	Rugosidad superficial
X	Texturizados y superficies curvas
X	Resistencia a la temperatura
X	Esfuerzos de presión
X	Esfuerzos mecánicos
X	Resistencia química

A partir de la introducción de las variables de entrada de dicha pieza se han obtenido los siguientes resultados de la metodología de diseño y fabricación:

1. Conclusión: Posible modificación en el diseño y el proceso
2. Sugerencias de diseño y fabricación:
 - Bloque 1: No es necesario realizar ningún tipo de pintado o infiltrado de color. Después de la fabricación del lote es requerido realizar una limpieza de las piezas mediante un chorroado para eliminar el material sobrante.
 - Bloque 2: Mediante MJF es posible imprimir roscas dependiendo de sus características. Las roscas gruesas (más grandes que M8) pueden

imprimirse directamente. Para las roscas finas es necesario realizar un cambio en el diseño, realizando un agujero siguiendo el tamaño que marca la ISO 965-2. Dependiendo la aplicación final, es posible realizar una modificación para adaptar el diseño a tornillos autorroscantes, tuercas de fijación rápida, tornillos y tuercas métricas.

En cuanto al diseño de nervios es conveniente en primer lugar comparar las propiedades mecánicas del material origen con la PA12 de MJF. Dependiendo de los requerimientos de la aplicación y la diferencia de los materiales en términos de flexión y torsión es necesario realizar un cambio en el diseño de los nervios. Es muy usual en fabricación aditiva reforzar la pieza a partir de una simulación de elementos finitos topológica o generar estructuras ligeras o *lattice*.

- Bloque 3: MJF alcanza precisiones de $\pm 0,2\text{mm}$ hasta 100mm , por encima de dicho valor se considera $\pm 0,2\%$. Para conseguir buenos resultados de precisión dimensional se recomienda orientar las partes críticas en el plano XY. Los cuerpos cilíndricos se deben orientar de forma vertical siempre que sea posible. En general, el espesor mínimo de pared recomendado es de $0,3\text{mm}$ para pequeñas paredes orientadas en el plano XY y $0,4\text{mm}$ para paredes cortas orientadas en el plano Z. Para que dos partes impresas puedan ensamblarse de forma correcta se recomienda dejar distancias entre las superficies de contacto de $0,4\text{mm}$, ya que las tolerancias de fabricación son de $\pm 0,2\%$.

El efecto escalón es un fenómeno que aparece en muchas tecnologías de fabricación aditiva por el mero hecho de construir partes capa a capa. Para poder evitar dicho efecto en las superficies inclinadas o curvas, se recomienda evitar siempre que sea posible posicionar la pieza con ángulos menores de 30° en el plano horizontal (XY). Para conseguir superficies lo más suavizadas posibles se recomienda posicionar la parte crítica cara abajo y cuando se trata superficies texturizadas con ángulos agudos se recomienda enfocarlos cara arriba.

- Bloque 4: No hay sugerencias de funcionalidad.

En la Figura 6.2 se presenta el cuadro resumen de las preguntas, respuestas y las conclusiones.

Pregunta	Respuesta	1	2	3	4	5	6
¿Color, aspecto superficial e importancia de la pieza?	No	●					
¿La pieza contiene clipajes?	No	●					
¿La pieza contiene roscas?	Sí		●				
¿La pieza contempla insertos metálicos?	No	●					
¿La pieza esta soldada con otra?	No	●					
¿La pieza esta adhesivada con otra?	No	●					
¿La pieza tiene nervios?	Sí		●				
¿La pieza contiene bisagras integrales?	No	●					
¿Los diámetros de los agujeros < 0,5 mm?	No	●					
¿El ancho de las rendijas < 0,5 mm?	No	●					
¿Contiene grabados?:	No	●					
¿La precisión dimensional es >= 0,2 mm?	Sí	●					
¿Contiene estructuras ligeras?	No	●					
¿El espesor de la pared >= 0,4mm?	Sí	●					
¿Esta pieza es parte de un ensamblaje?	Sí		●				
¿Esta pieza forma parte de un autoensamblaje?	No	●					
¿Contiene geometrías huecas?	No	●					
¿Las dimensiones son >= 380x284x380 mm?	No	●					
¿Contiene conductos?	No	●					
¿La rugosidad es <= 15 Ra?	No	●					
¿Contiene superficies curvas o texturizados?	Sí			●			
¿Soporta la presión de operación?	Sí	●					
¿Soporta las altas temperaturas?	Sí	●					
¿Soporta el estrés mecánico?	Sí	●					
¿Tiene resistencia química?	Sí	●					

1 - Directo de máquina

2 - Modificación de diseño requerida

3 - Modificación del proceso requerida

4 - Postratamiento requerido

5 - Comprobación de la compatibilidad de materiales

6 - No es posible

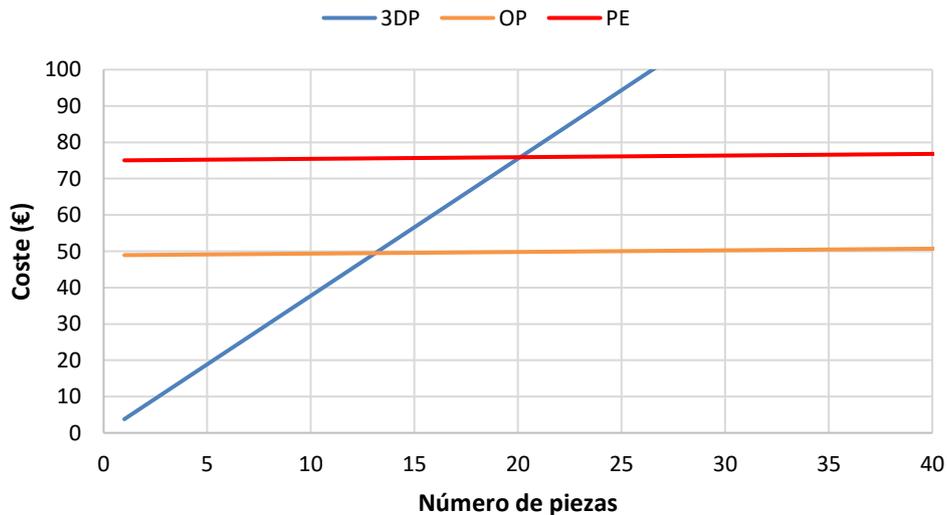
Figura 6.2. Cuadro resumen de las preguntas, respuestas y las conclusiones del caso de estudio 1.
Fuente: Propia.

Para este caso en concreto el resultado o salida de la metodología de diseño y fabricación coincide con el conocimiento del experto. Asimismo, se ha fabricado siguiendo la guía obtenida el rodete de bomba y seguidamente se ha validado el buen funcionamiento en campo de la pieza. Para ello, se ha desmontado la pieza original de la bomba y se ha instalado la pieza fabricada mediante MJF, tal como se muestran en la Figura 6.3.



Figura 6.3. Montaje y desmontaje de la bomba hidráulica. Fuente: Propia.

Se han realizado las pruebas de calidad pertinentes en cuanto a funcionalidad y control dimensional del rodete obteniendo unos resultados satisfactorios. En la Figura 6.4 se muestra el análisis económico obtenido del sistema de soporte a la decisión y las variables de entrada. Tal como se ha explicado anteriormente, para la inyección de plástico o tecnología convencional hay dos escenarios. El primer escenario es el optimista (OP) donde, aunque la demanda es menor al lote óptimo de fabricación, las piezas se venderán en menos de un año y consecuentemente no se le aplica los costes de depreciación y obsolescencia. El segundo escenario es el pesimista (PE), donde las piezas quedarán remanentes en inventario durante un largo periodo de tiempo y, a consecuencia, se le aplica los costes de inventario, depreciación y obsolescencia.



Tecnología	Demanda	Lote mínimo	Peso	Ratio de producción
MJF	1 unidad	-	0,02 kg	6 piezas/hora
Inyección	1 unidad	200 unidades	0,02 kg	100 piezas/hora

Figura 6.4. Resultados del análisis económico para el caso 1. Fuente: Propia.

En el caso optimista se podrían fabricar hasta 13 unidades para igualar los costes de las dos tecnologías. Y en el caso pesimista se podrían fabricar hasta 20 unidades. Seguidamente se ha realizado la comparativa de costes asociados, en la Tabla 6.2 se muestra el desglose de costes asociados para cada una de las tecnologías.

Tabla 6.2. Desglose de costes para el rodete de bomba. Fuente: Propia.

Tecnología	C_{Fijos}	C_{Variables}	C_{Total}	Ahorro
MJF	-	3,77	3,77	-
IM (optimista)	48,90	0,05	58,00	93%
IM (pesimista)	74,99	0,05	84,09	96%

Además, se han analizado los tiempos de entrega a partir del histórico de dicha referencia para la tecnología convencional. En la Tabla 6.3 se puede observar los valores obtenidos para cada una de las tecnologías.

Tabla 6.3. Tiempos de entrega medio del rodete en base 100. Fuente: Propia.

Tecnología	Tiempo de entrega medio*	Ahorro
MJF	100	-
IM	2105	95%

*Por confidencialidad de datos no se pueden mostrar las unidades de tiempo reales.

6.3 Caso de estudio 2: Tapa para filtro

El siguiente caso de estudio es la tapa del sistema de filtración de un robot de piscina. Se trata de una pieza fabricada en ABS que permite la entrada del fluido, pero no la salida de éste. Una corriente de agua sucia pasa a través de esta tapa o compuerta hacia una rejilla de tela para separar el sólido del líquido. Esta compuerta solamente permite el paso hacia la dirección del filtro y no al contrario. Se trata de una pieza con muy baja rotación, ya que no es muy usual que rompa o se estropee y por ello está clasificada como MTO. Sin embargo, es una pieza crítica ya afecta directamente a la funcionalidad principal del robot que es limpiar las superficies y las paredes de la piscina. En la Figura 6.5 se observa unas imágenes del conjunto y de la pieza en cuestión.

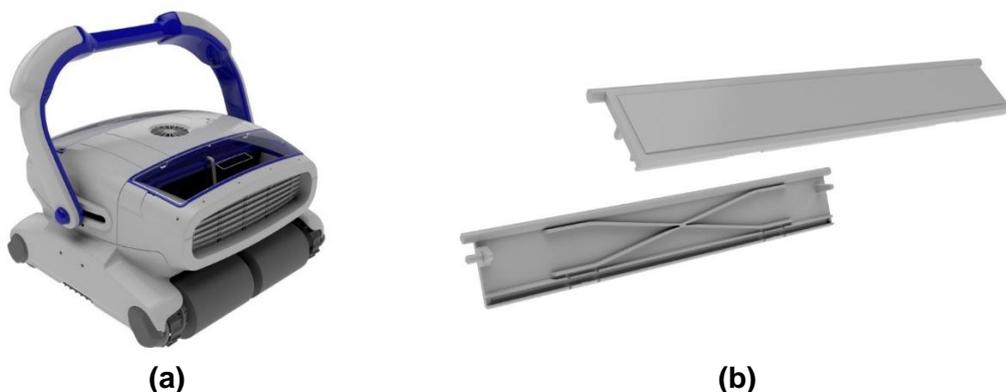


Figura 6.5. (a) Robot de piscina (b) Compuerta del filtro. Fuente: Propia.

La tapa presentada es una pieza plástica cuyo ensamblaje se realiza mediante la introducción de dos salientes en dos puntos mientras se flexiona la pieza. En este caso es importante obtener un comportamiento a la flexión similar al original para asegurar el correcto montaje. En la Tabla 6.4 se muestra la matriz de conocimiento marcado con una “X” los conocimientos utilizados para el presente caso.

Tabla 6.4. Matriz de los puntos de conocimientos utilizados. Fuente: Propia.

Puntos de conocimientos	
X	Chorroado Pintado Infiltrado de color Otros acabados Engarces o clips Roscas y atornillados Insertos metálicos Soldaduras Adhesivos
X	Nervios Bisagras integrales Diámetro mínimo de agujero
X	Rendijas Grabados
X	Precisión dimensional Estructuras ligeras
X	Espesor mínimo de pared
X	Tolerancias de ensamblaje Autoensamblajes Geometrías huecas
X	Dimensiones máximas de fabricación Impresión de conductos Rugosidad superficial Texturizados y superficies curvas Esfuerzos de presión
X	Resistencia a la temperatura
X	Esfuerzos mecánicos
X	Resistencia química

Se han obtenido los siguientes resultados de la metodología de diseño y fabricación:

1. Conclusión: Cambio en el diseño
2. Sugerencias de diseño y fabricación:
 - Bloque 1: No es necesario realizar ningún tipo de pintado o infiltrado de color. Después de la fabricación del lote es requerido realizar una limpieza de las piezas mediante un chorroado para eliminar el material sobrante.
 - Bloque 2: En cuanto al diseño de nervios es conveniente en primer lugar comparar las propiedades mecánicas del material origen con la PA12 de MJF. Dependiendo de los requerimientos de la aplicación y la diferencia

de los materiales en términos de flexión y torsión es necesario realizar un cambio en el diseño de los nervios. Es muy usual en fabricación aditiva reforzar la pieza a partir de una simulación de elementos finitos topológica o generar estructuras ligeras o *lattice*.

- Bloque 3: MJF alcanza precisiones de $\pm 0,2$ mm hasta 100 mm, por encima de dicho valor se considera $\pm 0,2\%$. Para conseguir buenos resultados de precisión dimensional se recomienda orientar las partes críticas en el plano XY. Los cuerpos cilíndricos se deben orientar de forma vertical siempre que sea posible. En general, el espesor mínimo de pared recomendado es de 0,3 mm para pequeñas paredes orientadas en el plano XY y 0,4 mm para paredes cortas orientadas en el plano Z. Para que dos partes impresas puedan ensamblarse de forma correcta se recomienda dejar distancias entre las superficies de contacto de 0,4 mm, ya que las tolerancias de fabricación son de $\pm 0,2\%$.

El efecto escalón es un fenómeno que aparece en muchas tecnologías de fabricación aditiva por el mero hecho de construir partes capa a capa. Para poder evitar dicho efecto en las superficies inclinadas o curvas, se recomienda evitar siempre que sea posible posicionar la pieza con ángulos menores de 30° en el plano horizontal (XY). Para conseguir superficies lo más suavizadas posibles se recomienda posicionar la parte crítica cara abajo y cuando se trata superficies texturizadas con ángulos agudos se recomienda enfocarlos cara arriba.

- Bloque 4: No hay sugerencias de funcionalidad.

En la Figura 6.6 se presenta el cuadro resumen de las preguntas, respuestas y las conclusiones.

Pregunta	Respuesta	1	2	3	4	5	6
¿Color, aspecto superficial e importancia de la pieza?	No	●					
¿La pieza contiene clipajes?	No	●					
¿La pieza contiene roscas?	No	●					
¿La pieza contempla insertos metálicos?	No	●					
¿La pieza esta soldada con otra?	No	●					
¿La pieza esta adhesivada con otra?	No	●					
¿La pieza tiene nervios?	Sí		●				
¿La pieza contiene bisagras integrales?	No	●					
¿Los diámetros de los agujeros < 0,5 mm?	No	●					
¿El ancho de las rendijas < 0,5 mm?	No	●					
¿Contiene grabados?:	No	●					
¿La precisión dimensional es >= 0,2 mm?	Sí	●					
¿Contiene estructuras ligeras?	No	●					
¿El espesor de la pared >= 0,4mm?	Sí	●					
¿Esta pieza es parte de un ensamblaje?	Sí		●				
¿Esta pieza forma parte de un autoensamblaje?	No	●					
¿Contiene geometrías huecas?	No	●					
¿Las dimensiones son >= 380x284x380 mm?	No	●					
¿Contiene conductos?	No	●					
¿La rugosidad es <= 15 Ra?	No	●					
¿Contiene superficies curvas o texturizados?	Sí	●					
¿Soporta la presión de operación?	Sí	●					
¿Soporta las altas temperaturas?	Sí	●					
¿Soporta el estrés mecánico?	Sí	●					
¿Tiene resistencia química?	Sí	●					

- 1 - Directo de máquina
- 2 - Modificación de diseño requerida
- 3 - Modificación del proceso requerida
- 4 - Postratamiento requerido
- 5 - Comprobación de la compatibilidad de materiales
- 6 - No es posible

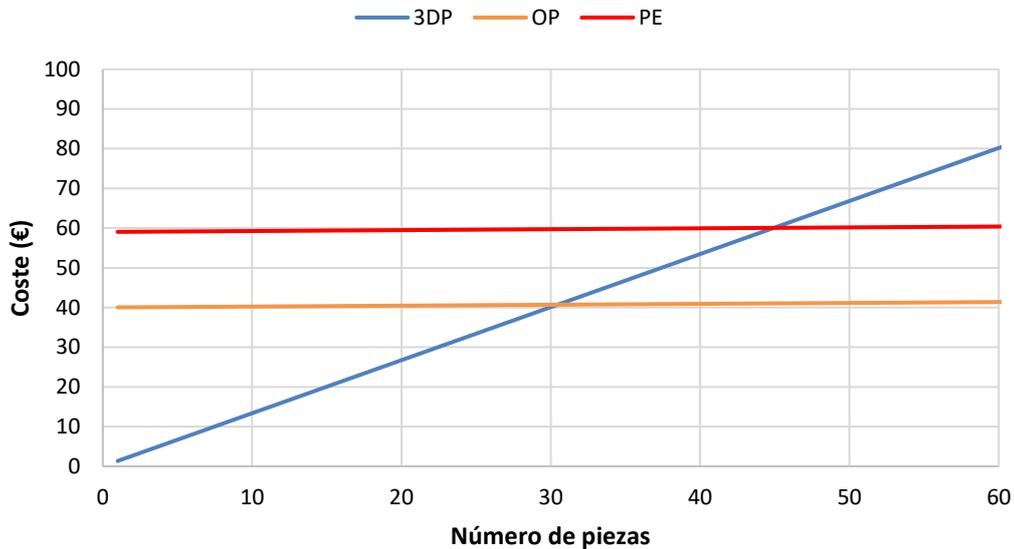
Figura 6.6. Cuadro resumen de las preguntas, respuestas y las conclusiones del caso de estudio 2.
Fuente: Propia.

Para este caso en concreto el resultado o salida de la metodología de diseño y fabricación coincide con el conocimiento experto. Seguidamente se ha validado el buen funcionamiento en campo de la pieza. Para ello, se ha desmontado la pieza original del robot y se ha instalado la pieza fabricada mediante MJF, tal como se muestran en la Figura 6.7.



Figura 6.7. Montaje y desmontaje del robot de piscina. Fuente: Propia.

Se han realizado las pruebas de calidad pertinentes en cuanto a funcionalidad y control dimensional del rodete obteniendo unos resultados satisfactorios. En la Figura 6.8 se muestran los resultados obtenidos del sistema de soporte a la decisión y las variables de entrada.



Tecnología	Demanda	Lote mínimo	Peso	Ratio de producción
MJF	5 unidades	-	0,01 kg	15 piezas/hora
Inyección	150 unidades	150 unidades	0,01 kg	200 piezas/hora

Figura 6.8. Resultados del análisis económico para el caso 2. Fuente: Propia.

En el caso optimista se podrían fabricar hasta 30 unidades para igualar los costes de las dos tecnologías. Y en el caso pesimista se podrían fabricar hasta 45 unidades. Seguidamente se ha realizado la comparativa de costes asociados, en la Tabla 6.5 se muestra el desglose de costes asociados para cada una de las tecnologías.

Tabla 6.5. Desglose de costes para la tapa. Fuente: Propia.

Tecnología	C _{Fijos}	C _{Variables}	C _{Total}	Ahorro
MJF	-	1,33	6,68	-
IM (optimista)	40,00	0,02	43,42	85%
IM (pesimista)	59,02	0,02	62,44	89%

En la Tabla 6.6 se han determinado los tiempos de entrega de la compuerta para cada tecnología.

Tabla 6.6. Tiempos de entrega medio de la tapa en base 100. Fuente: Propia.

Tecnología	Tiempo de entrega medio*	Ahorro
MJF	100	-
IM	1179	92%

*Por confidencialidad de datos no se pueden mostrar las unidades de tiempo reales.

6.4 Caso de estudio 3: Hélice

El siguiente caso de estudio es la hélice de un robot de piscina. Se trata de una pieza fabricada en PA con fibra de vidrio. La funcionalidad que realiza dicha pieza es la de crear un flujo de agua, desde la parte de succión situada en la parte inferior del robot hasta la parte superior del robot. El principal objetivo de la hélice es conducir el agua sucia hacia el filtro para su limpieza. Además, en algunas gamas de robots de piscina y en este modelo en concreto, la hélice genera una fuerza de succión que permite que el robot pueda subir paredes para así poder limpiarlas. Por ello, esta referencia no es un elemento decorativo, sino que afecta directamente al funcionamiento del equipo. Se trata de un elemento clasificado como MTO, ya que no es usual las rupturas de este tipo de hélices a no ser que sea por impacto. En la Figura 6.9 se muestran algunas imágenes del conjunto y de la hélice.



Figura 6.9. (a) Robot de piscina (b) Hélice. Fuente: Propia.

La hélice presentada es una pieza plástica cuyo ensamblaje se realiza mediante un sistema de encaje chaveta y posteriormente atornillada contra el eje del motor eléctrico. Es muy importante conservar la rugosidad superficial de los álabes, ya que puede afectar en el rendimiento y la precisión dimensional tiene que ser suficiente para el correcto montaje. En la Tabla 6.7 se muestra la matriz de conocimiento marcado con una “X” los conocimientos utilizados para el presente caso.

Tabla 6.7. Matriz de los puntos de conocimientos utilizados. Fuente: Propia.

Puntos de conocimientos	
X	Chorreado
	Pintado
	Infiltrado de color
	Otros acabados
	Engarces o clips
X	Roscas y atornillados
	Insertos metálicos
	Soldaduras
	Adhesivos
	Nervios
	Bisagras integrales
	Diámetro mínimo de agujero
	Rendijas
	Grabados
X	Precisión dimensional
	Estructuras ligeras
X	Espesor mínimo de pared
X	Tolerancias de ensamblaje
	Autoensamblajes
	Geometrías huecas
X	Dimensiones máximas de fabricación
	Impresión de conductos
X	Rugosidad superficial
X	Texturizados y superficies curvas
	Esfuerzos de presión
X	Resistencia a la temperatura
X	Esfuerzos mecánicos
X	Resistencia química

Se han obtenido los siguientes resultados de la metodología de diseño y fabricación:

1. Conclusión: Cambio en el proceso y el diseño. Postratamiento requerido.
2. Sugerencias de diseño y fabricación:
 - Bloque 1: No es necesario realizar ningún tipo de pintado o infiltrado de color. Después de la fabricación del lote es requerido realizar una limpieza de las piezas mediante un chorreado para eliminar el material sobrante.
 - Bloque 2: Mediante MJF es posible imprimir roscas dependiendo de sus características. Las roscas gruesas (más grandes que M8) pueden imprimirse directamente. Para las roscas finas es necesario realizar un cambio en el diseño, realizando un agujero siguiendo el tamaño que marca la ISO 965-2. Dependiendo la aplicación final, es posible realizar una modificación para adaptar el diseño a tornillos autorroscantes, tuercas de fijación rápida, tornillos y tuercas métricas.

- Bloque 3: Es necesario realizar un mecanizado posteriormente a la fabricación de la pieza en las partes donde la precisión dimensional de la máquina no sea suficiente.

En general, el espesor mínimo de pared recomendado es de 0,3 mm para pequeñas paredes orientadas en el plano XY y 0,4mm para paredes cortas orientadas en el plano Z.

La rugosidad de las caras expuestas en el plano XY o paralelas es de 12-14 um Ra. Mientras que el resto de las caras tienen una rugosidad de 8 um Ra. Para conseguir rugosidades menores existen diferentes métodos: mecánicos y químicos. Mediante vibradoras con abrasivos (plásticos o cerámicos) se puede alcanzar hasta 1,5 um Ra, aunque éstos pueden ser agresivos con detalles de diseño, ya que los puede romper. Con ataques químicos se puede alcanzar fácilmente 1 um Ra e incluso 0,1 um Ra en los mejores casos, similar a la inyección. Este último proceso puede impactar sobre las propiedades dimensionales y mecánicas de la pieza.

El efecto escalón es un fenómeno que aparece en muchas tecnologías de fabricación aditiva por el mero hecho de construir partes capa a capa. Para poder evitar dicho efecto en las superficies inclinadas o curvas, se recomienda evitar siempre que sea posible posicionar la pieza con ángulos menores de 30° en el plano horizontal (XY). Para conseguir superficies lo más suavizadas posibles se recomienda posicionar la parte crítica cara abajo y cuando se trata superficies texturizadas con ángulos agudos se recomienda enfocarlos cara arriba.

- Bloque 4: No hay sugerencias de funcionalidad.

En la Figura 6.10 se presenta el cuadro resumen de las preguntas, respuestas y las conclusiones.

Pregunta	Respuesta	1	2	3	4	5	6
¿Color, aspecto superficial e importancia de la pieza?	No	●					
¿La pieza contiene clipajes?	No	●					
¿La pieza contiene roscas?	Sí		●				
¿La pieza contempla insertos metálicos?	No	●					
¿La pieza esta soldada con otra?	No	●					
¿La pieza esta adhesivada con otra?	No	●					
¿La pieza tiene nervios?	No	●					
¿La pieza contiene bisagras integrales?	No	●					
¿Los diámetros de los agujeros < 0,5 mm?	No	●					
¿El ancho de las rendijas < 0,5 mm?	No	●					
¿Contiene grabados?:	No	●					
¿La precisión dimensional es >= 0,2 mm?	Sí		●				
¿Contiene estructuras ligeras?	No	●					
¿El espesor de la pared >= 0,4mm?	Sí	●					
¿Esta pieza es parte de un ensamblaje?	Sí	●					
¿Esta pieza forma parte de un autoensamblaje?	No	●					
¿Contiene geometrías huecas?	No	●					
¿Las dimensiones son >= 380x284x380 mm?	No	●					
¿Contiene conductos?	No	●					
¿La rugosidad es <= 15 Ra?	Sí				●		
¿Contiene superficies curvas o texturizados?	Sí			●			
¿Soporta la presión de operación?	Sí	●					
¿Soporta las altas temperaturas?	Sí	●					
¿Soporta el estrés mecánico?	Sí	●					
¿Tiene resistencia química?	Sí	●					

1 - Directo de máquina

2 - Modificación de diseño requerida

3 - Modificación del proceso requerida

4 - Postratamiento requerido

5 - Comprobación de la compatibilidad de materiales

6 - No es posible

Figura 6.10. Cuadro resumen de las preguntas, respuestas y las conclusiones del caso de estudio 3.
Fuente: Propia.

Para este caso en concreto el resultado o salida de la metodología de diseño y fabricación coincide con el veredicto del autor o experto. Seguidamente se ha validado el buen funcionamiento en campo de la pieza. Para ello, se ha desmontado la pieza original del robot y se ha instalado la pieza fabricada mediante MJF, tal como se muestran en la Figura 6.11.

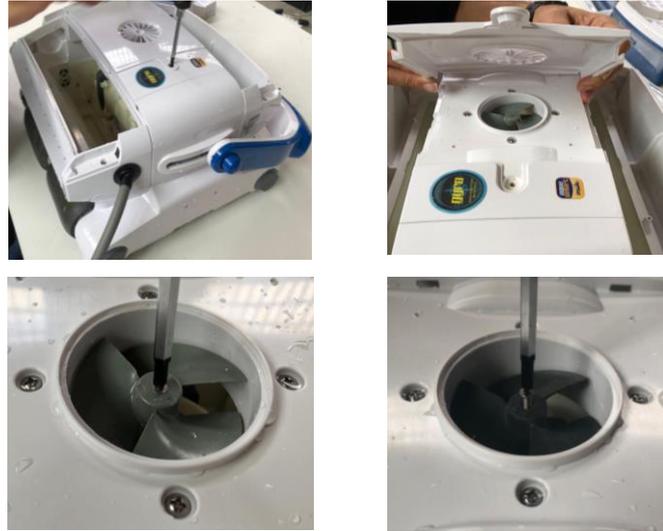
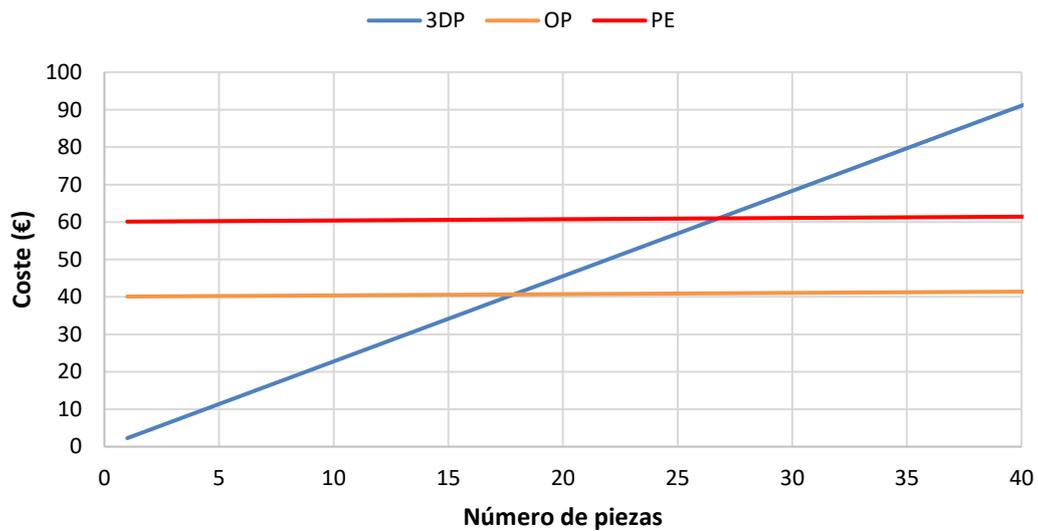


Figura 6.11. Montaje y desmontaje del robot de piscina. Fuente: Propia.

Se puede afirmar, que después de realizar los ensayos de funcionalidad y el control dimensional, se han observado resultados satisfactorios. En la Figura 6.12 se muestran los resultados obtenidos del sistema de soporte a la decisión y las variables de entrada.



Tecnología	Demanda	Lote mínimo	Peso	Ratio de producción
MJF	3 unidades	-	0,02 kg	25 piezas/hora
Inyección	150 unidades	150 unidades		150 piezas/hora

Figura 6.12. Resultados del análisis económico para el caso 3. Fuente: Propia.

En el caso optimista se podrían fabricar hasta 18 unidades para igualar los costes de las dos tecnologías. Y en el caso pesimista se podrían fabricar hasta 27 unidades. Seguidamente se ha realizado la comparativa de costes asociados, en la Tabla 6.8 se muestra el desglose de costes asociados para cada una de las tecnologías.

Tabla 6.8. Desglose de costes para la hélice. Fuente: Propia.

Tecnología	C_{Fijos}	C_{Variables}	C_{Total}	Ahorro
MJF	-	2,27	6,83	-
IM (optimista)	40,01	0,03	45,12	85%
IM (pesimista)	60,01	0,03	65,14	90%

En la Tabla 6.9 se han determinado los tiempos de entrega de la compuerta para cada tecnología.

Tabla 6.9. Tiempos de entrega medio de hélice en base 100. Fuente: Propia.

Tecnología	Tiempo de entrega medio*	Ahorro
MJF	100	-
IM	1179	92%

*Por confidencialidad de datos no se pueden mostrar las unidades de coste reales

6.5 Caso de estudio 4: Placa de cojinetes

El siguiente caso de estudio es una placa de cojinetes para un robot de piscina. Se trata de una pieza fabricada en PA con fibra de vidrio. Dicha placa tiene como objetivo el posicionamiento de los engranajes para el sistema de tracción por correa y motor. Asimismo, también permite posicionar los cojinetes donde posteriormente se instala la correa de tracción. Estos cojinetes sirven de guía para la correa y no permite que ésta no pueda extraerse del carril. Se trata también de una pieza crítica para el funcionamiento del robot y al ser una pieza interna no suele romperse. En la Figura 6.13, se muestran algunas imágenes del conjunto y la placa de cojinetes.



Figura 6.13. (a) Robot de piscina (b) Placa de cojinetes. Fuente: Propia.

La placa de cojinetes presentada es una pieza plástica cuyo ensamblaje se realiza mediante un sistema de tornillos autorroscantes contra otra pieza plástica. Es importante conservar la precisión dimensional para que sea suficiente para el correcto montaje. En la Tabla 6.10 se muestra la matriz de conocimiento marcado con una “X” los conocimientos utilizados para el presente caso.

Tabla 6.10. Matriz de los puntos de conocimientos utilizados. Fuente: Propia.

Puntos de conocimientos	
X	Chorreado
	Pintado
	Infiltrado de color
	Otros acabados
	Engarces o clips
X	Roscas y atornillados
	Insertos metálicos
	Soldaduras
	Adhesivos
	Nervios
	Bisagras integrales
	Diámetro mínimo de agujero
	Rendijas
	Grabados
X	Precisión dimensional
	Estructuras ligeras
X	Espesor mínimo de pared
X	Tolerancias de ensamblaje
	Autoensamblajes
	Geometrías huecas
X	Dimensiones máximas de fabricación
	Impresión de conductos
X	Rugosidad superficial
X	Texturizados y superficies curvas
X	Resistencia a la temperatura
	Esfuerzos de presión
X	Esfuerzos mecánicos
X	Resistencia química

Se han obtenido los siguientes resultados de la metodología de diseño y fabricación:

1. Conclusión: Modificación en el diseño
2. Sugerencias de diseño y fabricación:
 - Bloque 1: No es necesario realizar ningún tipo de pintado o infiltrado de color. Después de la fabricación del lote es requerido realizar una limpieza de las piezas mediante un chorreado para eliminar el material sobrante.
 - Bloque 2: No hay sugerencias de funcionalidad.
 - Bloque 3: MJF alcanza precisiones de $\pm 0,2\text{mm}$ hasta 100mm , por encima de dicho valor se considera $\pm 0,2\%$. Para conseguir buenos resultados de precisión dimensional se recomienda orientar las partes críticas en el plano XY. Los cuerpos cilíndricos se deben orientar de forma vertical siempre que sea posible. En general, el espesor mínimo de pared recomendado es de $0,3\text{mm}$ para pequeñas paredes orientadas en el plano XY y $0,4\text{mm}$ para paredes cortas orientadas en el plano Z. Para

que dos partes impresas puedan ensamblarse de forma correcta se recomienda dejar distancias entre las superficies de contacto de 0,4mm, ya que las tolerancias de fabricación son de $\pm 0,2\%$.

- Bloque 4: No hay sugerencias de funcionalidad.

En la Figura 6.14 se presenta el cuadro resumen de las preguntas, respuestas y las conclusiones.

Pregunta	Respuesta	1	2	3	4	5	6
¿Color, aspecto superficial e importancia de la pieza?	No	●					
¿La pieza contiene clipajes?	No	●					
¿La pieza contiene roscas?	No	●					
¿La pieza contempla insertos metálicos?	No	●					
¿La pieza esta soldada con otra?	No	●					
¿La pieza esta adhesivada con otra?	No	●					
¿La pieza tiene nervios?	No	●					
¿La pieza contiene bisagras integrales?	No	●					
¿Los diámetros de los agujeros < 0,5 mm?	No	●					
¿El ancho de las rendijas < 0,5 mm?	No	●					
¿Contiene grabados?:	No	●					
¿La precisión dimensional es $\geq 0,2$ mm?	No	●					
¿Contiene estructuras ligeras?	No	●					
¿El espesor de la pared $\geq 0,4$ mm?	Sí	●					
¿Esta pieza es parte de un ensamblaje?	Sí		●				
¿Esta pieza forma parte de un autoensamblaje?	No	●					
¿Contiene geometrías huecas?	No	●					
¿Las dimensiones son $\geq 380 \times 284 \times 380$ mm?	No	●					
¿Contiene conductos?	No	●					
¿La rugosidad es ≤ 15 Ra?	No	●					
¿Contiene superficies curvas o texturizados?	Sí	●					
¿Soporta la presión de operación?	Sí	●					
¿Soporta las altas temperaturas?	Sí	●					
¿Soporta el estrés mecánico?	Sí	●					
¿Tiene resistencia química?	Sí	●					

1 - Directo de máquina

2 - Modificación de diseño requerida

3 - Modificación del proceso requerida

4 - Postratamiento requerido

5 - Comprobación de la compatibilidad de materiales

6 - No es posible

Figura 6.14. Cuadro resumen de las preguntas, respuestas y las conclusiones del caso de estudio 4. Fuente: Propia.

Para este caso en concreto el resultado o salida de la metodología de diseño y fabricación coincide también con conocimiento del autor. Seguidamente se ha validado el buen funcionamiento en campo de la pieza. Para ello, se ha desmontado la pieza

original del robot y se ha instalado la pieza fabricada mediante MJF, tal como se muestran en la Figura 6.15.

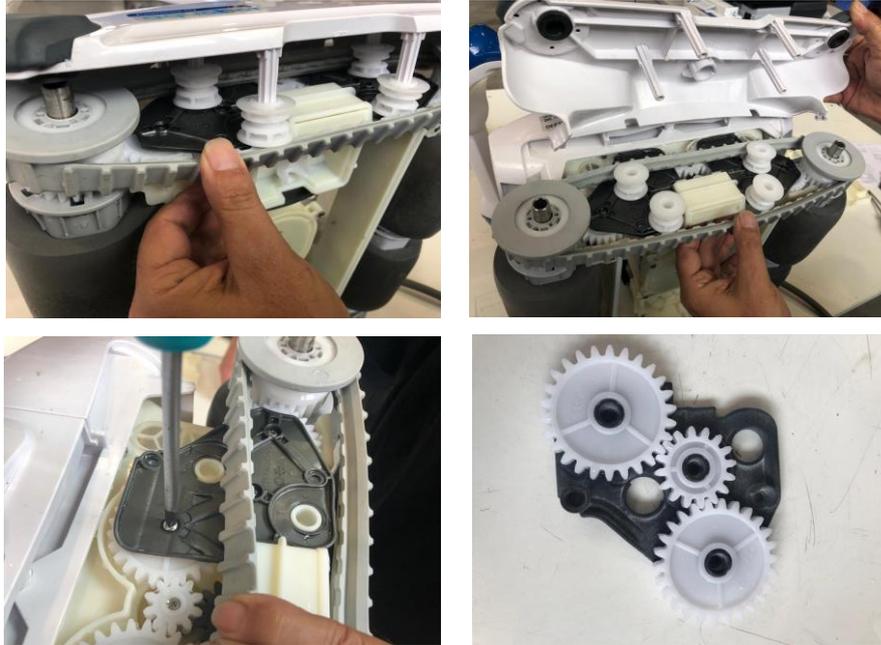
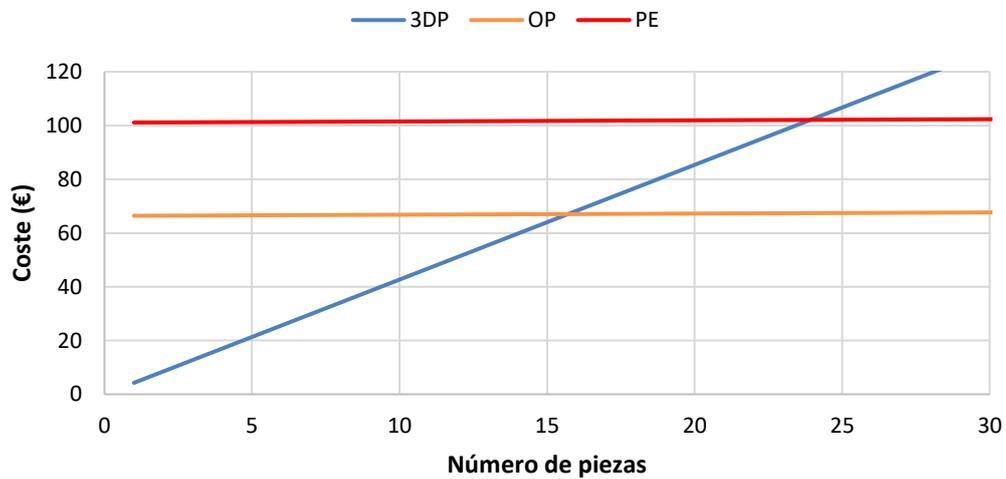


Figura 6.15. Montaje y desmontaje del robot de piscina. Fuente: Propia.

En la Figura 6.16 se muestran los resultados obtenidos del sistema de soporte a la decisión y las variables de entrada.



Tecnología	Demanda	Lote mínimo	Peso	Ratio de producción
MJF				
Inyección	10 unidades	300 unidades	0,05 kg	200 piezas/hora

Figura 6.16. Resultados del análisis económico para el caso 4. Fuente: Propia.

En el caso optimista se podrían fabricar hasta 16 unidades para igualar los costes de las dos tecnologías. Y en el caso pesimista se podrían fabricar hasta 24 unidades. Seguidamente se ha realizado la comparativa de costes asociados, en la Tabla 6.11 se muestra el desglose de costes asociados para cada una de las tecnologías.

Tabla 6.11. Desglose de costes para la placa. Fuente: Propia.

Tecnología	C_{Fijos}	C_{Variables}	C_{Total}	Ahorro
MJF	-	4,27	42,68	-
IM (optimista)	66,38	0,04	79,21	46%
IM (pesimista)	101,08	0,04	113,91	63%

En la Tabla 6.12 se han determinado los tiempos de entrega de la compuerta para cada tecnología.

Tabla 6.12. Tiempos de entrega medio de la placa en base 100. Fuente: Propia.

Tecnología	Tiempo de entrega medio*	Ahorro
MJF	100	-
IM	1179	92%

*Por confidencialidad de datos no se pueden mostrar las unidades de tiempo reales.

7 Discusión de los resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos de la metodología propuesta y los casos de estudio que la han validado. Además, se expone el procedimiento de implantación de la tecnología de fabricación aditiva, concretamente MJF, en la organización. Por último, se recopila las diferentes barreras y retos tecnológicos que se han identificado para integrar las tecnologías de fabricación aditivas en los procesos de producción.

7.1 Resultados de la metodología

En el siguiente apartado se discuten los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología de diseño y fabricación a los casos de estudio. Posteriormente a la ejecución de la metodología de diseño y fabricación se han obtenido los siguientes resultados:

- El sistema de soporte a la decisión propuesto ha solucionado los casos de validación de una forma rápida. Se obtiene el informe con las sugerencias de diseño y fabricación, juntamente con las conclusiones, en menos de diez segundos.
- En todos los casos de estudio tanto las conclusiones como las sugerencias de diseño y fabricación han coincidido con el conocimiento del experto.
- Se han validado la funcionalidad y la calidad dimensional de cada uno de los casos de estudio siendo todos ellos satisfactorios para su montaje.
- Se ha realizado una comparativa de los costes asociados de cada caso de estudio para tres escenarios diferentes. Existen algunos costes que no se han tenido en cuenta como es el coste oportunidad de liberar una máquina y un operario. En la Figura 7.1 se grafica el porcentaje de ahorro de coste total de suministro convencional respecto el nuevo modelo de suministro.

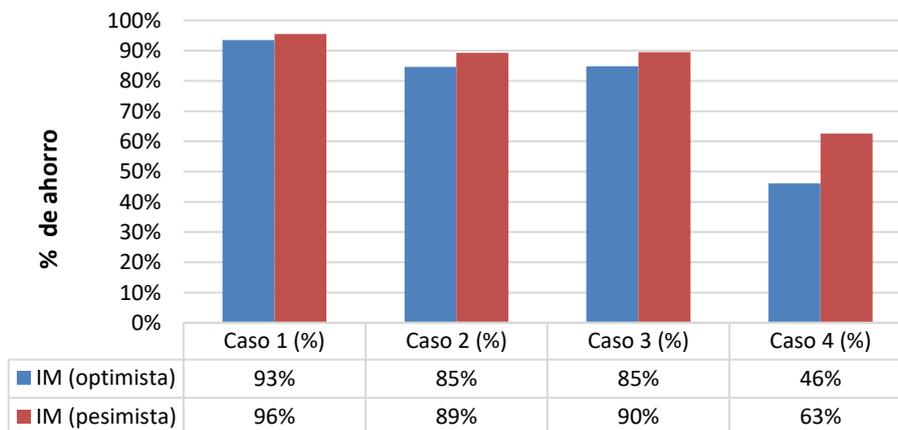


Figura 7.1. Ahorro de los costes de suministros respecto el nuevo modelo. Fuente: Propia.

La estimación realizada contempla que los costes asociados al suministro son menores siempre para la fabricación aditiva.

- Partiendo de los tiempos medios de entrega de las referencias de cada centro productivo se ha realizado una estimación de la diferencia de tiempos entre los dos modelos de suministro. En todos los casos el nuevo modelo de suministro es mejor en términos de tiempos de entrega. Esto se debe a que la fabricación esta centralizada en el centro logístico y el tiempo de fabricación medio ronda de una cubeta es de nueve horas. En la Figura 7.2 se grafican el porcentaje de ahorro de tiempo respecto las tecnologías convencionales.

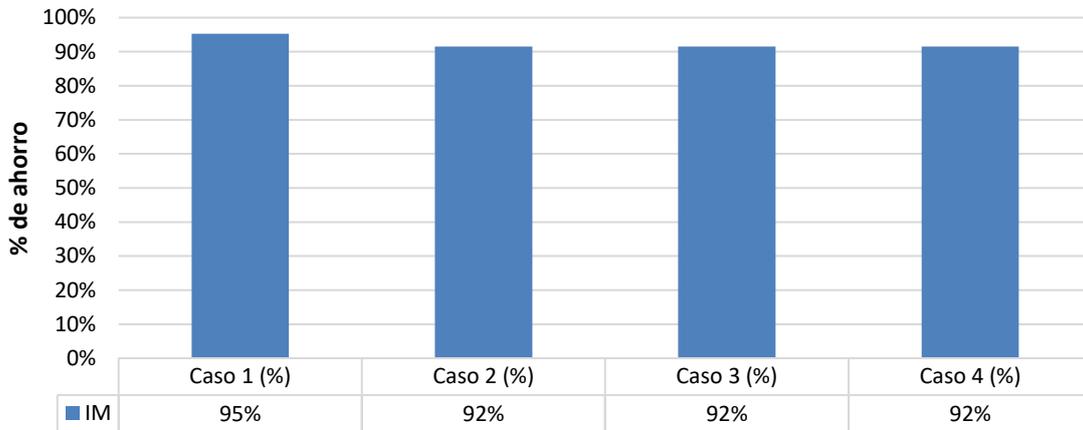


Figura 7.2. Ahorro de los tiempos de entrega para los dos modelos de suministro. Fuente: Propia.

- Tal como se ha comentado anteriormente, según estudios internos de la cadena de suministro de la organización el coste de transporte supone entre 2%-5% sobre el valor del inventario dependiendo de la unidad de producción. Y los costes de gestión y stock un 26% sobre el valor del inventario. Además, en el caso más pesimista, si la pieza permanece en inventario más de un año, el coste asociado a la depreciación económica es de un 6% del valor del inventario y el riesgo de obsolescencia es de un 11% sobre el valor de la pieza. Suponiendo que todas las referencias “Plástico” se pudieran fabricar mediante MJF y PA12 el ahorro anual evitando los costes asociados al transporte, el inventario, la depreciación y el riesgo de obsolescencia seria de un 43% del valor del inventario sin contar el ahorro asociado a la fabricación a demanda que depende de los valores de demanda, ratio de producción y el lote óptimo de cada referencia.

7.2 Procedimiento para la implantación

En este apartado se pretende explicar de forma detallada el procedimiento de implantación e integración de la tecnología MJF en el entramado productivo del grupo de empresas de Fluidra. En primer lugar, se ha realizado una prospección de futuro de los centros productivos con la transformación digital. Para la organización la transformación digital no es introducir una tecnología de fabricación aditiva e integrarlo en el proceso productivo, sino:

- Convertir el almacén físico en un almacén digital, donde los modelos tridimensionales estén en una especie de nube informática sin que ocupe espacio físico.
- Llevar la fabricación desde la productiva estándar hasta la casa del cliente, evitando así la logística. De esta manera, se pretende hacer más flexible la fabricación de recambios.

Esta prospección da lugar al avance en muchas materias relacionadas con la fabricación aditiva. Por ello, antes de fabricar en casa del cliente, siendo un objetivo difícilmente alcanzable, se quiere centralizar la producción en el centro logístico, tal como se muestra en la Figura 7.3.

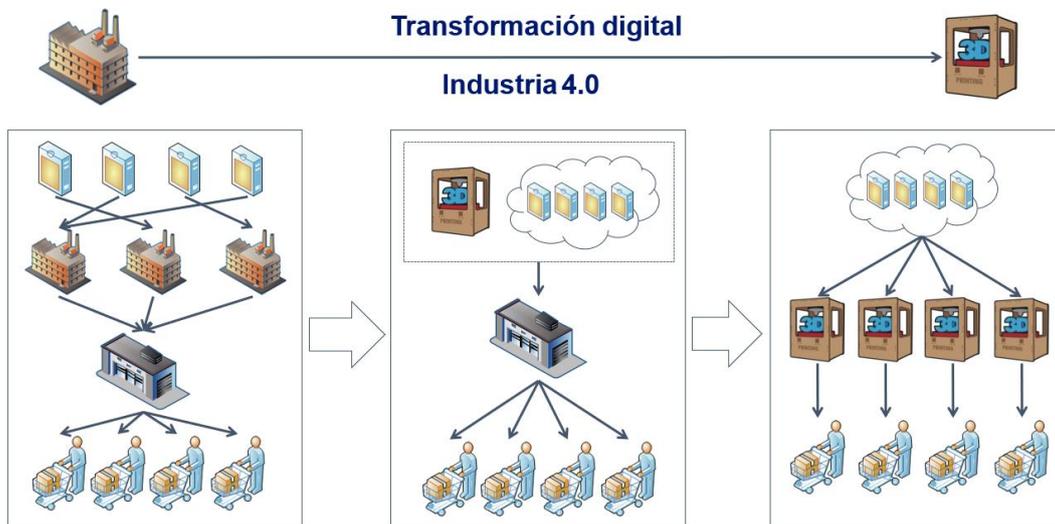


Figura 7.3. Prospección de la fábrica de futuro. Fuente: Propia.

Sin embargo, centralizar la producción en el almacén central no es un problema trivial. Por ello, se ha tenido que realizar una metodología que permite superar una serie de barreras, como son las referencias susceptibles de ser producidas mediante tecnologías de fabricación aditiva, el rediseño de dichas piezas, las limitaciones de fabricación y los materiales disponibles, tal como se muestra en la Figura 7.4.

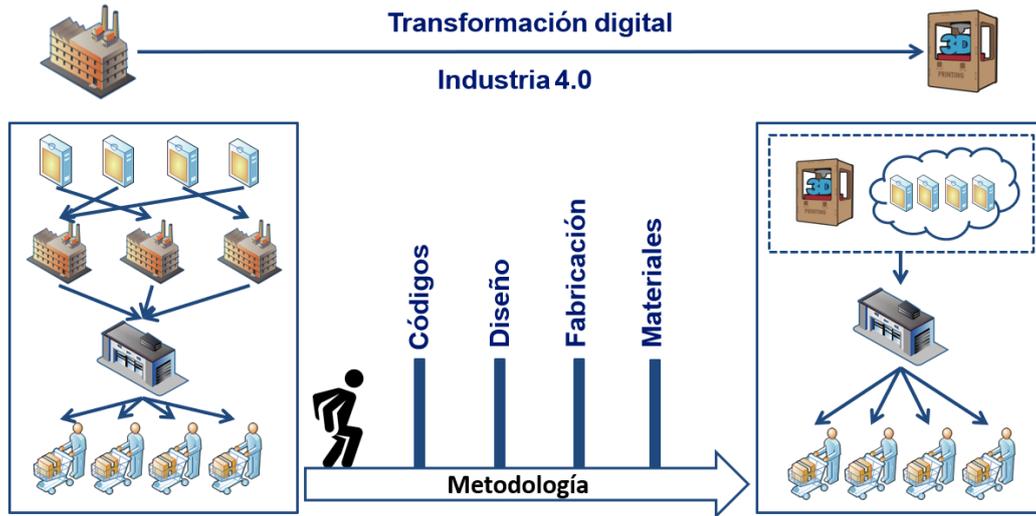


Figura 7.4. Metodología para transformar digitalmente la organización. Fuente: Propia.

Seguidamente se ha realizado un procedimiento para la integración de la fabricación aditiva en la organización, más concretamente la solución MJF. Con el objetivo de integrar esta tecnología primero se debe definir un flujo de trabajo comunicativo para comprender cuales son los pasos para seguir a partir de dicha integración. En la Figura 7.5 se representa el flujo de trabajo en términos de operaciones.

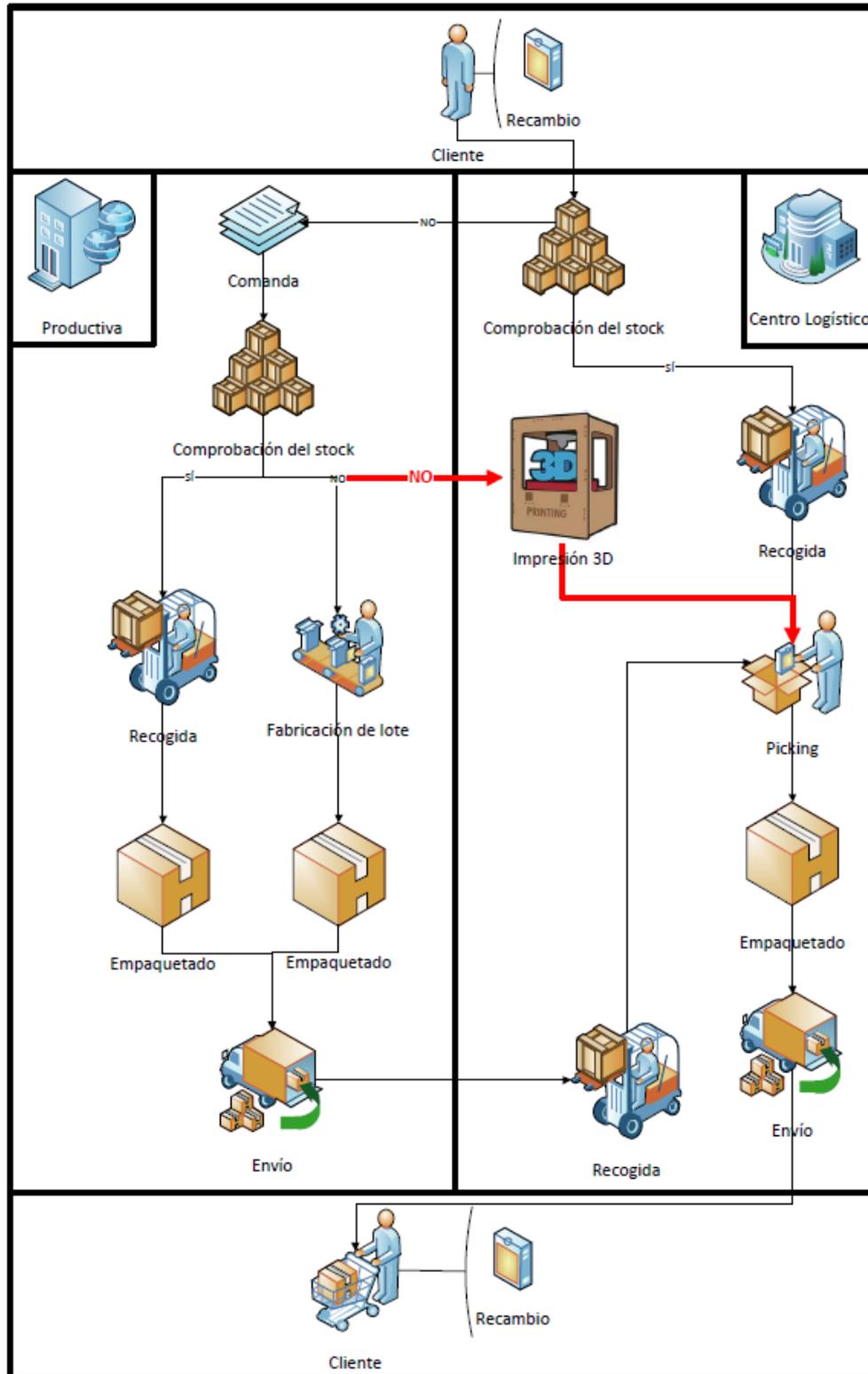


Figura 7.5. Propuesta del flujo de trabajo para el suministro de recambios. Fuente: Propia.

Una vez recibido el encargo de la referencia por parte de un cliente, se debe comprobar si existe en inventario en el mismo centro logístico. En caso negativo, se tiene que enviar la comanda al centro productivo correspondiente y comprobar la existencia o no de dicha referencia. En el supuesto que no exista en stock y la referencia esté validada

técnicamente para ser impresa mediante MJF, se procederá a su impresión tridimensional. Como se ha comentado anteriormente, es imprescindible comprobar el inventario en ambos centros, ya que el objetivo es optimizar los costes. Si se fabrican por partida doble la referencia, los costes asociados se incrementan. Por ello, cuando la referencia existe en el inventario de cualquiera de los centros, se sigue el flujo de trabajo habitual. La premisa que se desea conseguir es consumir todo el stock que exista antes de decantar la opción de imprimir aditivamente, siempre y cuando dicha referencia sea apta para ser impresa. Con la nueva propuesta de suministro de recambios, se pretende evitar el stock acumulado y el riesgo de obsolescencia, además, de conseguir reducir el tiempo de entrega al cliente y en algunos casos optimizar los costes.

7.3 Identificación de los principales retos y barreras

Posteriormente a la realización del trabajo se han detectado una serie de retos y barreras que la fabricación aditiva debe superar para poder abarcar más nichos de mercado e integrar, de forma más amplia, las tecnologías aditivas con los procesos convencionales en los centros productivos de las organizaciones. Los principales retos y barreras de la fabricación aditiva identificados durante la etapa de rediseño y fabricación de los casos de estudio se enumeran a continuación:

- **Dimensiones de impresión:** el espacio de impresión está limitado y depende de la tecnología de fabricación aditiva y de la máquina en cuestión. Existen muchas referencias cuyo volumen es mayor que el volumen de impresión, siendo obligado aplicar un adhesivo para unir diferentes piezas. El volumen de impresión de la MJF está en torno a los 31 dm³. Según los estudios realizados anteriormente más de un 11% de las piezas superan el volumen de fabricación de la máquina.
- **Repetitividad dimensional:** es necesario alcanzar la repetitividad dimensional de las piezas impresas, por ello, es requerido tener un control de calidad en el proceso para asegurar que la pieza se está imprimiendo adecuadamente. De esta manera los resultados, obtenidos mediante los mismos parámetros de fabricación, serán iguales en cualquier lugar donde se imprima. Por el momento, la máquina no puede asegurar la calidad en la impresión.
- **Postproceso:** es necesario encontrar una forma para reducir el uso de postprocesos: coloreado, granallado, etc. Ya que el coste industrial aumenta además de incrementar el tiempo por pieza, convirtiéndose en un proceso semiautomático y poco productivo. Los colores en las piezas es una característica principal que la fabricación aditiva no es capaz de dar solución de

forma directa, por ello, es necesario obtener una tecnología donde el brillo y el color se pueda integrar en un solo paso. Más del 70% de las piezas de la lista de referencias preferentes necesitan algún tipo de postproceso o coloreado.

- **Materiales:** el abanico de materiales debe aumentar para alcanzar otros nichos de mercado, siendo necesarios la introducción de plásticos elastómeros para la fabricación de juntas de estanqueidad, termoplásticos transparentes con buenas propiedades mecánicas y plásticos conductores del calor y la electricidad. Además, es requerido llegar a una economía de escala para poder rebajar el coste de los materiales. En el anexo D se ha realizado un estudio de costes entre la fabricación convencional y la fabricación aditiva de una pieza en concreto. Se ha visto que el coste de material corresponde en fabricación aditiva al 80% de coste total y la diferencia de costes para el mismo material en inyección e impresión 3D varía un 96%. Por ello, el coste de los materiales es uno de los principales retos que hay que solventar.
- **Propiedades de estanqueidad:** la naturaleza de la fabricación aditiva no permite, en muchas tecnologías, generar piezas con propiedades de estanqueidad. En inyección hay un proceso de compresión del material que hace que el aire salga de la estructura no permitiendo la generación de poros. En fabricación aditiva no todas las tecnologías son aptas para la fabricación de piezas estancas por la generación de porosidad. Más del 40% de las referencias de la lista obtenida requieren propiedades de estanqueidad, ya que son elementos a presión.
- **Propiedades isotropas:** la estrategia de fabricación, en muchas de las tecnologías de fabricación aditiva, no permite la producción de piezas totalmente isotropas, sino ortótropas. Este hecho es una restricción a la hora de orientar la pieza en la plataforma de impresión, pudiendo ser incluso una limitación en la funcionalidad de la pieza.
- **Diseño asistido por ordenador:** los sistemas de diseño asistido por ordenador están pensados para el diseño de piezas que posteriormente se fabricarán mediante tecnologías convencionales. Sin embargo, el diseño de piezas que se realizarán mediante fabricación aditiva requiere de sistemas de diseño asistido adaptados a las peculiaridades de dichas tecnologías.

8 Conclusiones

En este apartado se exponen las conclusiones referentes a cada uno de los objetivos transversales y específicos planteados en la presente tesis. A continuación, se explican de forma detallada cada una de las conclusiones obtenidas. En primer lugar, se muestran las conclusiones generales de la tesis y seguidamente las conclusiones específicas.

- Se ha creado una nueva metodología DSS que se diferencia de las aportaciones anteriores de la bibliografía por los siguientes aspectos:
 - Ayuda en la toma de decisiones sobre la transformación digital de la producción en el ámbito de los recambios.
 - Genera sugerencias de diseño, fabricación y postprocesos.
 - Analiza la factibilidad técnica y económica de dicha transformación digital.
 - Utiliza MJF y PA12 como tecnología y material respectivamente.
 - Es entendible para usuarios inexpertos en la materia.
- Se han implementado los conocimientos adquiridos y las reglas de DfAM de MJF en un sistema experto basado en reglas si-entonces. Para ello, se han utilizado siete casos de exploración cuyas características y resultados eran conocidos. Después de un análisis de 100 artículos aleatorios de la lista de referencias preferentes, que corresponde a un 5% sobre toda la muestra, se ha observado que el 88% de las éstas están representadas por el modelo. Del 12% de referencias que están fuera del marco de conocimiento, se han identificado las características diferenciadoras.
- La metodología se ha validado mediante cuatro casos de estudio cuyos resultados coinciden con el criterio del experto.
- Dicho sistema se ha implementado en una herramienta informática conectada a internet para el fácil acceso de usuarios con una experiencia limitada. Como salida se genera el informe con la información necesaria para la toma de decisiones en unos diez segundos.
- Se han identificado las siguientes barreras de integración de la tecnología MJF en el grupo Fluidra y empresas similares:
 - El precio del material, que corresponde a un 80% sobre el coste total del producto, es un 96% más económico para los materiales utilizados en inyección respecto los mismo en FA.

- La no integración de los postprocesos actuales en el momento de consolidación del material, ya que más del 70% de las piezas necesitan un postproceso de coloreado u otros.
- La limitación en el volumen de impresión, ya que el máximo volumen de fabricación de la tecnología MJF es de 31 dm³ si bien, más de un 11% de las piezas superan dicho volumen.

Las conclusiones específicas de la tesis se muestran a continuación.

- Se han identificado 1847 referencias que corresponden a un 13,8% de la facturación total que son susceptibles de ser impresas mediante MJF y PA12. Dichas referencias provienen de filtrar las 8403 referencias iniciales por: plásticos (19% del total), MTO (95% de las referencias “plástico”) y las referencias por debajo de 4 dm³ (75% de las referencias “plástico”).
- Las referencias identificadas se han ordenado y ponderado a partir de tres criterios: el valor añadido en el diseño, la rotación de venta y el tiempo de entrega medio. Las primeras posiciones corresponden a las referencias más susceptibles de ser fabricadas mediante FA y las últimas a las menos susceptibles.
- Se han extrapolado los resultados obtenidos para la organización para conocer el impacto sobre Unistral Recambios y la política de suministro e inventario. Suponiendo que todas las referencias “Plástico” se pudieran fabricar mediante MJF y PA12 el ahorro anual evitando los costes asociados al transporte, el inventario, la depreciación y el riesgo de obsolescencia es del 43% del valor del inventario sin contar el ahorro asociado a la fabricación a demanda que depende de los valores de demanda, ratio de producción y el lote óptimo de cada referencia. En cuanto a la reducción de los tiempos de entrega de las referencias se reduce hasta un 95% en el mejor de los casos.

8.1 Trabajo de futuro

Seguidamente se presentan las diferentes líneas de investigación futura para avanzar en el desarrollo de una metodología de diseño y fabricación más representativa, efectiva y extrapolable a otras compañías similares.

- La presente metodología se basa en el histórico de piezas para proyectos que ya han acabado. Tiene sentido que pudiera adaptarse a futuros proyectos donde se debe tomar la decisión de fabricar mediante tecnologías convencionales o aditivas. Para ello, es necesario realizar una adaptación de los criterios

empleados basados en el pasado y reemplazarlos por criterios basados en estimaciones de futuro.

- Se pretende introducir en la metodología de diseño y fabricación más casos de exploración para aumentar el conocimiento y la representatividad de la muestra. Además, de incorporar en el sistema los conocimientos no contemplados obtenidos del análisis de representatividad como son: metalizados, transparentes tintados, serigrafía y marcado laser.
- Para agilizar el proceso de validación de la metodología se puede agrupar las referencias por familias. Es decir, validar solamente una referencia de una familia y extrapolar los resultados a todas las demás referencias.
- El sistema experto es limitado, ya que fue diseñado para usuarios sin nociones sobre la fabricación aditiva. A medida que los usuarios vayan adquiriendo experiencia en dicho campo de conocimiento, la metodología se debe ir actualizando con más reglas concatenadas e introduciendo variables no binarias, o incluso, un algoritmo de auto aprendizaje.
- Se pretende estudiar la posibilidad de negocio de capitalizar la metodología propuesta mediante la comercialización del programa o la creación de una empresa. Dicha metodología puede dar servicio a las empresas que están pensando en adoptar la tecnología MJF de HP en analizar la viabilidad técnica y económica del proyecto de implantación.

Anexo A: Válvula de diafragma

Una de las peculiaridades más distintivas de la fabricación aditiva es la posibilidad de integrar en una misma impresión diferentes componentes que conforman un producto. Por esta razón, los productos que se forman de muchas piezas pueden ser susceptibles de ser fabricados en un mismo volumen de impresión lo que implica una reducción de costes de utillajes y de ensamblaje. Este apartado pretende mostrar la viabilidad técnica de la fabricación multi-pieza en un producto en concreto, una válvula manual de diafragma que se muestra en la Figura A.1.



Figura A.1. Válvula de diafragma. Fuente: CEPEX S.A.U.

El caso de estudio es una válvula de diafragma para la regulación del caudal en los sistemas de conducción de fluidos. La válvula está disponible en diferentes materiales: PVC-U, CPVC y PP-H y con membranas de EPDM y FPM. La válvula de diafragma regula de forma precisa el caudal de un sistema con un mecanismo sencillo. Consiste en dos puertos por los que debe pasar el líquido y una separación entre ellos formada por una pared vertical y una membrana. La membrana puede subir o bajar de forma muy precisa actuada mediante un volante, así puede desplazarse desde su apertura máxima hasta el cierre de paso del líquido, usando un elevado número de vueltas. Las posiciones se pueden fijar mediante el seguro mecánico. El caudal regulado por la válvula se puede conocer situando en la salida un caudalímetro o rotámetro. Dicha válvula genera una pérdida de presión debido al obstáculo que ofrece la pared vertical que debe cerrar la membrana, situada precisamente en el centro del paso del líquido, tal como se muestra en la Figura A.2.

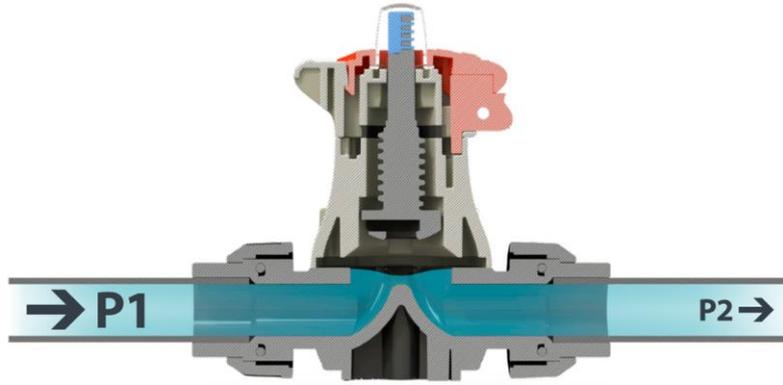


Figura A.2. Esquema de funcionamiento de la válvula de diafragma. Fuente: CEPEX S.A.U.

La válvula está compuesta por 16 componentes sin contar con la tornillería, arandelas, turecas y juntas de estanqueidad, como se ve en la Figura A.3. En la Tabla A.1 se especifican todas las piezas que componen la válvula de membrana.

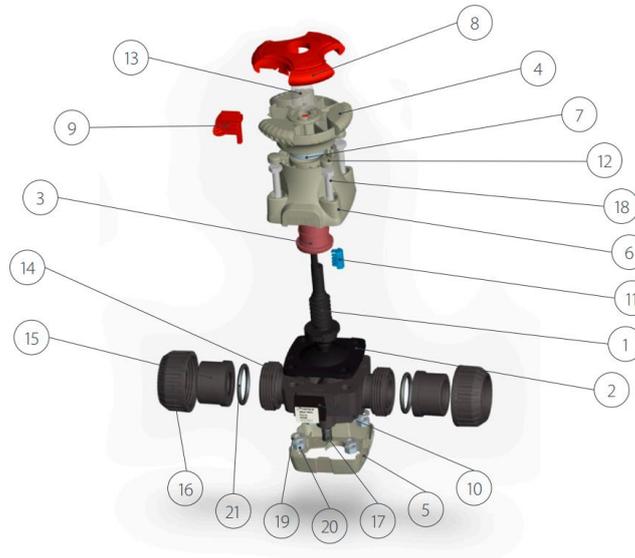


Figura A.3. Despiece de la válvula de diafragma. Fuente: CEPEX S.A.U.

Tabla A.1. Lista del despiece de la válvula de diafragma. Fuente: CEPEX S.A.U.

Número	Descripción	Material
1	Eje	PPO+GF
2	Membrana	EPDM/FPM
3	Guía	POM
4	Volante	PP+GF
5	Tapa inferior	PP
6	Tapa	PP+GF
7	Arandela	POM
8	Tapón superior	PP
9	Seguro	PP+GF
10	Porta-etiqueta	ABS
11	Indicador	PP
12	Tapón tornillo	PP
13	Tapón indicador	PC

14	Cuerpo	PVC-U / CPVC / PP
15	Manguito	PVC-U / CPVC / PP
16	Tuerca	PVC-U / CPVC / PP
17	Inserto	Acero Inoxidable
18	Tornillo DIN 931	Acero Inoxidable
19	Arandela Grower DIN 127	Acero Inoxidable
20	Tuerca DIN 934	Acero Inoxidable
21	Junta de estanqueidad	EPDM/FPM

En la Tabla A.2 se explica paso por paso cual es el procedimiento de ensamblaje del producto que está compuesto por 16 pasos que se especifican a continuación.

Tabla A.2. Descripción paso a paso del ensamblaje de la válvula. Fuente: Propia.

Paso	Descripción	Imagen
1	Engrasar levemente el diámetro interior de la tapa (6).	
2	Montar la guía (3) sobre la tapa (6).	
3	Insertar la arandela (7) en el volante (4).	
4	Clicar el conjunto volante y arandela (4 y 7, respectivamente) a la tapa y la guía (6 y 3, respectivamente).	
5	Montar el seguro (9) al volante (4) y posicionar el tapón del indicador (13).	

6	Clicar el tapón superior (8) al conjunto anterior.	
7	Clicar el indicador (11) al eje (1).	
8	Engrasar ligeramente la rosca del eje.	
9	Roscar a izquierdas el eje del conjunto hasta que las aletas del eje queden posicionadas en las ranuras de la tapa (6).	
10	Engrasar la parte superior de la membrana (2) para facilitar el montaje.	
11	Insertar a presión la membrana (2) en el conjunto.	
12	Roscar mediante el volante el eje con precaución hasta que la junta quede bien posicionada.	

- 13 Introducir la tornillería (18) y clicar los tapones (12) al conjunto.



- 14 Introducir el conjunto en el útil de ensamblaje.



- 15 Insertar y montar los insertos (17) a presión al cuerpo (14) mediante una maza.



- 16 Colocar el porta-etiquetas (10) en la ranura del cuerpo (14).



- 17 Montar el subconjunto del cuerpo sobre el conjunto superior.



- 18 Montar las arandelas metálicas (19) en la parte superior del saliente de los tornillos (18).



- 19 Roscar las tuercas (16) con el par determinado.



- 20 Montar las tapas inferiores (5)



El proceso de ensamblaje está compuesto por 20 pasos totalmente manuales realizados por un operario. Existen diferentes metodologías durante la etapa de diseño de un producto como son DFA y DFM que tienen como objetivo que los productos sean más fáciles de fabricar basándose en las limitaciones de los procesos de manufactura actuales. Sin embargo, a causa de las capacidades que ofrecen las tecnologías de fabricación aditiva, las limitaciones en las que se apoyan dichas metodologías dejan de tener vigencia. El presente caso de estudio tiene como finalidad potenciar las nuevas posibilidades que ofrece las tecnologías avanzadas en la etapa de diseño de productos nuevos o existentes.

La fabricación aditiva se define como la fabricación directa de bienes eliminando los utillajes en el proceso de manufactura [113]. Los procesos basados en la adición de capas son capaces de fabricar elementos en el diseño internos y externos que no sería posible con procesos de fabricación basados en utillajes. Además, el coste asociado a la fabricación no es función de la complejidad del diseño, pero sí en variables como son el volumen y la dirección de impresión [114]. La eliminación de los utillajes en el proceso de fabricación significa un cambio en las metodologías de diseño que se basan en las limitaciones de los utillajes, ya que la única restricción que existe es la creatividad o habilidad por parte del diseñador. La llegada de la fabricación aditiva ha generado nuevos desarrollos metodológicos basados en nuevos conceptos, como es la fabricación de productos con movimientos relativos entre los componentes en una sola impresión [115]. Los grados de libertad que permite la FA ha desembocado en la realización de diferentes metodologías de diseño por parte de diferentes entidades y autores.

Munguía [88] presenta una metodología que muestra las diferentes posibilidades para usar la fabricación aditiva versus los métodos tradicionales mediante inteligencia artificial. Otros autores [116] han desarrollado una metodología que determina qué componentes en un prototipo multicomponente puede ser fabricado de una vez mediante fabricación aditiva. Dicha metodología se basa en una representación gráfica de los elementos del diseño usando lógica difusa. Otras metodologías de prototipos multicomponentes fueron desarrollados basándose en evaluaciones por índices [117]. Para el siguiente caso, se han recogido algunos criterios clave de las anteriores metodologías y se han aplicado a la válvula presentada anteriormente.

En primer lugar, se han determinado cuáles son las funcionalidades que se desean abarcar con un nuevo diseño para ser fabricado aditivamente.

- Cubrir el sistema de apriete de la membrana, manteniendo la relación entre distancia lineal del eje y las vueltas de volante, es decir, la parte superior.
- Eliminar el sistema de seguridad.
- Conservar el indicador de nivel, pero no en la parte superior, ya que es molesto durante la acción de apriete y cierre.
- Rediseñar el volante para conseguir un agarre ergonómico.

En la Figura A.4 se observar la parte superior que se quiere rediseñar del diseño original.

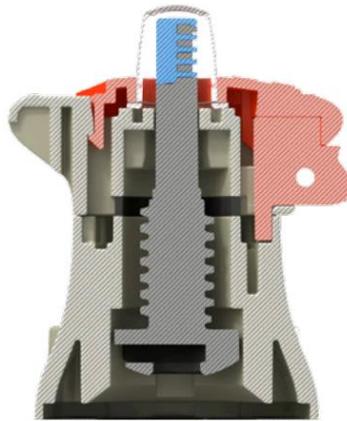


Figura A.4. Parte superior de la válvula manual. Fuente: CEPEX S.A.U.

Según [59] para realizar un rediseño de un conjunto es necesario hacer un esbozo y realizar un análisis de los movimientos relativos entre las partes. Seguidamente, se deben determinar cuáles son las piezas candidatas para ser eliminadas y posteriormente decidir si el diseño es aceptable o no.

En cuanto a la primera fase, se han analizado cuáles son los movimientos relativos entre las partes. El sistema que se presenta es muy sencillo y similar al de una tuerca/tornillo. El volante (4) y la guía (3) al estar unidas giran de forma igual, mientras que la arandela evita el desgaste por rozamiento. El eje (1) está guiado por la tapa (6). En este caso, el único movimiento relativo que existe es el eje y el volante (4) con la guía (3).

El segundo paso es eliminar las piezas que no son necesarias y comprobar que el diseño es válido. Mediante el mismo criterio de movimientos relativos, todas aquellas partes que no los tienen, son susceptibles de fabricarlos como una única pieza. En este caso, la guía (3) y el volante (4). Teniendo en cuenta las premisas o funcionalidades detalladas anteriormente, se ha realizado una alternativa de diseño o un rediseño que se muestra en la Figura A.5.

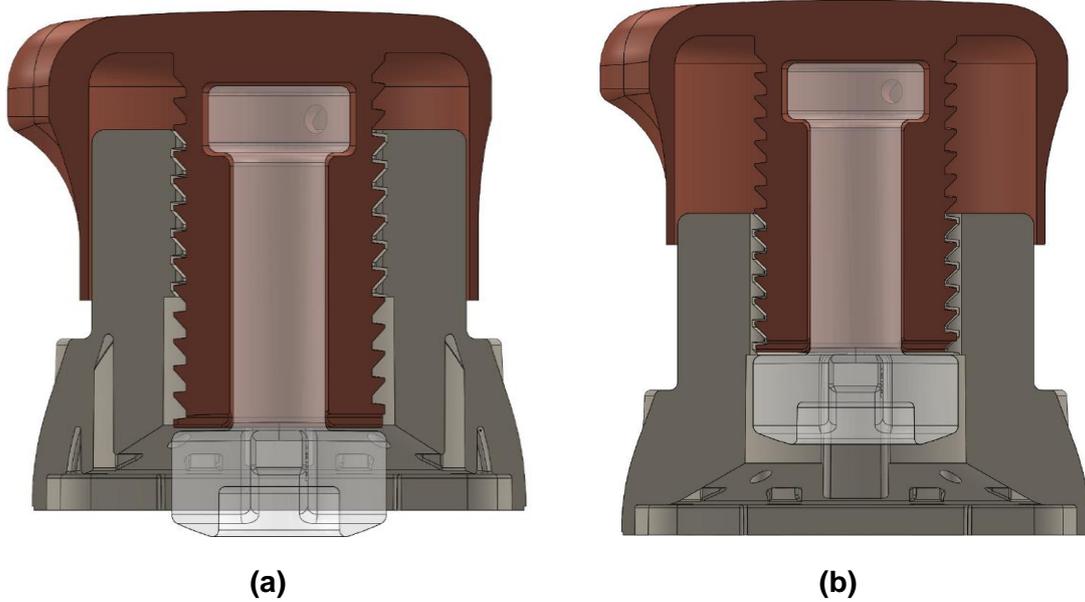


Figura A.5. Rediseño para fabricar en FA. (a) Posición de cierre total y (b) Posición apertura total. Fuente: Propia.

El resultado obtenido es un nuevo diseño que cumple con los requerimientos especificados: la ergonomía, la preservación del indicador de nivel, mantener la relación de paso de rosca y eliminar el sistema de seguridad. En primer lugar, se han eliminado las partes que no tenían movimientos relativos y se ha conservado el paso de rosca para mantener el ratio vueltas/distancia, tal como se muestra Figura A.6 (a). En segundo lugar, se ha modificado el perfil de rosca original por dientes de sierra para conseguir la misma resistencia que la rosca cuadrada original, pero en un volumen más reducido. De esta forma, se reduce el coste de la pieza, ya que su volumen y la altura disminuyen, tal como se muestra Figura A.6 (b). El nivel de apertura/cierre es indicado por la altura relativa de la tapa en base al cuerpo.

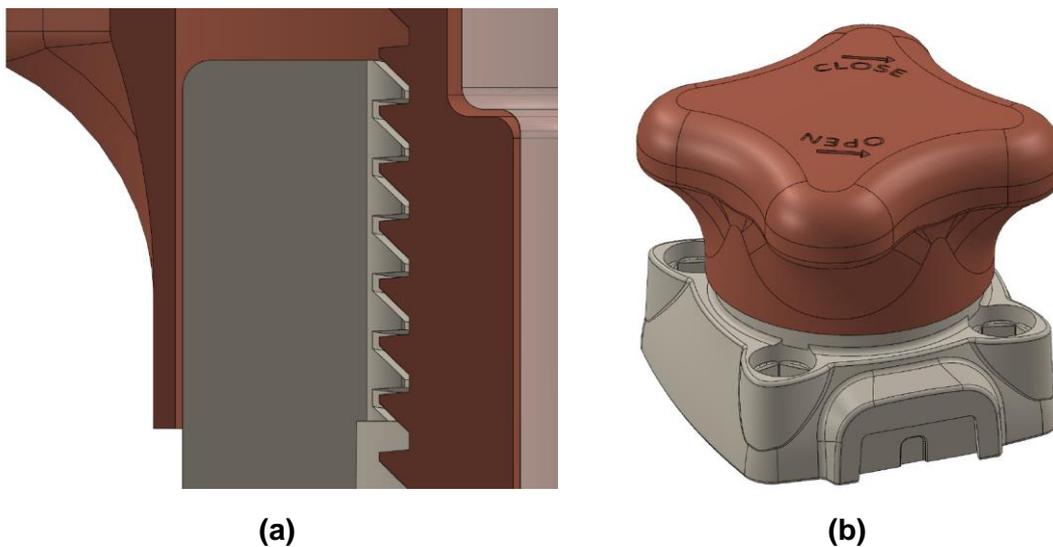


Figura A.6. (a) Rosca de dientes de sierra (b) Diseño final. Fuente: Propia.

Para permitir el movimiento de las partes es requerido dejar espacios entre los componentes en el diseño, para que los diferentes componentes del conjunto no se unan entre sí, concretamente se debe dejar un espacio de unos 0,7 mm. El diseño final se ha fabricado mediante MJF, una tecnología basada en polvo. Por esta razón, es requerido realizar en el diseño unos taladros que permitirán la salida del polvo que no ha sido sinterizado, tal como se ve en la Figura A.7.

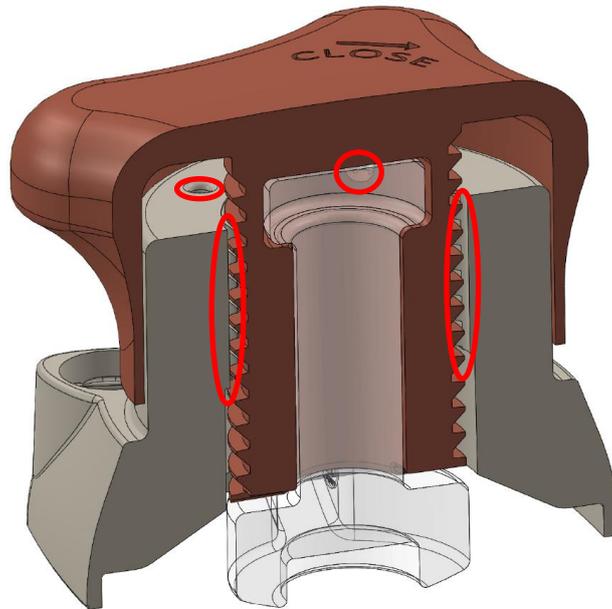


Figura A.7. Diseño de las evacuaciones de polvo en color rojo. Fuente: Propia.

Dichos elementos han sido seleccionados de forma que también se puedan utilizar como puntos de engrase. De esta forma, se puede inyectar grasa que permita mejorar el deslizamiento en las partes móviles del diseño.

Finalmente, se ha validado una unidad en una instalación real y los resultados obtenidos han sido los mismos que para la válvula original, ya que las modificaciones solamente impactan sobre la parte mecánica de la válvula y no la hidráulica. Finalmente, se puede constatar que se han alcanzado todas las funcionalidades expuestas realizando un diseño para la fabricación con tecnologías en base a polvo con éxito, siguiendo las sugerencias de las metodologías para diseños multicomponentes. Además, con el nuevo diseño no es necesario realizar los primeros nueve pasos de ensamblaje, si se compara con el diseño original de la válvula. El diseño sin limitaciones de fabricación que permite la manufactura aditiva impacta sobre los costes de fabricación y los tiempos de ensamblajes, en el nuevo diseño se han integrado nueve componentes en una sola impresión sin renunciar a ninguna funcionalidad.

Anexo B: Venturi

El siguiente caso de estudio es una bomba venturi utilizado en una válvula descalcificadora de aguas, como se observa en la Figura B.1.



Figura B.1. Representación del venturi y la válvula descalcificadora. Fuente: Propia.

La necesidad surge de la complejidad de fabricación de esta pieza mediante inyección de plástico por sus requerimientos dimensionales. Según un estudio previo dimensional las tolerancias de fabricación de este venturi en concreto deben de ser $\pm 0,01\text{mm}$ para conseguir los valores de calidad adecuada. Hasta el momento la fabricación de dicho venturi se realizaba mediante POM o resina acetálica, siendo un material con muy buenos resultados en cuanto dimensiones. Además, dichos venturi se fabrican en una pequeña máquina de inyección eléctrica con el objetivo de obtener piezas de alta precisión. Sin embargo, por la geometría del venturi el molde de inyección está dotado de unos negativos automáticos con unas dimensiones de hasta 0,5 mm, para los agujeros de éste. Es inevitable que la presión de inyección desplace estos negativos y a consecuencia no se obtiene la calidad requerida. La concentricidad entre los orificios y su dimensión son los parámetros críticos que se deben controlar. La alternativa propuesta es la fabricación mediante tecnología aditivas, más concretamente, estereolitografía de alta precisión, con la máquina Projet 6000HD.

El funcionamiento de una válvula descalcificadora es el siguiente: en primer lugar, el agua de red pasa por una resina situada en el depósito. Esta resina capta el ion calcio en su interior descalcificando el agua que irá directa hacia consumo. Una vez se ha saturado la resina, el venturi hace la función de bomba hidráulica impulsando una corriente saturada de sal que recupera el ion calcio retenida en la resina para llevarla directamente a desagüe. De esta forma, se limpia la resina para conseguir mejor rendimiento en la descalcificación. Se ha realizado un diseño de con las diferentes variables de influencia en el proceso de estereolitografía y posteriormente se han validado mediante un estudio en campo. Los parámetros de calidad que se deben obtener para verificar la correcta fabricación son los siguientes:

- Velocidad vehículo: 1,4-1,6 m/h
- Concentración de sal: 140-160 g/L

Los parámetros más significativos según [118] son: la posición en la bandeja de impresión, la altura de capa y el material utilizado.

- Posición de la bandeja: circular o aleatoria, como se observa en la Figura B.2.

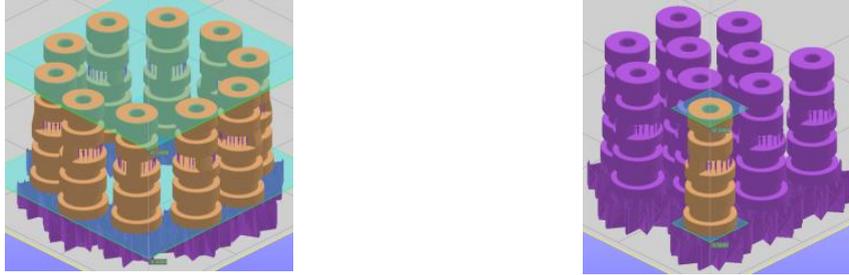
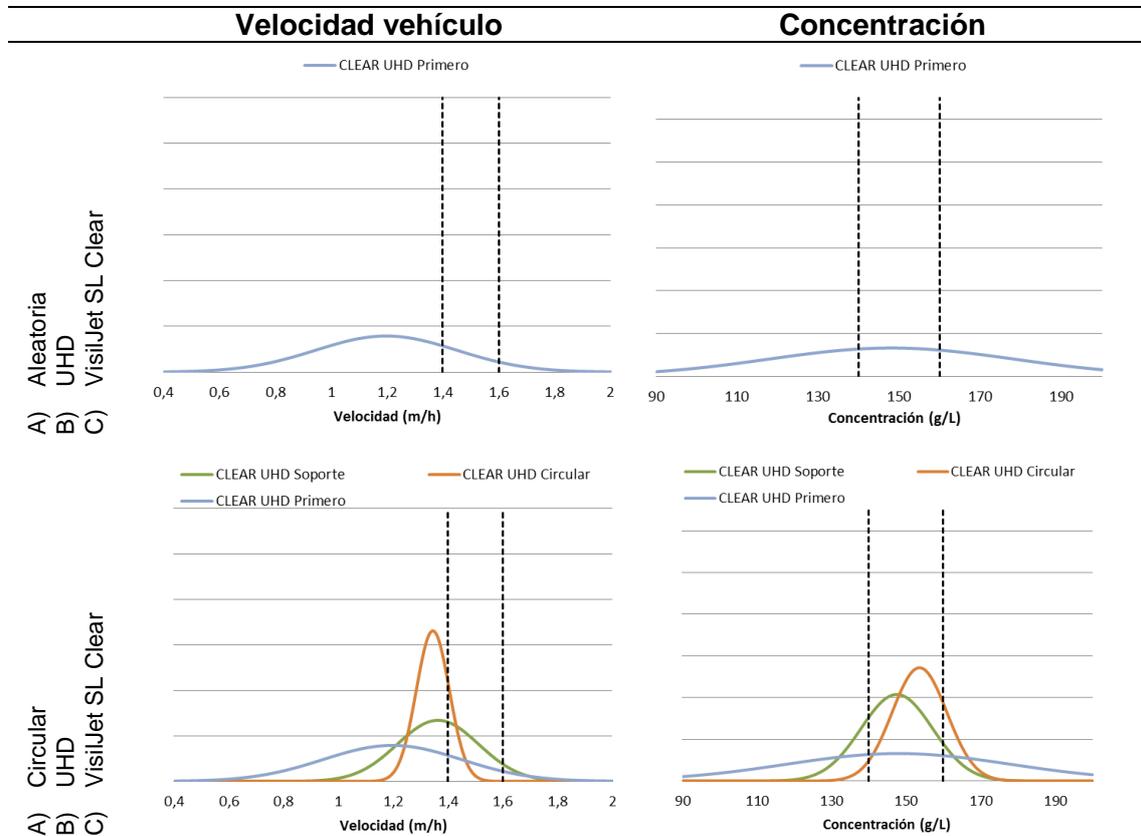


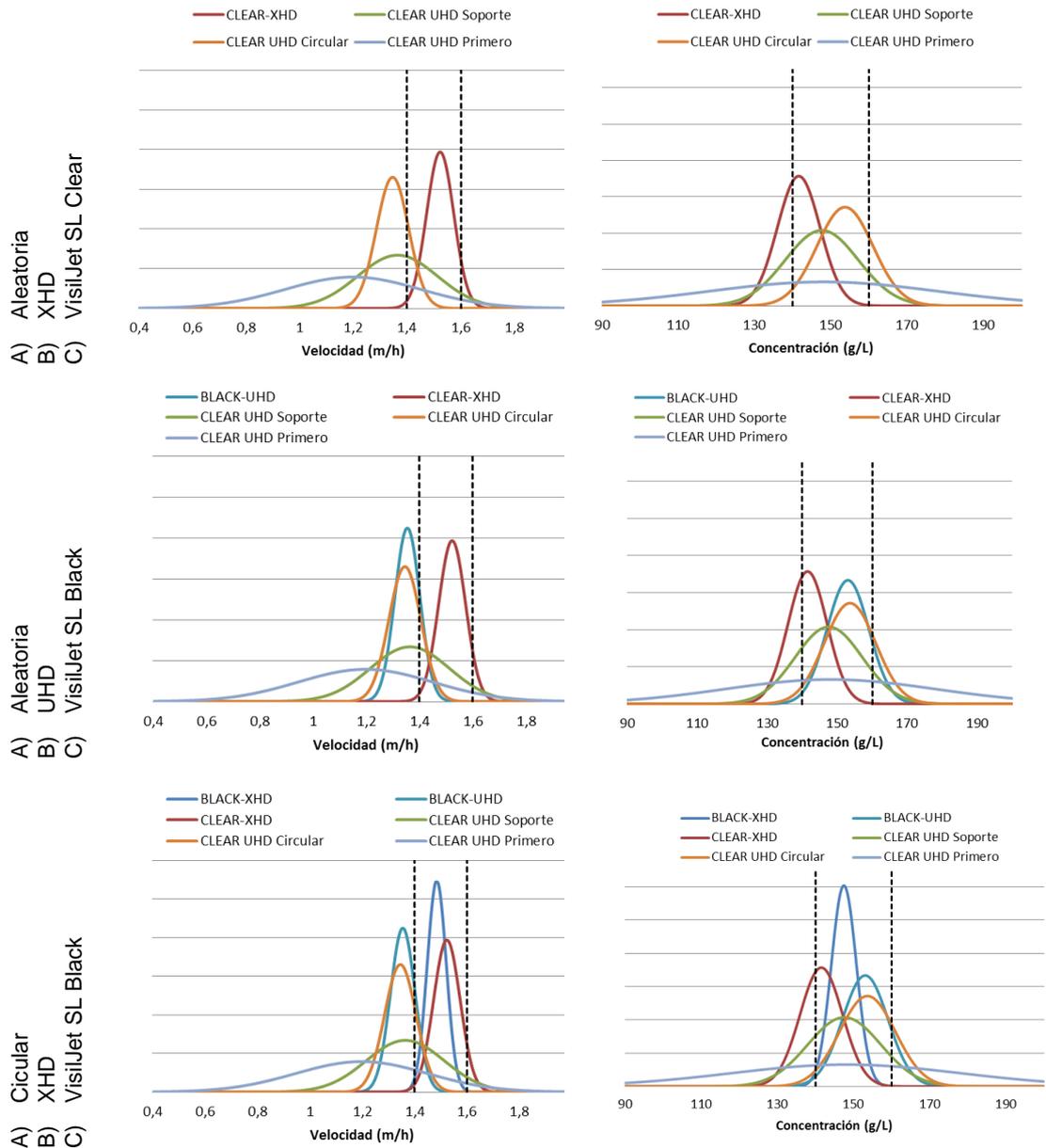
Figura B.2. Distribución circular (izquierda) y distribución aleatoria (derecha). Fuente: Propia.

- Altura de capa: existen dos configuraciones: UHD (0,1 mm) y XHD (0,05 mm).
- Materiales: se han ensayado dos materiales: VisiJet SL Clear y VisiJet SL Black.

A continuación, se han ensayado los diferentes venturi fabricados para obtener los valores de concentración y velocidad vehículo, tal como se observa en la Tabla B.1. Se han realizado curvas de distribución para representar los resultados, ya que se han ensayado cien venturi por cada experimento.

Tabla B.1: Resultado de los experimentos. Fuente: Propia.





Tal como se observa en los anteriores experimentos, la disposición en la bandeja, el material y la altura de capa impactan sobre la calidad del venturi. Se puede concluir que la disposición circular junto al material VisiJet SL Black y una altura de capa de 0,05 mm es la mejor combinación para obtener altos porcentajes de venturi correctos. La disposición circular permite que el láser llegue con la misma intensidad en todos los venturi favoreciendo la repetitividad. La densidad y la formulación del material VisiJet SL Black y la altura de capa 0,05 mm también favorece garantizar una precisión dimensional más elevada que con otros materiales.

Anexo C: Soporte para válvula

El caso de estudio del presente trabajo se desarrolla a partir de una necesidad real de la industria de la conducción de fluidos. En algunas ocasiones, se piden bajo demanda algún producto de catálogo, pero con alguna personalización para un cliente en concreto. La petición fue la transición en el diseño, de una válvula manual existente a una válvula automática regulada por membrana que se presenta en la Figura C.1.



Figura C.1. Diseño de la válvula automática de membrana. Fuente: CEPEX.

Se trata de un sistema de regulación de caudal para fluidos. El pistón neumático (gris) actúa sobre el actuador (verde) que está conectado con la membrana mediante un pasador. El soporte (rojo) se encarga de alinear el actuador con la membrana para que pueda restringir el caudal y separar el sistema neumático del sistema hidráulico. La membrana (negra) está dotada con un inserto metálico que permite conectar el actuador con la membrana. Por último, el cuerpo de la válvula (gris oscuro) se encarga de la conducción del fluido. El sistema está fijado con tornillería de acero inoxidable que atraviesa todas las partes hasta llegar al pistón neumático, tal como se observa en la Figura C.2 y la Tabla C.1. La parte que se ha estudiado ha sido el soporte, ya que lo demás son elementos estándares o existentes en el modelo de válvula manual.

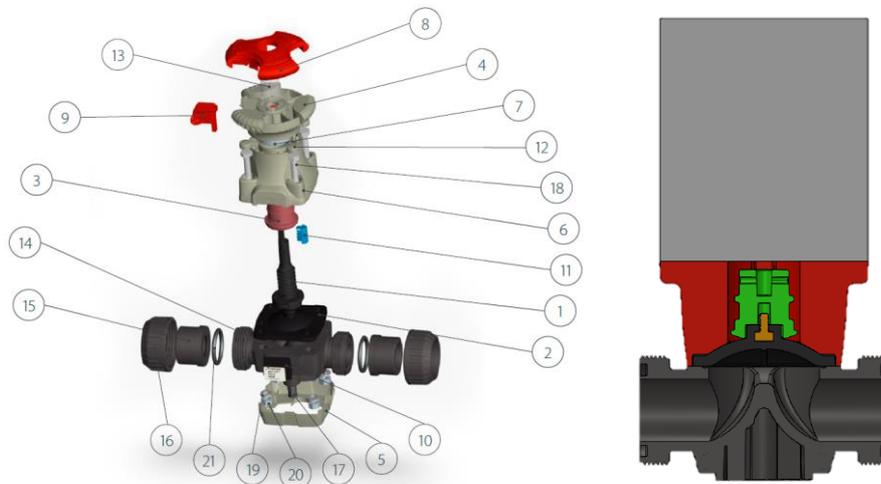


Figura C.2. Vista explosionada válvula manual (izquierda) y sección de la válvula automática (derecha). Fuente: CEPEX.

Tabla C.1. Número y descripción de las piezas. Fuente: CEPEX.

Numero	Descripción	Numero	Descripción
1	Eje	11	Indicador
2	Diafragma	12	Tapón tornillo
3	Guía	13	Tapón indicador
4	Volante	14	Cuerpo
5	Tapa inferior	15	Manguito
6	Tapa	16	Tuerca
7	Arandela	17	Inserto
8	Tapón superior	18	Tornillo DIN 931
9	Seguro	19	Arandela DIN 127
10	Porta etiquetas	20	Tuerca DIN 934
		21	Junta de estanqueidad

Se requiere fabricar 2000 unidades de soportes y abastecer así al cliente. En este estudio se ha analizado en términos económicos y técnicos la viabilidad de este proyecto para realizarlo mediante técnicas de fabricación aditiva y estrategias de optimización topológica.

Las especificaciones técnicas del soporte obligan a utilizar materiales con altas prestaciones mecánicas y térmicas. Por ello, se ha realizado un estudio exhaustivo con una poliamida técnica (PA 666), también utilizadas en la industria de la automoción. Para el presente estudio se ha colaborado con Nexeo Solutions Spain S.L, proveedor del filamento (Novamid® ID1030), el material utilizado. En esta ocasión, la baja demanda de soportes no justificaba el coste de producción por métodos convencionales, permitiendo así, la adopción de nuevas tecnologías encaradas a minimizar costes para producciones reducidas. En primer lugar, se ha analizado la impresión de dicha pieza sin realizar ningún tipo de rediseño estructural. Se ha calculado el coste pieza a partir del método Hopkinson y Dickens [35], asumiendo que los costes de consumo energético de las máquinas son despreciables, suponiendo menos del 1% del coste final. La impresora BCN 3D Sigma se ha utilizado para el presente estudio que impacta sobre el análisis de coste pieza, como se especifica en la Tabla C.2. Los datos de operación se han recogido con el software CURA, incluyendo el número de piezas por plataforma, tiempos de procesos y cantidad de material utilizado, como se observa en la Figura C.3.

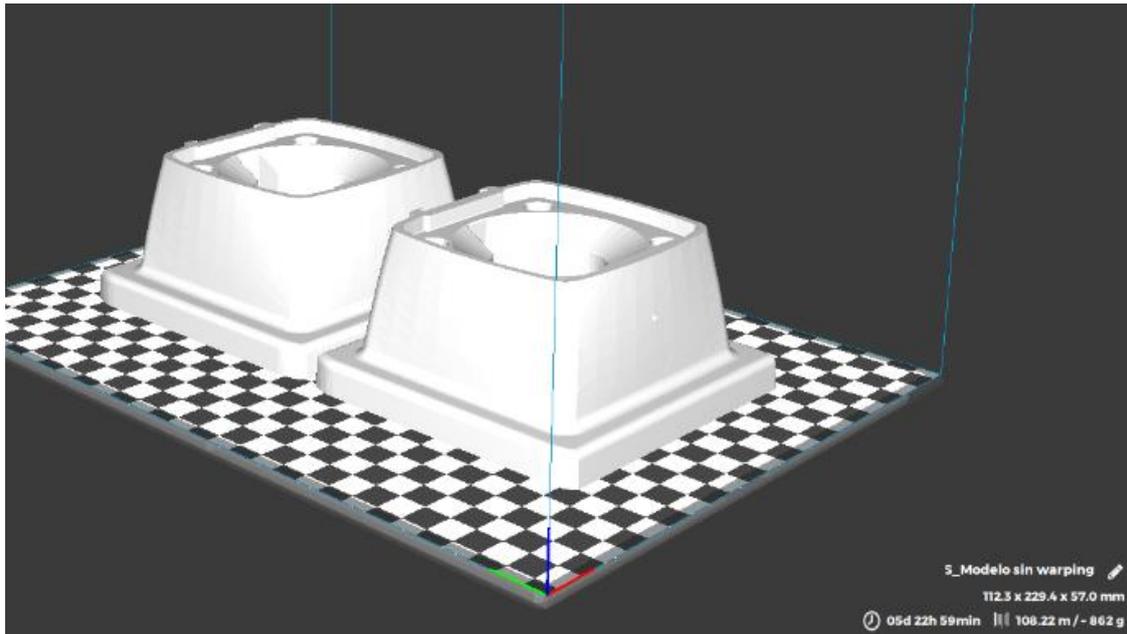


Figura C.3. Simulación del tiempo y material utilizado para el diseño sin optimizar. Fuente: Propia.

Tabla C.2. Análisis de costes para el diseño sin optimizar. Fuente: Propia.

Costes de la fabricación aditiva (diseño original)	
Datos de operación	
Número de partes impresas por plataforma	2
Tiempo de impresión por plataforma (h)	143
Horas operativas por año (h)	7.884
Volumen de producción total (por año)	110
Coste del equipamiento	
Máquina y equipo auxiliar (€)	2.100,00 €
Coste de la depreciación del equipo por año (€)	262,50 €
Coste de mantenimiento de máquina por año (€)	100,00 €
Coste total de máquina por año (€)	362,50 €
(C _E) Coste de máquina por parte (€)	3,29 €
Coste de operario	
Coste de operario por hora (€)	17,00 €
Tiempo de configuración de máquina (min)	5
Tiempo de postproceso por parte (min)	3
(C _H) Coste de operario por parte (€)	1,13 €
Coste de materiales	
Material por parte (kg)	0,862
Coste del material por kg (€)	41,35 €
(C _{MAT}) Coste de material por parte (€)	35,64 €
(C _{AM}) Coste total de la parte (€)	40,06 €

En la primera impresión se observó alabeo, una deformación en la pieza que puede reducirse ya sea a través de una buena adhesión al lecho o también a través de la configuración de impresión. Una gran ventaja de la impresión 3D es que el modelo se

puede imprimir con una estructura interna, denominado relleno. Otra gran ventaja es que la deformación o alabeo puede reducirse significativamente si se usa una estructura menos densa, llamado también *infill*. Cuando utilizamos un relleno del 25% en lugar del 75%, se observa un cambio significativo en el alabeo, tal como se muestra en la Figura C.4 y también en el tiempo de impresión que se reduce en un 30%.



Figura C.4. Alabeo producido por las contracciones del material según el porcentaje de relleno. Fuente: Nexeo 3D.

Aun así, el elevado coste de la pieza da lugar a la necesidad de realizar un análisis topológico, utilizando un programa CAE comercial, para conseguir una reducción del material, proceso y consecuentemente, del coste de la pieza. Posteriormente a la simulación, se ha verificado el buen funcionamiento de la válvula ensamblada siguiendo los ensayos especificados por el estándar de producto.

En primer lugar, se deben definir los componentes que forman parte del sistema y de las restricciones en la simulación. En amarillo se muestra la membrana que ejerce una presión sobre los alrededores del alojamiento del soporte, tal como se observa en la Figura C.5.

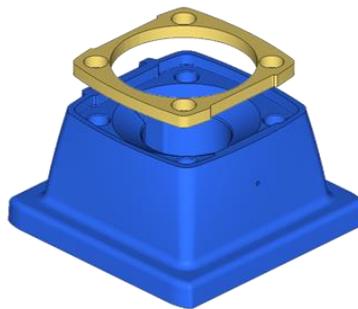


Figura C.5. Elementos del sistema. Fuente: Nexeo 3D.

La parte central de la membrana también se ejerce presión, pero solamente cuando hay presión de agua en su interior, por esto se presenta a continuación en el estudio de cargas. El material de la membrana es EPDM un derivado del caucho con 6 mm de espesor y un módulo de elasticidad de 10 MPa. En azul se muestra el soporte que ha sido el objeto en la simulación y se ha desglosado en dos dominios. La carcasa externa

o piel, por razones estéticas, debe permanecer como el diseño original. Sin embargo, el interior de ésta puede ser modificado, por ello, la pieza se divide en el dominio de diseño (interior) y el dominio de no diseño (carcasa o piel) con un espesor de 2 mm, tal como se observa en la Figura C.6.

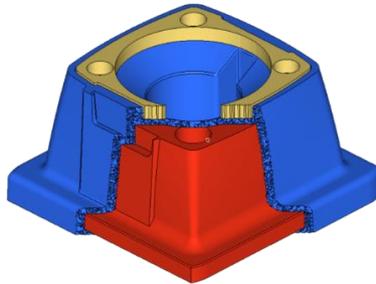


Figura C.6. Dominios de diseño (rojo) y no diseño (azul). Fuente: Nexeo 3D.

En segundo lugar, se ha realizado el estudio de soportes en el modelo. La parte superior, al estar en contacto directo con la base del pistón metálico se comporta como una restricción en superficie, tal como se ve en la Figura C.7.

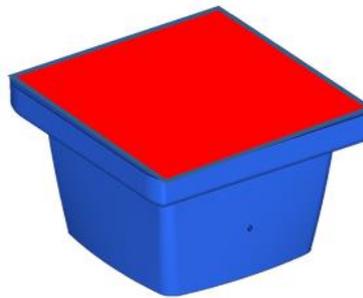


Figura C.7. Soporte en superficie en rojo. Fuente: Nexeo 3D.

En cuanto a la tornillería que une el cuerpo con el pistón restringe el movimiento en las direcciones X, Y y Z, tal como se muestra en la Figura C.8.

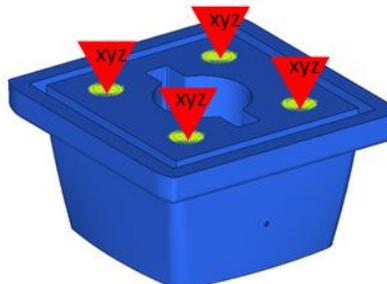


Figura C.8. Soportes de la tornillería en amarillo. Fuente: Nexeo 3D.

En la parte central del modelo existe un alojamiento pasante donde el vástago y el actuador atraviesan el soporte hasta entrar en contacto con la membrana. No se

contempla en este caso de estudio las cargas en los laterales del alojamiento suponiendo que el actuador junto al vástago no entra en contacto con las paredes de su alrededor.

El tercer paso es identificar las cargas en el modelo, por ello, se han definido los dos escenarios extremos: válvula totalmente abierta y cerrada. En el primer escenario, el actuador neumático está en reposo y la membrana deja pasar el flujo por el interior del cuerpo a una presión nominal de 10 bar (PN10). En este caso, la presión actúa en ambos lados del soporte, como se ve en la Figura C.9.

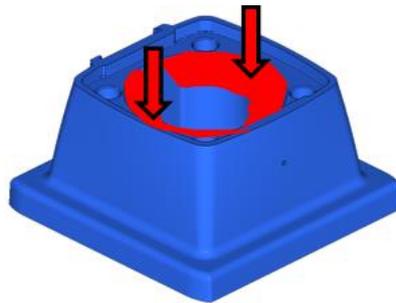


Figura C.9. Estadio 1: Válvula totalmente abierta. Fuente: Nexeo 3D.

El segundo estadio, el actuador neumático hace fuerza sobre la membrana pisando el cuerpo y evitando el paso del flujo por el interior. En este caso, la presión actúa solamente en una de las caras, como se observa en la Figura C.10.

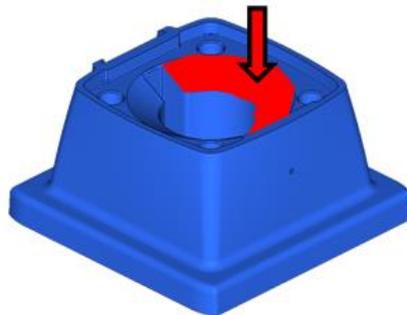


Figura C.10. Estadio 2: Válvula totalmente cerrada. Fuente: Nexeo 3D.

El cuerpo y el soporte se ensamblan mediante tornillería con un apriete de 6 Nm, en los dos casos se ha aplicado una presión de 1 MPa de compresión sobre la membrana que equivale a una deformación de 0,6 mm en sus dimensiones. Se ha caracterizado el material Novamid® ID1030 para los dos entramados o patrones de impresión más comunes (0-90 y 45-45) para el plano de impresión X-Y, tal como se muestra en la Figura C.11 y la Tabla C.3.

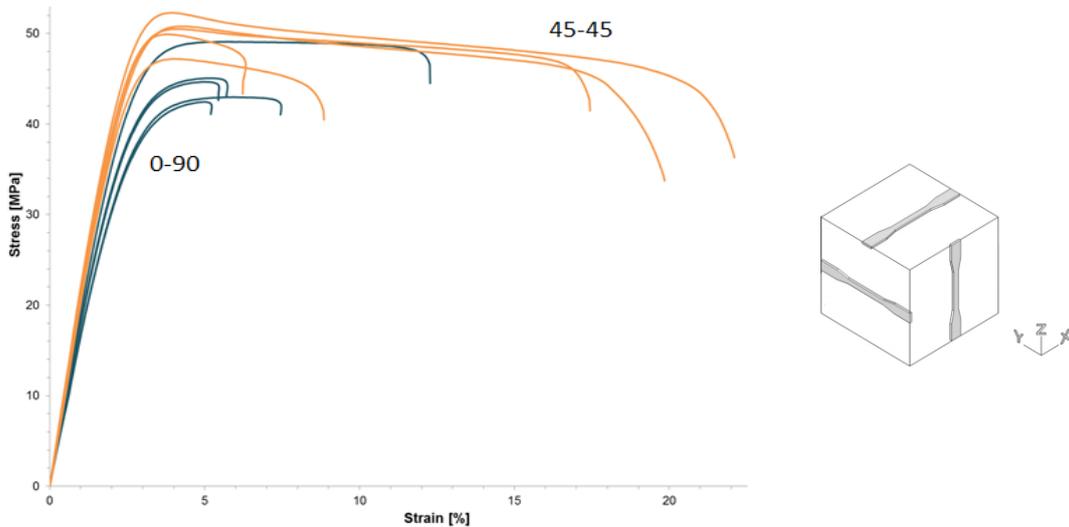


Figura C.11. Curvas de tensión deformación de Novamid® ID1030. Fuente: Nexeo 3D.

Tabla C.3. Propiedades mecánicas del material Novamid® ID1030. Fuente: Nexeo 3D.

Parámetros	E (MPa)	ε (%)	σ (MPa)
0-90	X-Y	1714,00 ± 103.83	7,21 ± 2.97
45-45	X-Y	2124,00 ± 80.05	14,89 ± 6.97

Para conseguir las dimensiones deseadas en la pieza impresa, las contracciones por enfriamiento se deben tener en cuenta. Por esto, es necesario realizar un escalado del modelo tridimensional, aumentando el volumen proporcionalmente un cierto valor. Dicho valor es dependiente de las condiciones de impresión, pero por lo general, para Novamid® ID1030 se utiliza un 2%. De esta manera, se puede corregir las deformaciones asegurando las correctas dimensiones después de la impresión, tal como se ve en la Figura C.12.

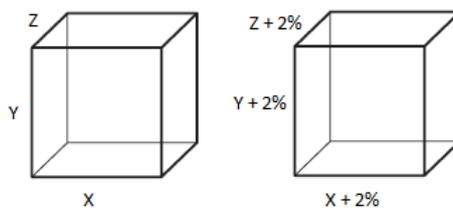


Figura C.12. Modelo original (izquierda). Modelo corregido (derecha). Fuente: Propia.

Novamid® ID1030 es imprimible con máquinas comunes del tipo FFF cuya boquilla de inyección permita rangos de temperatura entre 220-245°C. La temperatura de impresión más usual es de 230°C, consiguiendo la fusión homogénea del material en temperaturas por encima de 225°C. Las propiedades mecánicas óptimas se observan en temperaturas entre 225-245°C.

La serie Novamid® ID es una gama de filamentos de alto rendimiento para resistencias y ductilidad extremas. Estas propiedades están estrechamente relacionadas con el nivel

de cristalización del material. Con el fin de lograr un rendimiento similar al moldeado por inyección estándar del PA6 se ha mantenido el alto nivel de cristalinidad en el material. Para conseguir esta mayor cristalinidad, utilizar las condiciones de impresión óptimas es necesario. Para imprimir el modelo se ha utilizado la máquina de impresión 3D Sigma de la compañía BCN3D Technologies con los siguientes parámetros de impresión:

- Diámetro de la boquilla: 0,4 mm
- Diámetro del filamento: 2,85 mm
- Velocidad de impresión: 80 mm/s
- Altura de capa: 0.1 mm
- Temperatura de extrusión: 230°C
- Temperatura de la cama caliente: 100°C

La acumulación de tensiones por contracciones durante la impresión puede provocar la separación de la pieza cuando la adhesión de la placa de construcción es insuficiente. La adherencia se puede aumentar mediante una unión química o unión mecánica. Para conseguir una correcta adhesión en la cama caliente se ha utilizado un promotor adhesivo (Dimafix®) y se ha añadido también un borde para aumentar la superficie de contacto. Para conseguir los mejores resultados, las cámaras calientes reducen las contracciones y ayudan a la fusión de la capa a capa durante la impresión. Además, este hecho ayuda a reducir la delaminación de la base del modelo sobre la superficie de impresión.

Las poliamidas son de naturaleza higroscópica, lo que causa más problemas durante la impresión cuando contienen altas cantidades de agua en su estructura interna. La higroscopia es el fenómeno de atracción y retención de moléculas de agua del medio ambiente circundante, que generalmente ocurre a temperatura ambiente.

La humedad atrapada en piezas impresas con filamentos de impresión puede experimentar una falta de adhesión en la placa de construcción, además de problemas en el acabado. Si la humedad no se extrae del filamento, puede causar quemaduras y fragilidad y las piezas experimentarán un deterioro de sus propiedades físicas con el tiempo. Las burbujas aparentes o un crujido durante la deposición del filamento pueden indicar humedad excesiva en el filamento. Las piezas impresas con filamentos de nylon pueden dar información visual indicando los niveles de humedad. Un nylon seco da como resultado una pieza impresa bastante transparente, brillante y lisa. Por otro lado, un nylon húmedo puede dar como resultado una pieza impresa casi rugosa, texturizada y rugosa, tal como se observa en la Figura C.13.

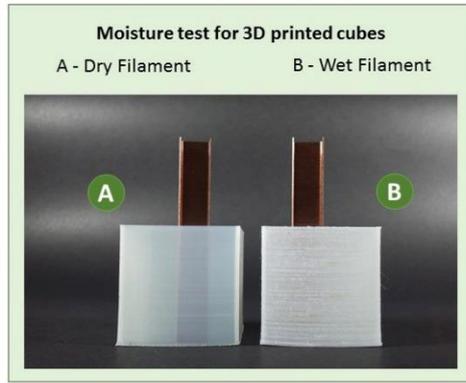


Figura C.13. Ensayos de humedad en Novamid® ID1030. Fuente: Nexeo 3D.

Colocar filamentos en un horno a 80°C durante 6-8 horas debería ser suficiente para secar la mayoría de los materiales y se considera una mejor práctica incluso si no se está seguro de si los filamentos están completamente secos o no. Es común experimentar mejores resultados de impresión con los filamentos recién abiertos en comparación con los filamentos expuestos a la humedad ambiental durante varios días.

Seguidamente se ha corrido la simulación y a continuación se han realizado los ensayos de validación para comparar la realidad con la virtual. El objetivo es que la pieza impresa resista como mínimo la vida útil de la membrana. Por ello, se ha definido el protocolo de validación siguiendo el esquema neumático y eléctrico que se ve en la Figura C.14.

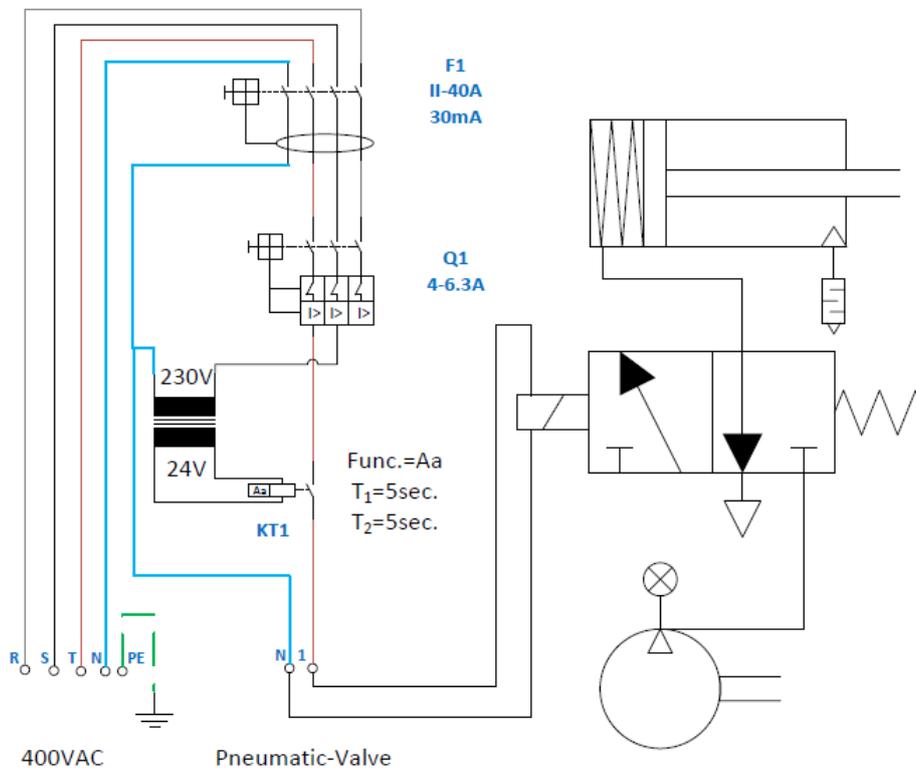


Figura C.14. Esquema neumático del sistema de ensayo. Fuente: Propia.

El compresor introduce aire atmosférico a presión en un acumulador mientras que un regulador de presión configurado a 10 bar permite el paso de caudal a una electroválvula normalmente cerrada. La electroválvula se controla con una señal cuadrada, siendo el ciclo, cinco segundos con tensión y cinco libre de tensión. Según el protocolo establecido, la pieza de estudio debe resistir lo mismo que la vida útil de la membrana como mínimo, alrededor de 5000 ciclos.

Se ha ejecutado la simulación configurando antes los soportes, cargas y restricciones del modelo. Suponiendo una simulación lineal y tomando los siguientes valores más pesimistas en cuenta para una impresión en X-Y a 0-90 especificados en la Tabla C.4.

Tabla C.4. Valores especificados para la simulación. Fuente: Propia.

Parámetros		E (MPa)	σ (MPa)
0-90	X-Y	1600	42

Se ha considerado un factor de seguridad de 30 en el factor de tensión para la simulación. Por lo que hace referencia a estudios a fatiga, para piezas inyectadas en Nylon no hay vida infinita, por lo que no merece la pena hacer los ensayos en todas las direcciones de fabricación y a diferentes tensiones.

Primeramente, se ha analizado el modelo totalmente macizo para observar los desplazamientos del material y los valores de estrés de Von Misses, que proporciona información sobre el fallo elástico en algunas zonas del modelo, tal como se muestra en la Figura C.15 y Figura C.16.

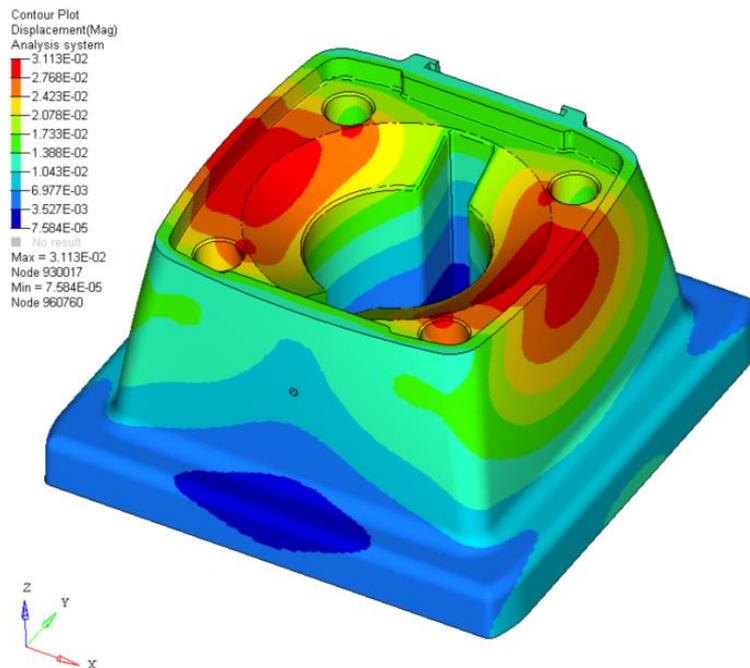


Figura C.15. Desplazamientos del material para el modelo macizo. Fuente: Nexeo 3D.

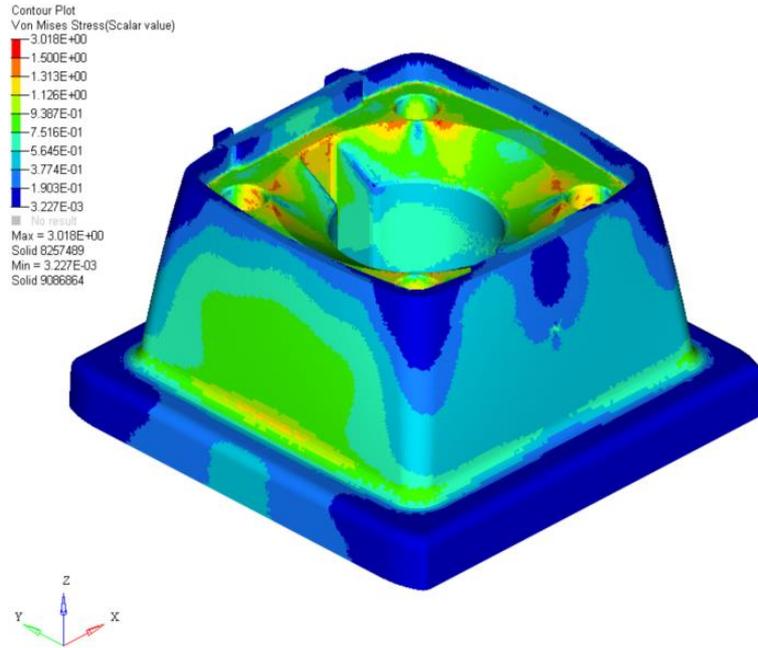


Figura C.16. Estrés de Von Mises para el modelo macizo. Fuente: Nexeo 3D.

Los resultados de desplazamiento máximos son de 0,031 mm. El estrés de Von Misses máximo se estima alrededor de las fijaciones con un valor por debajo de 3 MPa, tal como se muestra en la Figura C.17.

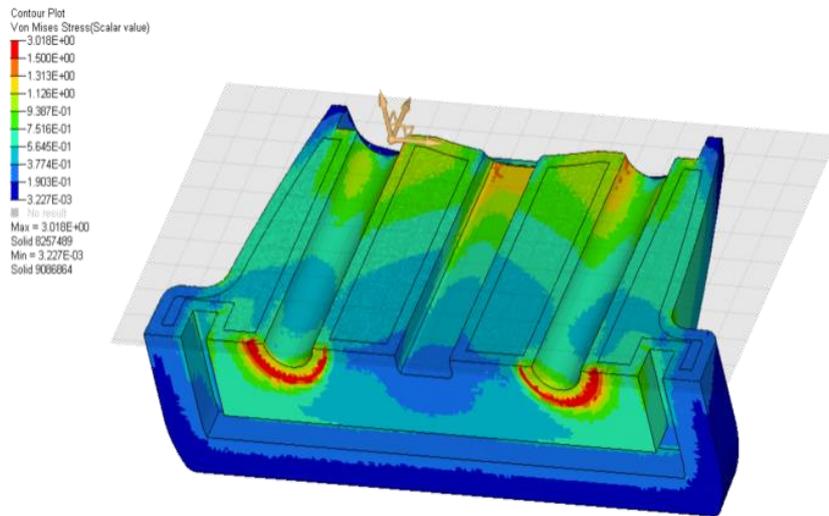


Figura C.17. Estrés de Von Mises focalizado en las fijaciones. Fuente: Nexeo 3D.

Los valores obtenidos en las simulaciones apuntan que el modelo está sobredimensionado, es decir, que para las cargas que debe resistir el diseño no es óptimo para ser fabricado con tecnologías de fabricación aditiva. Los resultados evidencian la necesidad de realizar una simulación topológica para conseguir un diseño que respecto el original ahorre material, tiempo y a consecuencia de las dos anteriores, reducir el coste/pieza. El objetivo de la simulación topológica es introducir material en

aquellos puntos donde la interacción de las cargas es alta y/o los desplazamientos ocurren. La función objetivo que debe cumplir, teniendo en cuenta las restricciones y los soportes, es la de maximizar la rigidez del modelo. En la Figura C.18 se puede observar los resultados de la optimización topológica.

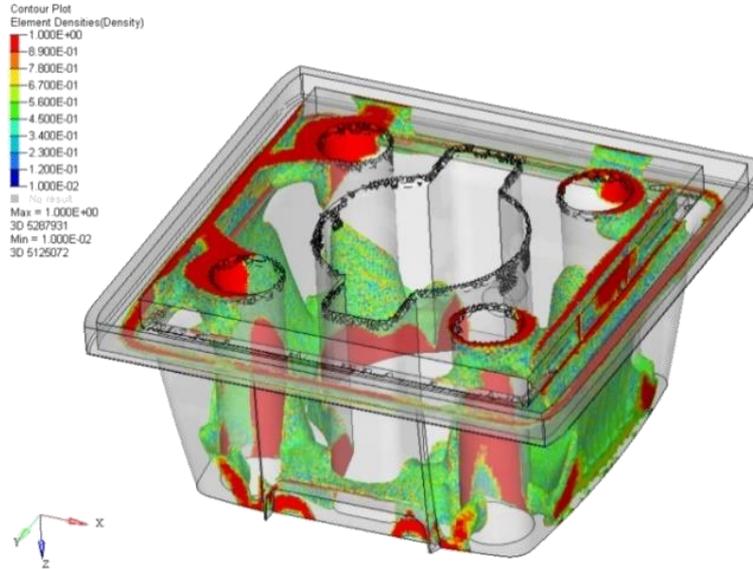


Figura C.18. Resultados de la optimización topológica. Fuente: Nexeo 3D.

Los resultados obtenidos indican las zonas donde es necesario tener mayor densidad de material para que la pieza sea funcional ante los requerimientos mecánicos especificados. Debido a la asimetría en los resultados de cargas, el diseño no es totalmente simétrico, por esto, se ha reflejado el lado más sólido en la cara contraria del plano de simetría. Una vez, obtenido el modelo se ha vuelto a correr una simulación para analizar desplazamientos y estrés en el diseño optimizado como se observan en las Figura C.19 y Figura C.20.

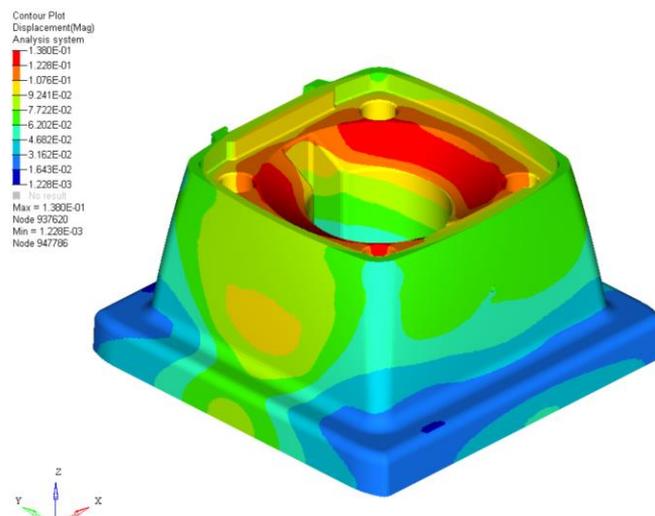


Figura C.19. Resultados de desplazamiento en el diseño optimizado. Fuente: Nexeo 3D.

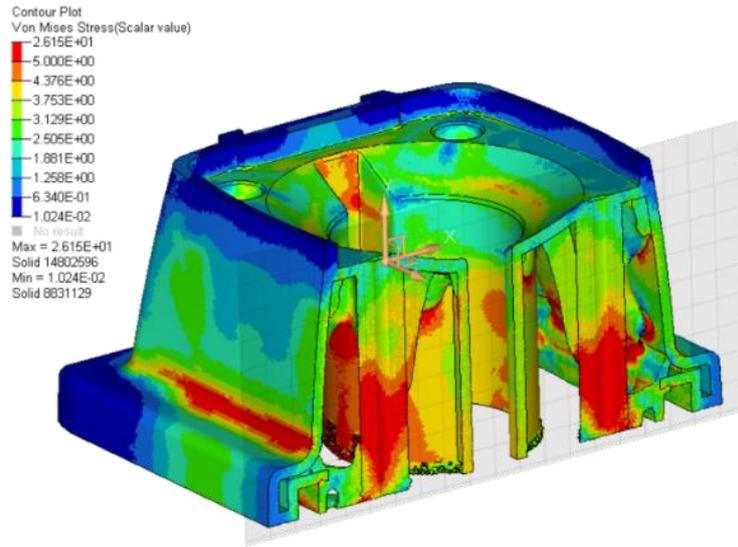


Figura C.20. Resultado de estrés de Von Misses en el diseño optimizado. Fuente: Nexeo 3D.

En referencia a los desplazamientos máximos son de 0,138 mm. El estrés máximo, mayormente por esfuerzos de compresión, son de alrededor de 26 MPa. Se ha realizado de nuevo un estudio de costes con el nuevo diseño comparando los resultados con el diseño original y el coste de fabricarlo después de la optimización topológica, tal como se observa en la Figura C.21 y la Tabla C.5.

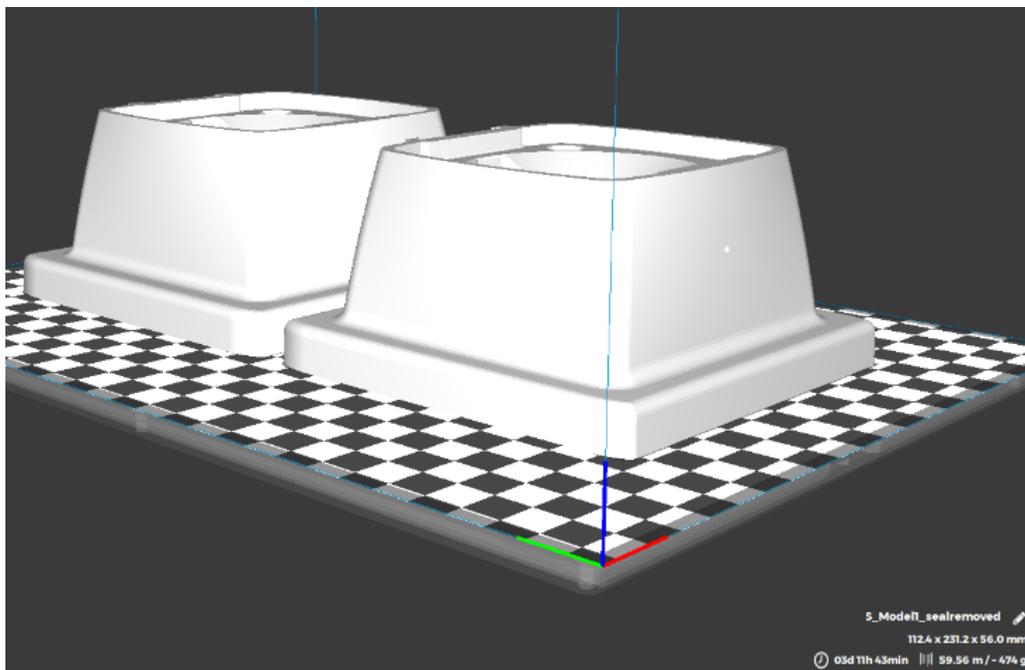


Figura C.21. Simulación del tiempo y material utilizado para el diseño optimizado. Fuente: Propia.

Tabla C.5. Análisis de coste comparativo. Fuente: Propia.

Costes de la fabricación aditiva (diseño original y diseño optimizado)		
Datos de operación		
Número de piezas impresas por plataforma	2	2
Tiempo de impresión por plataforma (h)	143	84
Horas operativas por año (h)	7.884	7.884
Volumen de producción total (por año)	110	188
Coste del equipamiento		
Máquina y equipo auxiliar (€)	2.100,00 €	2.100,00 €
Coste de la depreciación del equipo por año (€)	262,50 €	262,50 €
Coste de mantenimiento de máquina por año (€)	100,00 €	100,00 €
Coste total de máquina por año (€)	362,50 €	362,50 €
(C _E) Coste de máquina por parte (€)	3,29 €	1,93 €
Cost of Labor		
Machine operator cost per hour (€)	17,00 €	17,00 €
Set-up time to control machine (min)	5	5
Post-processing time per part (min)	3	3
(C _H) Labor cost per part (€)	1,13 €	1,13 €
Coste de materiales		
Material por parte (kg)	0,862	0,237
Coste del material por kg (€)	41,35 €	41,35 €
(C _{MAT}) Coste de material por parte (€)	35,64 €	9,80 €
(C _{FA}) Coste total de la parte (€)	40,06 €	12,86 €

En la Tabla C.5 se comparan en términos de tiempo de fabricación ambos diseños, y se puede observar una reducción significativa, aumentando en un 42% anual la producción. Además, la reducción del material utilizado disminuye en un 73% respecto al diseño original. Estos factores impactan directamente en el coste pieza disminuyéndolo hasta un 69%. En cuanto a la inyección, el coste por pieza es mucho más bajo comparándolo con tecnologías de fabricación aditiva, sin embargo, se deben imputar al coste de la parte proporcional de amortización de molde como se observa en la Tabla C.6 y la Figura C.22.

Tabla C.6. Análisis de coste comparativo para inyección. Fuente: Propia.

Coste por parte en inyección de plásticos		
Datos de operación		
Ratio de producción por hora (h ⁻¹)	35	35
Horas operativas por año (h)	7.884	7.884
Volumen de producción total (por año)	275.940	2.000
Coste del equipamiento		
Máquina y equipo auxiliar (€)	400.000,00 €	400.000,00 €
Coste de la depreciación del equipo por año (€)	40.000,00 €	40.000,00 €

Coste de mantenimiento de máquina por año (€)	8.000,00 €	8.000,00 €
Coste total de máquina por año (€)	48.000,00 €	48.000,00 €
Coste total de máquina operativo (€)	48.000,00 €	347,90 €
(C _E) Coste de máquina por pieza (€)	0,17 €	0,17 €
Costes de utillaje		
Coste del molde (€)	40.000,00 €	40.000,00 €
(C _{TOL}) Coste del molde por pieza (€)	0,14 €	20,00 €
Costes de operario		
Coste por hora del operario de máquina (€)	17,00 €	17,00 €
Tiempo de posproceso por pieza (min)	0,5	0,5
(C _H) Costes de operario por pieza (€)	0,14 €	0,14 €
Coste de materiales		
Material por pieza (kg)	0,862	0,862
Coste del material por kg (€)	1,5	1,5
(C _{MAT}) Coste de material por pieza (€)	1,293	1,293
(C _{IM}) Coste total de la pieza (€)	1,75 €	21,61 €

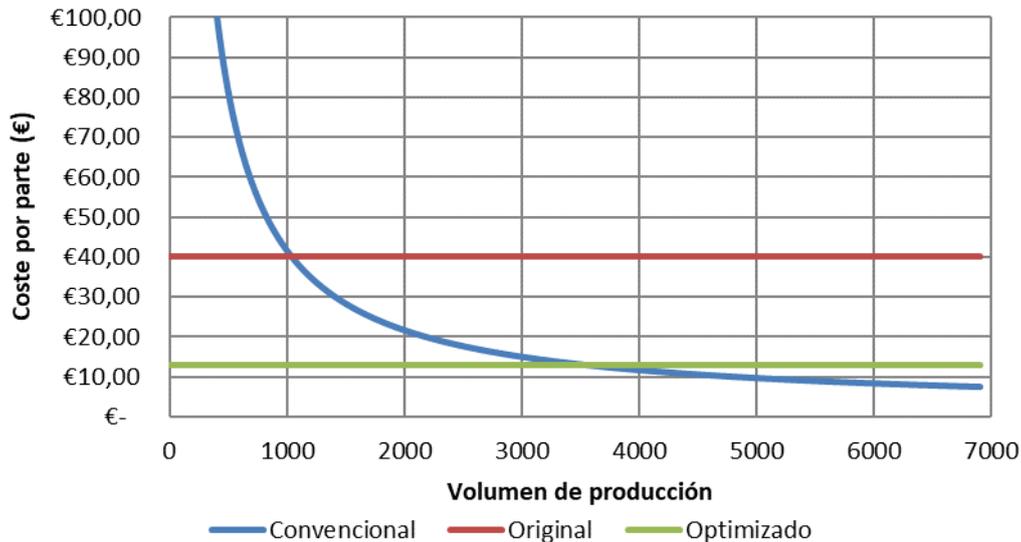


Figura C.22. Punto de encuentro para el diseño original y el optimizado. Fuente: Propia.

Si se busca el punto de inflexión entre las diferentes tecnologías es significativa la diferencia del número de piezas que se pueden fabricar hasta intersectar con la curva de la inyección de plástico. En el caso del diseño original, hasta las 1.040 piezas sería conveniente producir con tecnologías avanzadas. Mientras que, en el caso del diseño optimizado, se podrían producir hasta 3.715 piezas, un 72% más.

Posteriormente, se han ensayado tres piezas para validar el funcionamiento siguiendo el protocolo explicado en la parte experimental. En la Figura C.23 se muestra el ensayo.



Figura C.23. Imagen del ensayo según el protocolo. Fuente: Propia.

Se han ensayado tres muestras a 5.000 ciclos para comprobar la resistencia de la pieza en funcionamiento acelerado. Han funcionado correctamente las tres piezas no mostrando ningún daño ni defecto en su geometría.

Anexo D: Manipulador de inyección

Las estructuras ligeras (*lattice structures*) con unos de los elementos del diseño más característico de la fabricación avanzada. Se trata de un entramado o red tridimensional interna a la geometría que permite que la pieza tenga propiedades mecánicas similares o mejores a la misma totalmente maciza. Esto supone una serie de ventajas como son la reducción del peso y del material utilizado reduciendo así el impacto medioambiental.

La industria con mayor interés por el momento es la aeronáutica y aeroespacial, ya que hoy en día poner en órbita un kilogramo de masa tiene un coste aproximado de unos 20.000 dólares, por lo tanto, cualquier reducción de peso en los componentes de un satélite, por ejemplo, por poco que parezca, supone un gran ahorro económico. Un ejemplo claro es la colaboración de las empresas Altos y Materialise que mediante técnicas avanzadas de optimización topológica y estructuras paramétricas tipo *lattice* han conseguido reducir el peso de un inserto de titanio de 1.450 a 500 g (reducción de peso del 66%).

En este apartado se pretende explicar un caso de estudio surgido de una necesidad industrial y resuelto con la aplicación de estructuras ligeras. En la industria de la inyección de plásticos es muy común encontrar brazos robóticos que se encargan de extraer las piezas desde la maquina inyectora hasta una cinta transportadora donde pasa a una siguiente etapa de montaje. En este caso de estudio, se requiere la fabricación de una mano robótica para el agarre de unas rejillas para rebosaderos de piscinas. En la Figura D.1 se observa el diseño realizado para dicho manipulador.

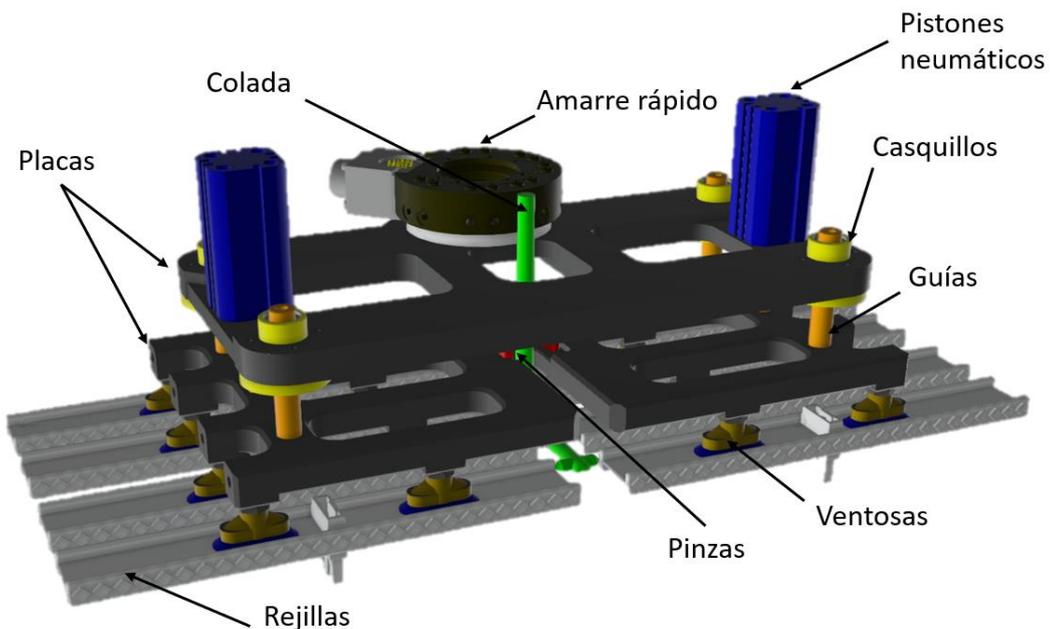


Figura D.1. Diseño de la pinza robótica. Fuente: Propia.

Las placas en gris oscuro son las que se desean fabricar. La placa superior sostiene el amarre rápido del robot (negro), dos pistones neumáticos de doble efecto (azul) y cuatro casquillos para el deslizamiento de guías lineales (amarillo). La placa inferior sostiene unas ventosas (dorado) que gracias a unos canales internos situados en los laterales y presión negativa pueden succionar las rejillas (blanco) de la máquina de inyección, además, esta placa también sujeta unas pinzas (rojo) que agarra la colada (verde). Todos los componentes van collados mediante tornillería mientras que las ventosas y los conductos de salida de aire van roscados mediante rosca gas de 1/8".

Para poder enumerar los requisitos mecánicos es necesario conocer el funcionamiento de la pinza. Una vez se han inyectado las rejillas se abre el molde y entra en juego el brazo robótico situando la mano robótica en la posición de expulsión de las rejillas. Los expulsores del molde empujan las piezas hacia el exterior y en ese momento, las ventosas toman contacto con las rejillas mientras que los pistones neumáticos retroceden a velocidad constante gracias a un regulador de presión de aire hasta una distancia determinada del recorrido del émbolo. Una vez las rejillas están enganchadas a las ventosas de la pinza gracias a la presión negativa, el robot deja las rejillas en una cinta transportadora donde un operador las espera para realizar el montaje. Por último, los pistones neumáticos avanzan hasta su posición inicial y se repite todo el proceso de nuevo.

Entendiendo el funcionamiento se pueden determinar los requisitos mecánicos:

- Alta rigidez: evitar el doblado de la placa con la fuerza de expulsión. Este requerimiento se valora según:
 - Resistencia a la flexión: ASTM D790 – Capacidad de un material de resistir la flexión cuando se somete bajo tensión.
 - Módulo de flexión: ASTM D790 – Tensión máxima de flexión que se puede aplicar antes de la ruptura.
- Estanqueidad: evitar porosidad en la placa inferior que pueda afectar al proceso de succión.
- Resistencia a la temperatura: la pinza en la fase de agarre de las piezas está sometida a una temperatura de unos 30°C aproximadamente.
- Mecanizado: el material escogido debe permitir el mecanizado de machos roscados para el ensamblaje de las piezas.

En fabricación aditiva los materiales se caracterizan según su orientación en la bandeja de impresión, ya que sus propiedades mecánicas varían significativamente, siendo el

plano XZ la bandeja de impresión. En el caso del policarbonato las propiedades mecánicas se observan en la Tabla D.1:

Tabla D.1: Propiedades mecánicas del policarbonato comercializado por Stratasys. Fuente: Stratasys.

Propiedad mecánica	XZ (On Edge)	ZX (Upright)
Resistencia a la flexión ASTM D790	89 MPa	68 MPa
Módulo de flexión ASTM D790	2.006 MPa	1.800 MPa

El robot en cuestión es capaz de soportar cargas de hasta 6 kg y según un estudio de masas la suma de pesos de la pinza robótica y la pieza superan la carga máxima, suponiendo que se fabrica en aluminio 3.003. De aquí surge la necesidad de la utilización de otros materiales, diseños o procesos de fabricación que consigan el objetivo de reducción de peso. El principal reto es aplicar tecnologías de fabricación aditiva para la manufactura de una pinza robótica como alternativa al mecanizado de aluminio. De esta forma, es posible reducir el peso e impactará en el funcionamiento del robot proporcionando reducciones de inercias y esfuerzos por parte de los servomotores. Seguidamente se ha realizado un estudio comparativo de las diferentes tecnologías y materiales más adecuados:

- Fabricación convencional
 - Mecanizado (CNC)
 - Aluminio 3003 (Al3003)
- Fabricación aditiva
 - Estereolitografía (SLA)
 - Resina (DSM SOMOS)
 - Sinterizado laser (SLS)
 - Poliamida reforzada con fibra mineral (PA+FV)
 - Deposición de hilo fundido (FDM)
 - Ultem 1010 (U1010)
 - Policarbonato (PC)

Se debe tener en cuenta, que tanto SLS como SLA permiten la fabricación de entramados internos, pero es necesario realizar unas perforaciones en el diseño para la salida de resina (SLA) o polvo polimérico (SLS) ya que por la naturaleza de fabricación permanece en el interior de la estructura. Estas perforaciones permiten extraer el material, aunque dificulta el proceso, además de que impacta en el coste del utillaje de todas formas ya que no se puede reciclar.

Todas las alternativas contempladas anteriormente son técnicamente viables, pero cabe destacar algunos aspectos en el postproceso:

- CNC: las piezas mecanizadas mediante control numérico son totalmente funcionales al salir de máquina.
- SLA: posteriormente a la sinterización de la resina es requerido un curado ultravioleta en horno, la extracción manual de los soportes y la inserción de insertos metálicos helicoidales 1/8” rosca gas.
- SLS: es necesario la limpieza del polvo sobrante y la inserción de insertos metálicos helicoidales 1/8” rosca gas. Al ser un material poroso, la placa inferior tiene que ser infiltrada con resina epoxy para cerrar los poros.
- FDM: se deben extraer los soportes, en este caso solubles en agua, y la inserción de insertos metálicos helicoidales 1/8” rosca gas. Al ser un material poroso, la placa inferior tiene que ser infiltrada con resina epoxy para cerrar los poros.

Se han ofertado todas las anteriores alternativas teniendo en cuenta el postproceso y suponiendo que el diseño es totalmente macizo, tal como se muestra en la Tabla D.2.

Tabla D.2: Tabla comparativa de los diferentes procesos de fabricación del diseño macizo. Fuente: Propia.

Propiedades mecánicas	Fabricación convencional		Fabricación aditiva		
	CNC	SLA	SLS	FDM*	
	Al3003	DSM SOMOS	PA+FV	U1010	PC
Resistencia Flexión (MPa) ***	130	67,8	37	144	89
Módulo Flexión (MPa) ***	69.500	2.222	3.106	2.820	2.006
Densidad (g/cm ³)**	2,73	1,16	1,49	1,34	1,2
Peso (g)	3.170,38	1.347,12	1.730,35	1.556,16	1.393,57
Coste (€)	3.700,00	1.612,14	1.105,80	1.505,76	975,00

*Altura de capa 330 micras (orientación XZ) **ASTM D792 ***ASTM D790

En referencia a las propiedades mecánicas, los termoplásticos contemplados en FDM tienen una resistencia a la flexión similar a la del aluminio. Mientras que el aluminio 3.003 tiene un módulo de flexión mucho mayor en comparación al resto de materiales. Aun así, la propiedad mecánica más importante es la resistencia, ya que lo que se debe evitar es el inicio de la flexión, no la rotura ante un esfuerzo de flexión.

Comparando los resultados, la solución más económica es la tecnología FDM obteniendo un ahorro de un 74% respecto a la fabricación convencional. Cabe destacar que no siempre la tecnología FDM es la más económica, existe una dependencia directa con la geometría. En este caso, al ser una pieza de grandes dimensiones, el sinterizado laser de poliamida no es una buena opción por las elevadas contracciones del propio material, para contrarrestar esto, la pieza se orienta de forma vertical en la bandeja de impresión evitando así grandes contracciones, y consecuentemente el coste de

fabricación aumenta. En cuanto al peso de las piezas se ha reducido de 3,1kg a más de la mitad, esto corresponde a una reducción de peso del 56%.

Aprovechando las ventajas de la fabricación aditiva y concretamente las de la tecnología FDM, se ha implementado estructuras ligeras en el diseño con el fin de conseguir de optimizar el diseño y su coste. Para ello, se recurre a la modificación de los parámetros de impresión. Entre los parámetros de impresión más característicos, cabe destacar:

- Altura de capa: según estudios aumentar la altura de capa influye directamente en la resistencia de la pieza.
- Entramado interno: existen varias configuraciones de entramado, siendo así un aspecto importante que considerar [119].
- Porcentaje de relleno: el porcentaje de vacío o air gap tiene un papel muy importante en el comportamiento mecánico de la pieza [120].
- Velocidad de impresión: la velocidad influye directamente en la precisión de fabricación, ya que las inercias de los extrusores son mayores.
- Temperatura de impresión: la unión de filamentos afecta en la resistencia de la parte impresa [121].

La superficie exterior de ambas piezas está totalmente rellena por un armazón o *shell*, pero el interior se compone de un entramado interno o *infill*, tal como se observa en la Figura D.2. En las perforaciones donde se posicionarán los tornillos pasantes y las salidas de aire, están reforzados con material ya que se prevén esfuerzos mecánicos.

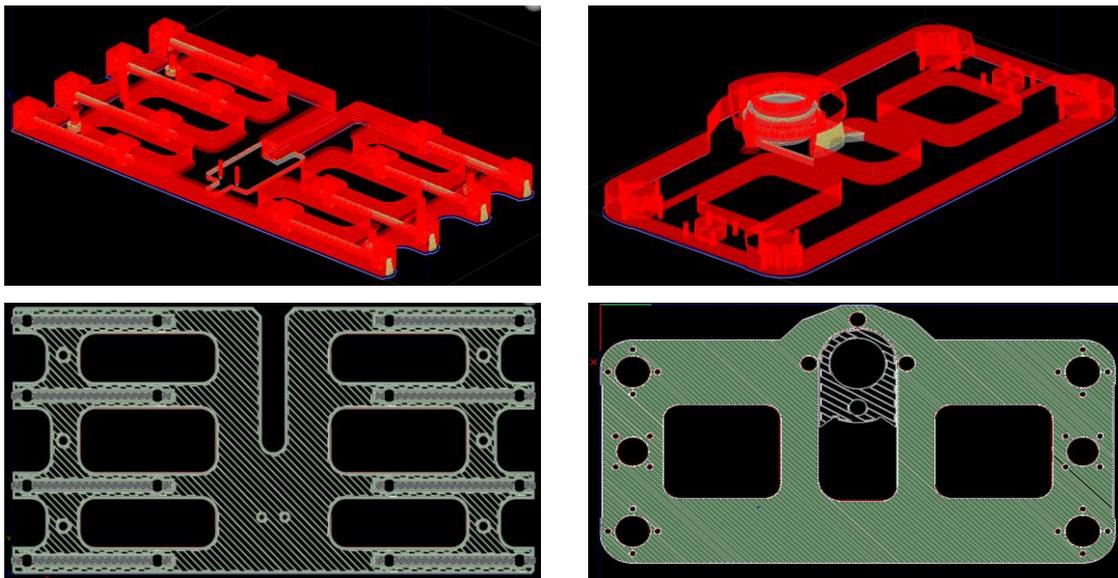


Figura D.2. Simulación de la impresión. Fuente: Propia.

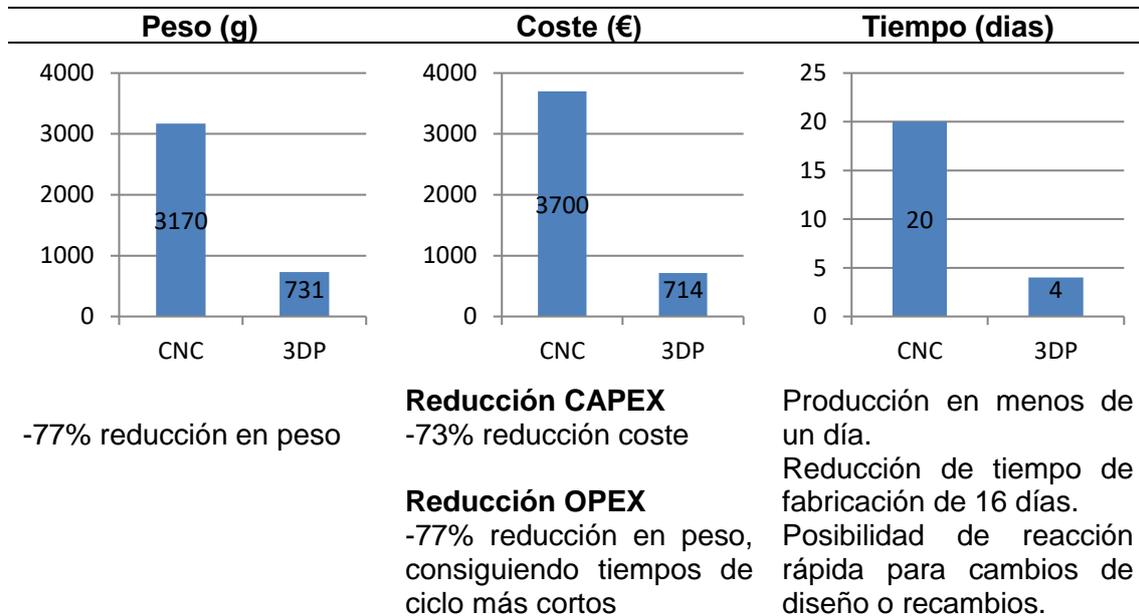
En la Tabla D.3 se muestran tabulados el coste y peso de las piezas macizas y con estructura interna.

Tabla D.3: Comparativa de costes. Fuente Propia.

Parámetros	FDM (Estructura interna)		FDM (Macizo)	
	U1010	PC	U1010	PC
Peso (g)	809,90	731,00	1.556,16	1.393,57
Coste (€)	1.006,61	714,80	1.505,76	975,00

Lógicamente, las propiedades mecánicas de la mano robótica optimizada serán diferentes al diseño totalmente macizo, ya que al reducir masa en el modelo se pierde rigidez. Valorando el coste de fabricación con las prestaciones del material, se ha decidido fabricar las piezas en policarbonato con la tecnología FDM y el entramado interno. Así, se ha conseguido una reducción de coste de más de un 27% y una reducción de peso de 48%. En la Tabla D.4 se ha comparado la fabricación convencional con la fabricación aditiva en términos de peso, coste y tiempo.

Tabla D.4: Análisis de los resultados obtenidos respecto el original. Fuente: Propia.



Anexo E: Customización de un robot

La capacidad de la personalización masiva mediante tecnologías de fabricación aditiva es una realidad, permitiendo realizar productos diferentes en el mismo volumen de trabajo sin penalizar el coste. Este hecho da solución a una de las principales tendencias actuales en el desarrollo de productos de alto valor añadido, la customización masiva.

Los robots de piscina es un ejemplo de ello ya que son susceptibles de cambios en el diseño según los requerimientos del cliente final, pudiendo elegir los colores y el modelo según gustos o aplicaciones. La fabricación avanzada puede aportar valor añadido a este tipo de productos mediante personalizaciones que puede decantar a un cliente en la compra de un robot de piscina. La utilización de tecnologías convencionales para realizar algunas personalizaciones en piezas plásticas es técnicamente posible, pero económicamente inviable para el cliente.

Este caso de estudio pretende discutir la viabilidad de realizar personalizaciones mediante tecnologías de fabricación avanzada de forma directa. Para llevar a cabo el estudio se han escogido las dos piezas más sensibles a la customización del robot que son las que se observan en la Figura E.1.

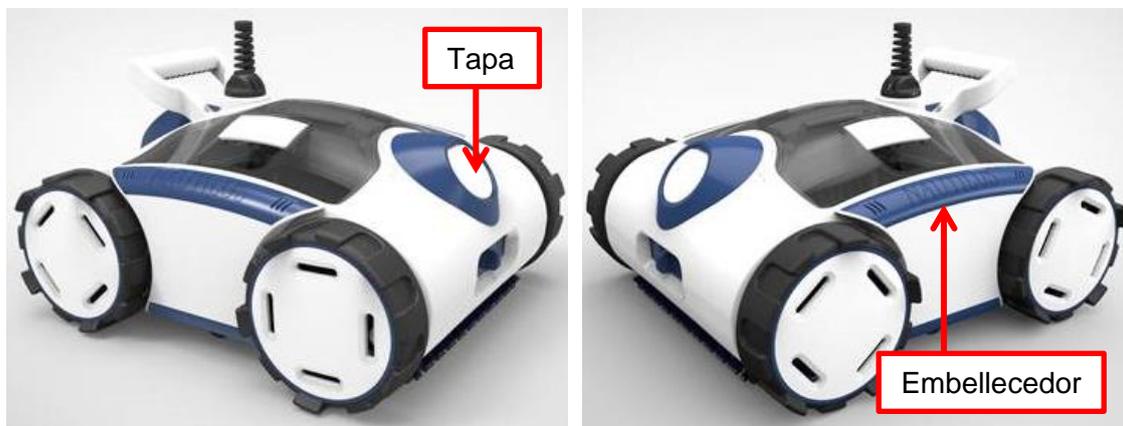


Figura E.1. Piezas susceptibles a la personalización de un robot. Fuente: Propia.

Dichas piezas se fabrican mediante inyección de plásticos y por esto es necesario la incorporación de utillajes (moldes de inyección). La modificación de estas piezas mediante tecnologías convencionales de fabricación es posible realizando modificaciones en el utillaje o realizando insertos metálicos con la personalización del cliente. Asimismo, parece un proceso sencillo, pero conlleva una serie de desventajas que se enumeran a continuación:

- El mecanizado del inserto es relativamente caro y consecuentemente el coste de la pieza aumenta.

- Una vez se han realizado las inyectadas suficientes para cumplir con la demanda del cliente, el inserto metálico queda inutilizado.
- Un nuevo inserto metálico supone un incremento de costes en la gestión y en el almacenamiento.
- La complejidad de la personalización puede llevar problemas de atrapamiento de aire y refrigeración en el proceso de inyección.
- Los parámetros de inyección de plástico cambian respecto a la pieza sin personalizar, suponiendo un coste de personal y material en los ensayos de inyección.
- La inyección de plástico, por lo general, admite un tipo de material, es decir que solamente se puede personalizar la pieza con un grabado de un mismo color.
- El inserto metálico conlleva una modificación en la cavidad del molde y consecuentemente, posibles rebabas en las piezas.

Sin embargo, las tecnologías de fabricación aditiva pueden aportar un nuevo enfoque a la personalización en masa, dando respuesta a pequeñas producciones de piezas por las razones siguientes:

- Es posible prescindir de utillajes con el consiguiente ahorro de inversión inicial, gestión y almacenamiento.
- La producción mediante tecnologías de fabricación aditiva sigue dos filosofías ideales para la personalización: *Just In Time* y *Manufacturing On Demand*.
- Existe la posibilidad de realizar piezas o personalizaciones multicolor aportando un valor añadido al producto.

La tapa del robot actualmente se inyecta en silicona y simplemente es una compuerta que sufre una flexión cuando el robot está en funcionamiento. Específicamente, el robot para poder moverse en el fondo de la piscina utiliza la fuerza de propulsión que proporcionan las aspas de una hélice. Cuando los motores de las hélices están en funcionamiento, dicha tapa se abre para dejar paso a un chorro de agua. Además de resistir la flexión, el material debe resistir la acción del cloro y los rayos UV. Para la personalización de la tapa se ha realizado un diseño y una impresión con la tecnología PolyJet multicolor y multi-material mediante una de las pocas máquinas que pueden hacerlo por el momento, la J750 de Stratasys. Esta tecnología es capaz de imprimir con diferentes materiales (rígido y flexible) y con múltiples colores, incluyendo el transparente. En la Figura E.2 se muestra el diseño realizado, donde hay un grabado del logo de la empresa en diferentes colores y con relieve. Con tecnologías de fabricación convencionales, sería muy difícil o imposible poder fabricar este diseño,

además de no ser viable en términos económicos para una producción de bajas unidades. Este avance puede aportar mucho valor al producto, ya que se puede diferenciar de los demás.



Figura E.2. Diseño para la personalización de la tapa. Fuente: Propia.

En la Figura E.3 se muestran los prototipos fabricados, la tapa de la izquierda está fabricada mediante resinas rígidas mientras que la de la derecha está fabricado mediante resinas flexible.



Figura E.3. Personalización de la tapa mediante PJ. Fuente: Propia.

Tal como se observa, los colores son muy vivos en comparación con otras tecnologías multicolor, como es BJ. A nivel estético el resultado es satisfactorio, pudiendo incluso realizar algún postproceso para tener una calidad superior. Sin embargo, como trabajo de futuro se debería estudiar en profundidad los efectos del material en condiciones normales dentro de una piscina. Sin embargo, se puede constatar con algunos estudios [107], [122] que existe envejecimiento provocado por efecto el Sol y el agua y esto afecta directamente al aspecto y las propiedades mecánicas de las resinas fotosensibles. Por esto, si se quisiera industrializar es conveniente aplicar recubrimientos que corrijan los factores de envejecimiento para conseguir que el producto sea durable.

Referente al embellecedor, actualmente se inyecta en ABS modificado para resistir el contacto con el cloro y los rayos UV. Durante el montaje, esta pieza se asegura al chasis

mediante un engarce que centra e inmoviliza la pieza en la posición correcta. Se trata de una pieza vista y por ello debe tener un aspecto superficial adecuado. Se ha fabricado aditivamente el embellecedor mediante tecnologías de lecho en polvo, concretamente SLS y para conseguir el acabado requerido, se ha realizado un pintado. En la Figura E.4 se muestra la pieza inyectada en la parte superior y la personalización fabricada aditivamente en la parte inferior.



Figura E.4. Embellecedor inyectado (superior) y personalización (inferior). Fuente: Propia.

Estos casos de estudios son meramente un ejemplo de personalización masiva que aporta valor al producto y lo diferencia del resto. La fabricación aditiva, como se ha comentado anteriormente, es una tecnología de bajos volúmenes ideal para este tipo de aplicaciones.

Anexo F: Bomba hidráulica

Este caso de estudio pretende ilustrar sobre la fabricación de piezas con altos requerimientos funcionales, en este caso una bomba hidráulica. El objetivo principal de este caso es el diseño y fabricación de una bomba auto aspirante para el sector de la piscina privada siguiendo las siguientes características:

- La potencia del motor tiene que ser de 1 CV y 1500 rpm, para conseguir buenos resultados en términos de eficiencia y ruido.
- El nivel sonoro no tiene que sobrepasar los 54 dBA.
- La eficiencia total de la bomba tiene que sobrepasar el 45%.

Seguidamente se enumeran las normativas que debe cumplir:

- Directiva de seguridad de máquinas 2006/42/CE.
- Directiva de compatibilidad electromagnética 2004/108/CE.
- Directiva de equipos de baja tensión 2006/95/CE.
- Directiva de emisión sonora 2000/14/EC.
- Directiva de materiales peligrosos en productos eléctricos RoHS, 2002/95/EC.

Los materiales que se utilizan en la industrialización de las bombas hidráulicas son plásticos reforzados con fibra de vidrio ya que tienen una gran estabilidad dimensional e hidrolítica, e incluso a elevadas temperaturas. Se ha utilizado tornillería inoxidable AISI-316 y sello mecánico tipo FG con calidades AISI-316, carburo de silicio y EPDM como elastómero. El motor utilizado está dentro de la plataforma de 1 CV, de 4 polos ($n=1.500\text{rpm}$), servicio continuo S1, aislamiento clase 155, grado de protección del motor IP 55, rodamientos tipo 2RS C3, normalizado IEC con la configuración de brida de aluminio B5, eficiencia IE2 y alimentado con 230/400V. Las conexiones son roscadas según ISO 228-1, tal como se observa en la Tabla F.1.

Tabla F.1. Conexiones de aspiración e impulsión de la bomba a diseñar. Fuente: Propia.

Conexión aspiración bomba		Conexión impulsión bomba	
G2-3/4	Tubería D63	G2-1/4	Tubería D50

Después de la simulación de elementos finitos (CFD – *Computational Fluid Dynamic*) y de rediseño se ha realizado una propuesta que se ha materializado mediante fabricación aditiva. En la Figura F.1 se muestra el diseño de la bomba hidráulica que se ha realizado.



Figura F.1. Propuesta de diseño para una bomba hidráulica de 1 CV. Fuente: Propia.

Posteriormente se han fabricado todos los componentes principales de la bomba: el cuerpo, la brida, el rodete y el difusor, es decir, las piezas plásticas. No se han contemplado elementos mecánicos: sellos mecánicos, tornillería, motor, etc. Además, las piezas vistas se han pintado para obtener un mejor resultado, tal como se observa en la Figura F.2.



Figura F.2. (a) Piezas impresas y pintadas. (b) Ensamblaje total de la bomba hidráulica. Fuente: Propia.

Actualmente los rodetes de bomba se fabrican en dos piezas por inyección y posteriormente se realiza una soldadura por ultrasonidos para unir ambas partes, tal como se observa en la Figura F.3.



Figura F.3. Proceso de fabricación de los rodetes de bomba. Fuente: Propia.

Por causa de las limitaciones en el moldeo por inyección, el rodete está sometido a tener un diseño que no es el óptimo para conseguir un alto rendimiento hidráulico, y consecuentemente, un ahorro energético. Sin embargo, durante el proceso de ensamblado surgen otros problemas que afecta al buen funcionamiento de la bomba. En primer lugar, cuando se realiza la soldadura por ultrasonidos ambas piezas son sometidas a una fuerza de compresión, dando lugar a la deformación de los alabes perdiendo las dimensiones originales del diseño. En segundo lugar, los directores de energía en el momento de la soldadura generan unas pequeñas rebabas que pueden afectar al rendimiento de la bomba, pudiendo incluso crear micro cavitaciones. Una vez realizado el ensamblaje, es necesario un mecanizado posterior para garantizar las cotas críticas y la concentricidad. Una de las razones por la que es requerido el mecanizado es porque en la soldadura por ultrasonidos las piezas se someten a una vibración provocando desviaciones en las dimensiones. Se ha fabricado mediante MJF dicho rodete en una sola impresión evitando la flexión de los álabes y la creación de rebabas en el diseño, así se han evitado algunos de los problemas que presentan los procesos de fabricación convencional.

Una vez realizado el ensamblaje de las piezas impresas, se ha ensayado la bomba hidráulica en los bancos de prueba para extraer las curvas características y analizar el rendimiento y el comportamiento del prototipo en condiciones de uso. Las condiciones de ensayo utilizado se especifican a continuación:

- Diámetro de succión: 57,5 mm.
- Diámetro de descarga: 45,1 mm.
- Diferencial de altura: 0,3 m.

Para caracterizar el comportamiento de la bomba según el caudal se han obtenido las curvas características de la presión y la eficiencia en función del caudal. En primer lugar, se grafican el caudal proporcionado en función de la pérdida de carga superada. En la

Figura F.4 se presenta la eficiencia de la bomba, es decir, la potencia consumida por el motor (P1) respecto a la potencia hidráulica proporcionada (P2).

En el caso de las bombas de piscinas se busca que el punto óptimo este situado a 10 m.c.a que es la pérdida de carga que supone un filtro en una instalación de piscina, no teniendo en cuenta el resto de la instalación porque se supone que es insignificante.

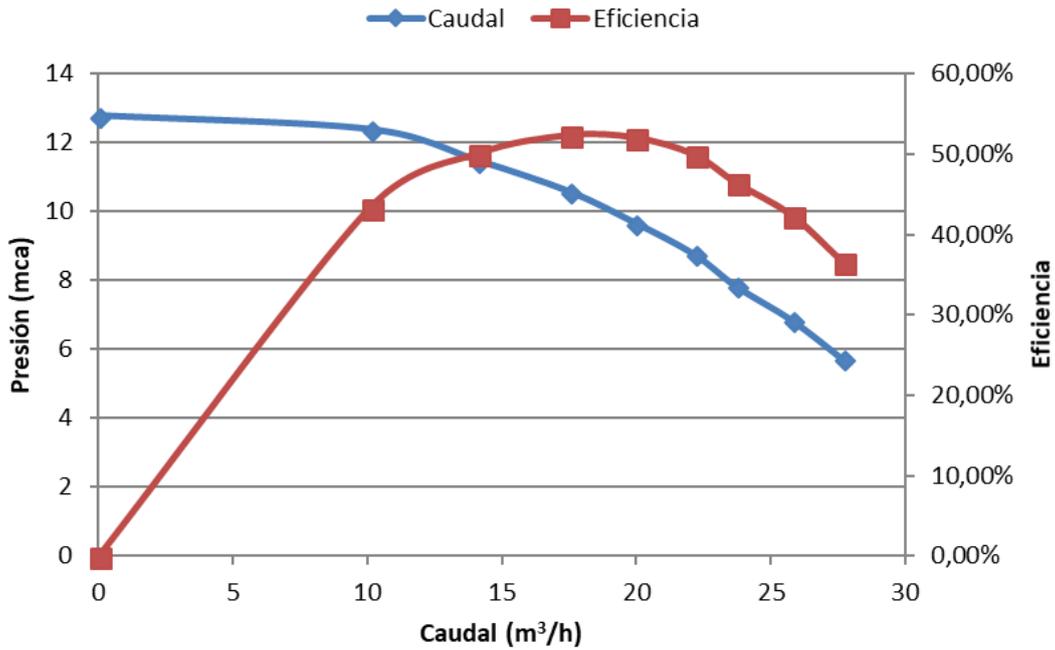


Figura F.4. Curvas características de la bomba hidráulica fabricada. Fuente: Propia.

También se ha graficado la potencia consumida respecto el caudal proporcionado por la bomba hidráulica, que se muestra en la Figura F.5.

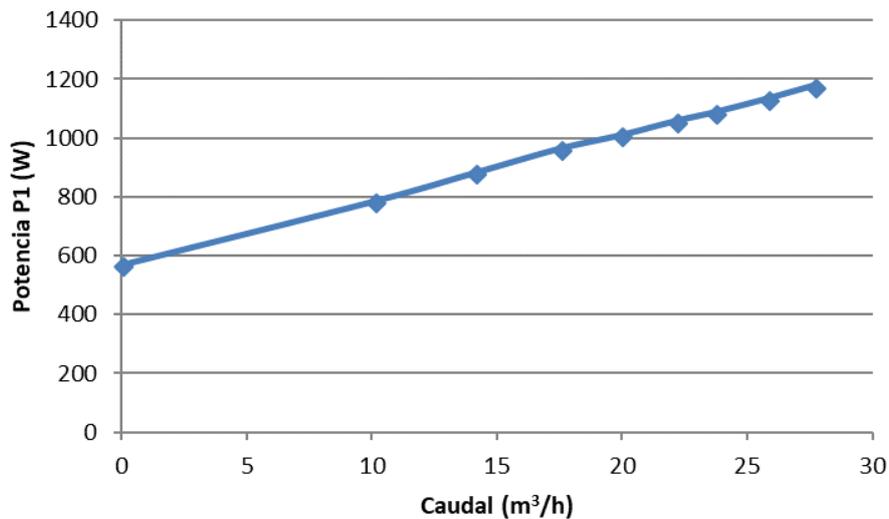


Figura F.5. Potencia consumida respecto el caudal proporcionado. Fuente: Propia.

En la Tabla F.2 se muestra para el punto de trabajo establecido, en dicho sector 10 m.c.a, cuáles son los valores de potencia, caudal y eficiencia.

Tabla F.2. Valores característicos para el punto de trabajo de 10 m.c.a. Fuente: Propia.

Caudal (m³/h)	Presión (m.c.a)	Potencia consumida P1(W)	Potencia hidráulica P2 (W)	Eficiencia total (%)
19	10	989	518	52,4

En la Tabla F.3 se han comparado los parámetros principales claves con los valores nominales u objetivos y el ensayo real.

Tabla F.3. Valores objetivos contra los valores del ensayo. Fuente: Propia.

Parámetros	Simulación	Ensayo
Q @ H= 10m	≤ 16 m ³ /h	19 m ³ /h
Presión de cierre	≥ 15 m	12,8 m
Potencia P1	≤ 1.000 W	989 W
Eficiencia total	≥ 45,7 %	52,4 %

Los resultados obtenidos son los esperados para el caudal, la potencia y la eficiencia. No obstante, para la presión de cierre el valor está por debajo al nominal. Por ello, se han realizado algunas iteraciones en el diseño del rodete para conseguir alcanzar los valores nominales. Gracias a la manufactura digital, todas las iteraciones en el diseño que se realizan durante la etapa de diseño impactan directamente en la fabricación de los prototipos y no sobre modificaciones de moldes, donde el coste asociado es menos económico.

Anexo G: Válvula de bola

El objetivo de dicho estudio es mostrar, con un caso industrial, como la tecnología MJF puede alcanzar los requerimientos necesarios para fabricar prototipos funcionales o pequeñas series de productos sometidos a presiones. La estanqueidad y los esfuerzos de presión es un tema clave que muchas tecnologías no pueden alcanzar, ya sea por las propiedades mecánicas o por su estructura porosa del material. El propósito de esta sección es mostrar la necesidad de fabricar piezas con tecnologías aditivas que aseguren la estanqueidad para la industria de canalización de fluidos a presión. El parámetro significativo y causante de la carencia de estanqueidad es la porosidad de la estructura del material generada en el proceso de fabricación. En aplicaciones donde el objeto está bajo presión, se suele aplicar un recubrimiento o una infiltración en las piezas impresas. De esta forma, se sella el material y se asegura que no existan fugas a través de la porosidad del material [105].

Tecnologías como FDM o SLS, por la naturaleza del proceso de fabricación crean porosidades localizadas entre las capas, y por ello, las piezas impresas no están completamente selladas. Además, esta porosidad interna en el material genera alteraciones en las propiedades mecánicas [123]. Las piezas resultantes de SLS no son totalmente densas, aunque se pueden conseguir bajos grados de porosidad a través de un ajuste en los parámetros de fabricación [106]. La Figura G.1 muestra una comparación de las propiedades mecánicas entre SLS y MJF realizado bajo el estándar ASTM D638, tipo I.

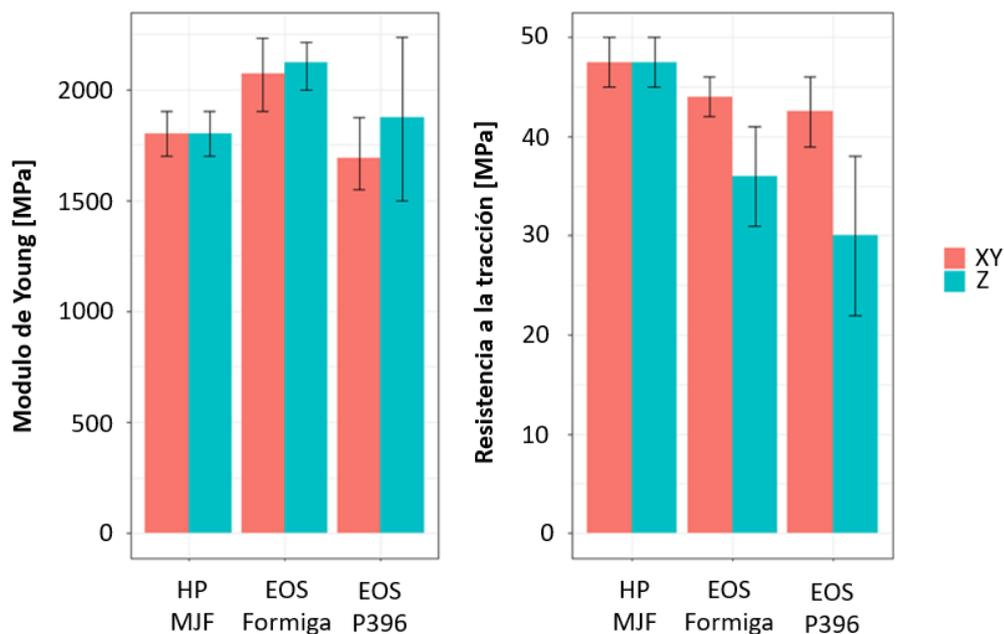


Figura G.1. Comparación de las propiedades mecánicas para PA12 con SLS y MJF. Fuente: Propia.

En el anterior caso, se comparan los resultados obtenidos por dos máquinas diferentes de sinterizado selectivo (Formiga y P396) con la tecnología MJF [124]. En ambos casos, se caracterizan el comportamiento de la PA12 para las diferentes orientaciones de impresión, en el plano XY y en la dirección Z. En el caso de MJF, se observan desviaciones constantes y reducidas. Sin embargo, en el sinterizado convencional dichas desviaciones varían en función de la orientación de impresión y presentan una gran incertidumbre en términos de repetividad causados por la estructura porosa interna [125]. Dicha porosidad es generada por defectos en la sinterización del material, donde algunos granos no se fusionan, causando espacios libres en la posterior etapa de enfriamiento [108]. Existen diferentes tipos de porosidad: los poros irregulares causados por la contracción y las partes no fusionadas y la porosidad esférica que provienen de la evaporación de gases atrapados en el material [126]. En la Figura G.2 y la Tabla G.1 se muestra un estudio de porosidad y densidad realizado en la sección transversal de probetas de tracción de tipo V para SLS y MJF [127].

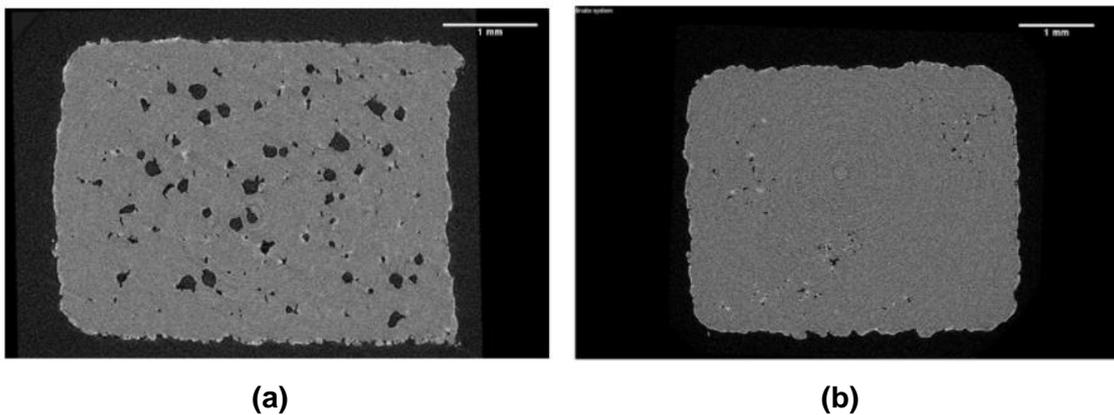


Figura G.2. (a) Piezas impresas con PA12 con SLS. (b) Piezas impresas con MJF en PA12. Fuente: [127].

Tabla G.1. Resultados obtenidos de la porosidad y material para SLS y MJF. Fuente: [127].

Propiedades	SLS PA12	HP 3D High Reusability PA12
Densidad (g/cm ³)	0,9-0,95	1,01
Porosidad (%)	5,3	0,5

En contraste, las tecnologías basadas en resinas fotosensibles como SLA o PJ no generan porosidades en su estructura interna. Las resinas utilizadas son formuladas a partir de grupos acrilato que ayudan a la rápida reacción y los grupos epoxi que proporcionan buenas propiedades mecánicas al material [126]. El principal problema de las tecnologías basadas en resinas es que no son adecuadas para la manufactura de piezas finales. La degradación de las resinas durante el paso del tiempo afecta directamente a las propiedades mecánicas, siendo no muy utilizado como solución final pero muy recomendada en las etapas de diseño [128];[107]. Además, este tipos de

resinas en contacto con agua o humedad pueden hincharse, deformando la parte resultante y perdiendo las tolerancias de fabricación [122].

Existen diferentes métodos para sellar piezas fabricadas por SLS y FDM. La elección depende de diferentes factores como son los costes, la maquinaria y el tiempo de proceso entre otros. Dicho proceso tiene un impacto directo en el tiempo invertido por parte, y consecuentemente, en el coste. Por lo tanto, cuando una parte se analiza en términos económicos y se requiere de un tratamiento de sellado, dicha pieza en muchas ocasiones se reemplaza por tecnologías convencionales de transformación de plásticos por el alto coste industrial. Los métodos más utilizados de sellado en fabricación aditiva se detallan a continuación [129]:

- **Pintado y rellenado:** cuando las piezas solamente necesitan ser selladas superficialmente, se suele enmasillar y posteriormente pintar. Se trata de una operación manual, siendo la precisión y la calidad del producto final significativamente influenciado por las habilidades del técnico. Entre las ventajas que aporta dicho método destacan el carácter económico, tiempo de ciclo corto y facilidad en su aplicación. Las desventajas son que estos tratamientos no resisten las altas temperaturas ni los ataques químicos, y, además, no sella suficientemente el material para conseguir hermeticidad con aire.
- **Estación de suavizado:** Este método sella las superficies de la parte mediante la exposición de vapor en una cámara cerrada. La estación de suavizado es muy fácil de usar y conserva la integridad dimensional [130]. Su uso es limitado a aplicaciones con presiones que no excedan la atmosférica y temperaturas por debajo de los 100°C. Dicha técnica solamente sella los poros superficiales, pero no los canales internos. Si el sellado del interior es requerido se debe combinar con una infiltración previa.
- **Infiltración de disolvente:** Infiltrar piezas impresas en un disolvente puede substituir el proceso de la estación de suavizado, cuando éstas exceden en dimensiones la capacidad de la cámara. Los resultados obtenidos por infiltración son muy similares a los de la estación de suavizado excepto la conservación de la precisión dimensional. El disolvente actúa de forma rápida y agresiva sobre el material sin tener control sobre las dimensiones. Tal como la estación de suavizado, el uso de este método está limitado a aplicaciones de baja temperatura y presiones atmosféricas.
- **Recubrimientos e infiltraciones con adhesivos:** Son sustancias basadas en formulaciones epoxi con diferentes viscosidades. Los adhesivos con altas viscosidades se suelen aplicar para realizar recubrimientos sobre las piezas

impresas. Mientras que los adhesivos con poca viscosidad son utilizados para realizar infiltraciones mediante cámaras de vacío para asegurar la entrada del adhesivo en el interior de las piezas y teniendo un control sobre el tiempo de procesado [131]. Aplicando estos tipos de resinas sobre piezas fabricadas con tecnologías de SLS y FDM se puede conseguir resistencias a la presión que pueden alcanzar los 4,5 bar (65 psi) [132].

El caso de estudio presentado en este apartado es la fabricación de una válvula existente mediante MJF con PA12 como material. Específicamente, es una válvula de bola diseñada para aislar el paso de un líquido en un sistema de conducción de fluidos siguiendo la norma EN ISO 16135:2007 [133] de acuerdo con la directiva 97/23/EC. En términos de presión, dicha válvula está catalogada como PN10 (145 psi), este parámetro se usa como referencia de su resistencia mecánica y corresponde a la máxima presión de agua a 20°C para la cual ha sido diseñada. Las características de la válvula se muestran en la Figura G.3 y la Tabla G.2.

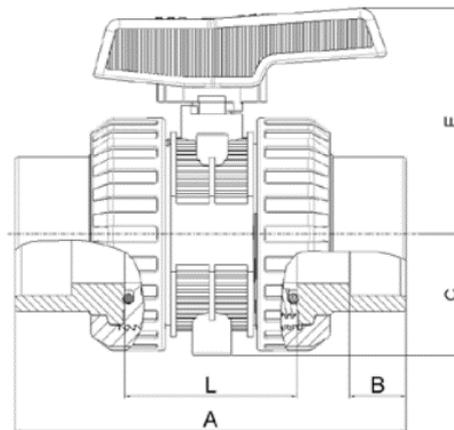


Figura G.3. Esquema de la válvula ensamblada. Fuente: [134].

Tabla G.2. Dimensiones de la válvula utilizada en el caso de estudio. Fuente: [134].

DN	A	B	C	E	L
75	278±2 mm	53 mm	88,5 mm	153 mm	140 mm

Con objetivo de simplificar las principales piezas de la válvula (cuerpo y tuercas) han sido considerados para ser impresos con MJF (11 y 3, correspondientemente), que se observa en la Figura G.4 y la Tabla G.3. Estas piezas forman parte de la cobertura exterior, que soportan dos orígenes de presión; la presión ejercida por las partes internas y la presión del fluido.

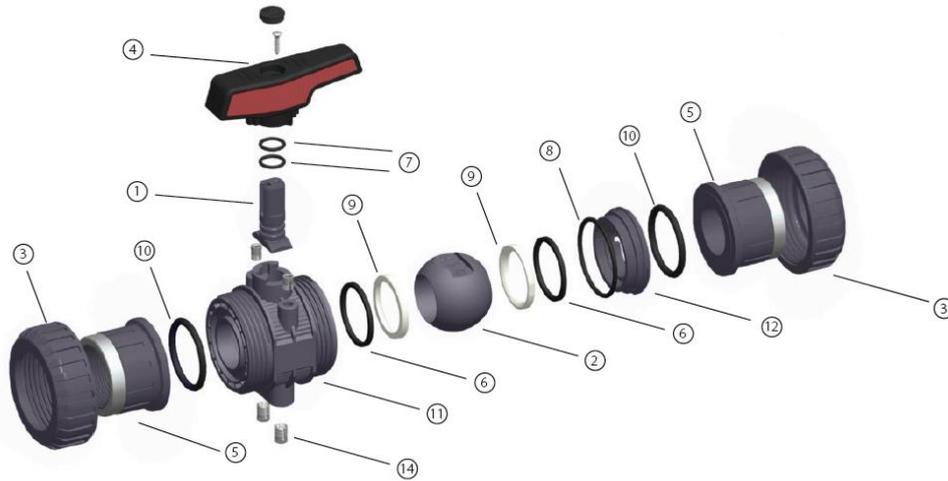


Figura G.4. Vista explosionada de la válvula de bola. Fuente: [134].

Tabla G.3. Lista de piezas de la válvula de bola. Fuente: [134].

Nº	Descripción
1	Eje
2	Bola
3	Tuerca
4	Maneta
5	Manguito enlace
6	Junta amortiguación
7	Junte eje
8	Junta cuerpo
9	Asiento de bola
10	Junta manguito
11	Cuerpo
12	Porta juntas
13	Insertos fijación

Estas piezas han sido validadas con el mismo test de calidad que se realiza en la línea de producción de válvulas industriales, siguiendo la norma ISO 9393 [135]. El cuerpo tiene que resistir la presión de agua y la presión ejercida por las partes internas, y junto a las tuercas enmarcado en la norma ISO 228-1 [136] deben soportar la tensión de tracción causadas por la presión interna de agua.

La metodología utilizada se ha dividido en tres etapas. En la primera etapa, llamada proceso de fabricación, se ha analizado el modelo tridimensional. Se ha parametrizado en la máquina la altura de capa, la orientación y el material utilizado. En la segunda etapa, las dimensiones de las piezas impresas se han verificado utilizando un escáner que compara las dimensiones reales contra las tolerancias permitidas en la producción. En el caso en que no se consiguieran las tolerancias de fabricación, se procederá a la mecanización de las piezas. El ensamblaje completo se ha comprobado mediante un

detector de micro-fugas. Y, por último, se ha validado el producto determinado por los estándares de calidad para válvulas fabricadas en termoplásticos.

Las piezas han sido fabricadas en PA12 con la máquina HP Jet Fusion 4200 con una altura de capa de 0,08 mm en el eje Z con una resolución estándar de $\pm 0,2\%$. Debido a la forma cilíndrica de las piezas, la sección cilíndrica ha sido orientada en el plano XY, donde la resolución es mayor, evitando el efecto escalón causado por un gradiente angular menor a 30° en el eje Z. En la Figura G.5 se muestra la orientación del modelo tridimensional en el espacio de impresión.

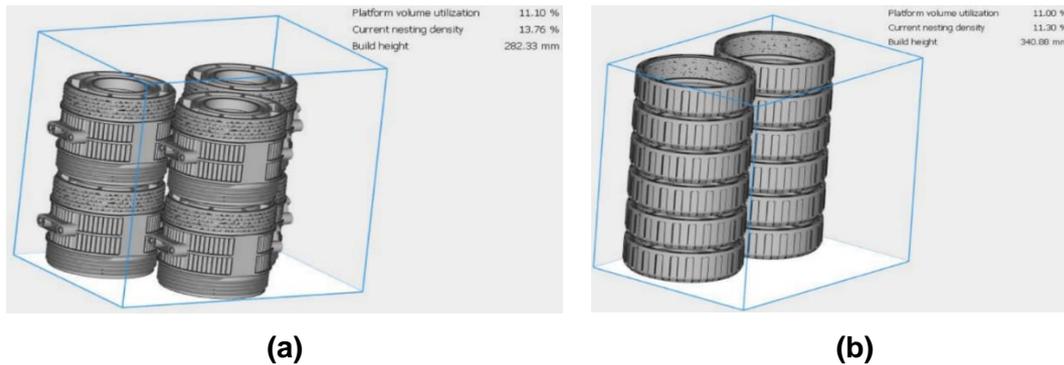


Figura G.5. (a) Orientación del cuerpo, (b) Orientación de las tuercas en el espacio de impresión. Fuente: Propia.

Una vez fabricadas, las piezas han sido analizadas dimensionalmente mediante un escáner 3D (ATOX Scanbox), tal como se observa en la Figura G.6. Obteniendo una curva de distribución de las tolerancias geométricas, cumpliendo con los resultados esperados comparando con la resolución estándar de la máquina de impresión. Ambas piezas son adecuadas en términos geométricos obteniendo resultados entre $\pm 0.3\text{mm}$, siendo no necesario el mecanizado de éstas.

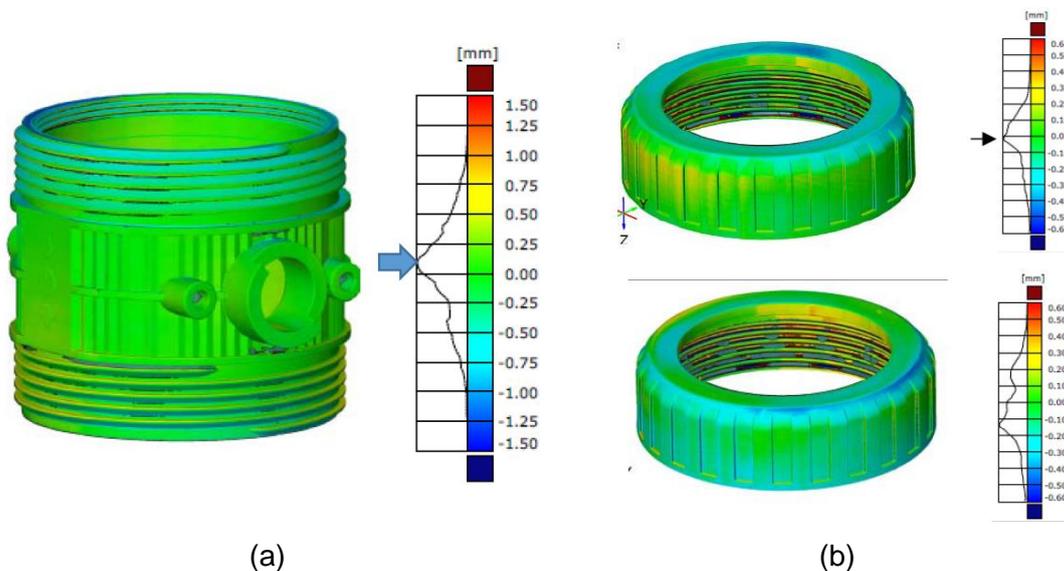


Figura G.6. (a) Análisis geométrico del cuerpo (b) y de las tuercas. Fuente: Propia.

Dado que las piezas han presentado un resultado satisfactorio en cuanto al control de calidad dimensional, se ha realizado el ensamblaje del conjunto para continuar con la validación del producto. Una vez ensamblado, se ha realizado el ensayo de fugas para identificar puntos críticos mediante el microfugómetro, obteniendo resultados positivos ya que la presión permanece constante durante el tiempo.

La validación del producto se basa en la norma ISO 9393, que especifica cuál es el método para ensayar la resistencia a la presión para válvulas industriales cuya finalidad es la de transportar agua o fluidos industriales, excluyendo aplicaciones con gases. En dicha norma se especifican cuatro categorías de ensayos a presión.

1. Test de material: cuyo objetivo es determinar a largo plazo la resistencia del material de fabricación.
2. Test de cuerpo: se verifica el comportamiento de los componentes internos de la válvula manteniendo la presión.
3. Test largo plazo de la válvula completa: el objetivo es verificar que el diseño de la válvula y sus conexiones no afectan negativamente a largo plazo al rendimiento de la válvula.
4. Test de asiento y empaquetamiento: el objetivo es verificar la estanqueidad en el ensamblaje de la válvula.

En este caso de estudio se han realizado las pruebas de cuerpo, el de asiento y empaquetamiento (2 y 4, respectivamente). Estos ensayos proporcionarían información sobre la resistencia y la estanqueidad del material a presión de agua. Para poder desarrollar estas pruebas es necesario disponer de:

- Dispositivos de presión, tal como se especifica en la ISO 1167-1 [137], debe conectarse en la muestra y progresivamente aplicar presión de agua siguiendo los estándares del producto, manteniendo constante una presión entre $\pm 2\%$ durante el tiempo especificado en la ISO 9393-2 [138], preservando la temperatura indicada en el estándar de producto.
- Medidores de presión calibrados que satisfagan las presiones especificadas por el ensayo, evitando en el instrumento polución o suciedad.
- Termómetros para poder verificar la temperatura durante el ensayo.
- Temporizadores que permitan grabar la duración del dispositivo con presión hasta el momento de fallo mecánico o que termine el tiempo total del ensayo.

El procedimiento establecido para el cuerpo de la válvula se especifica a continuación:

1. En primer lugar, la muestra debe llenarse con agua y acondicionarse durante al menos una hora a una temperatura que no se desvíe más de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ de la temperatura de ensayo especificada.
2. Colocar la muestra de prueba en un modo que todo el cuerpo de la válvula esté bajo la presión de prueba.
3. Asegurarse de que la temperatura del agua en el tubo de ensayo se ajusta a la temperatura de prueba especificada.
4. Liberar cualquier aire atrapado dentro de la muestra de prueba.
5. Subir la presión progresivamente para que la presión de prueba especificada en el ISO 9393-2 se alcance lo más rápido posible, pero en no menos de treinta segundos.
6. Mantener la presión y la duración de temperatura especificadas en la norma ISO 9393-2.
7. Disminuir la presión hasta la presión atmosférica.

Los parámetros de la prueba de acuerdo con el material termoplástico de fabricación se especifican en detalle en la ISO 9393-2. El caso de poliamida no ha sido contemplado en la norma. Se han utilizado los parámetros de prueba para el PVC-U, que es el material original de uniones de tuerca y carcasa, siendo la prueba más restrictiva. Los parámetros de prueba del cuerpo se muestran en la Tabla G.4.

Tabla G.4. Parámetros de test para el cuerpo con el material PVC-U. Fuente: [138].

Material	Mínimo tiempo de ensayo	Presión de ensayo (p_{test}) ^a	Estrés de diseño (σ_s) ^b	Temperatura	Fluido	
					Interno	Externo
PVC-U	1 hora	4.2·PN bar	10 MPa	20 \pm 2 °C	Agua	Agua o aire

^a La presión de test se calcula con la siguiente fórmula: $p_{\text{test}}=(\sigma_t/\sigma_s)^c$.

^b σ_t : La deformación de diseño corresponde a la deformación máxima para que no se exceda el límite elástico evitando su deformación plástica (MPa).

^c σ_s : Tensión inducida bajo las condiciones de ensamblaje (MPa).

La prueba del cuerpo se considerará satisfactoria si no se observan fugas o fallas visibles durante el tiempo de ensayo. En caso de que falle una tubería o una conexión, la prueba se considerará nula y se repetirá utilizando una muestra diferente a la anterior.

El procedimiento establecido para la prueba de asiento y empaquetamiento se especifica a continuación:

1. En primer lugar, la muestra debe llenarse con agua y acondicionarse durante al menos 1 hora a una temperatura que no se desvíe más de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ de la temperatura de prueba especificada.

2. Prueba de válvula completamente cerrada:
 - a. Conectar un extremo de la muestra a la línea de presión y el otro extremo a un dispositivo capaz de detectar fugas.
 - b. Llenar la muestra cerrada con el fluido de prueba a la temperatura especificada.
 - c. Liberar el aire atrapado de la muestra de prueba.
 - d. Cerrar la válvula con el par de cierre especificado en la norma del producto correspondiente.
 - e. Aumentar la presión gradualmente hasta alcanzar la presión de prueba especificada en ISO 9393-2, pero no en menos de 30 s.
 - f. Mantener la presión y la duración de temperatura especificadas en ISO 9393-2.
 - g. Verificar la estanqueidad del asiento.
 - h. Reducir la presión a la presión atmosférica.
3. Prueba de válvula total o parcialmente abierta:
 - a. Abrir la válvula hasta tal punto que todas las cavidades y empaquetaduras relacionadas estén sujetas a la presión de prueba.
 - b. Conectar un extremo de la sonda al suministro de presión y cierre el otro extremo.
 - c. Llenar la muestra con el fluido de prueba a la temperatura especificada y luego cierre el flujo corriente abajo de la muestra de prueba.
 - d. Liberar el aire atrapado de la muestra de prueba.
 - e. Aumentar la presión gradualmente hasta alcanzar la presión de prueba especificada en ISO 9393-2, pero no en menos de 30 s.
 - f. Mantener la presión y la duración de temperatura especificadas en ISO 9393-2.
 - g. Verificar el cuerpo y la estanqueidad del empaquetamiento.
 - h. Reducir la presión a la presión atmosférica.

El procedimiento determinado para la prueba de asiento y empaquetado y los parámetros correspondientes se especifican en detalle en ISO 9393-2 y se muestran en la Tabla G.5.

Tabla G.5. Parámetros del ensayo de asiento y empaquetamiento. Fuente: [139].

Tipo de ensayo	Mínimo tiempo de ensayo	Presión de ensayo (p_{test}) ^a	Temperatura	Fluido	
				Interno	Externo
Test de asiento (Válvula cerrada)	DN≤200 = 15 s	1,1·PN ^a bar	20±2 °C	Agua	Aire

Test de
empaquetamiento DN>50 = 30 s 1,5·PN^a bar
(Válvula abierta)

^a Presión máxima (PN+5) bar

En este caso, la muestra de prueba se considerará satisfactoria si no se observan fugas a través del asiento de la válvula y el empaquetamiento durante el tiempo de prueba. En la Figura G.7 se muestran los ensayos realizados en el laboratorio de calidad.



Figura G.7. Ensayo de presión. Fuente: Propia.

En la Figura G.8 se presenta la prueba de cuerpo, en la que la presión aumenta exponencialmente hasta alcanzar el punto de configuración (42 bar) en menos de treinta segundos, tal como dice la norma. El sistema de control de presión actúa sobre la bomba y el multiplicador de presión para disminuir la presión hasta el punto teórico. Por ello, se han programado treinta segundos adicionales, lo que se denomina tiempo de estabilización. Durante este tiempo, la presión aumenta hasta estabilizarse en el punto de configuración. La prueba de una hora comienza cuando la presión y la temperatura son constantes. En este proceso, se observa una pequeña disminución de la presión debido a la expansión del material, ya que a causa de los esfuerzos de presión el material se sitúa en la sección elástica, creando espacios vacíos y, en consecuencia, disminuyendo la presión del sistema. No se han contemplado ninguna desviación en la presión durante el ensayo, sin mostrar ningún tipo de fuga ni explosión.

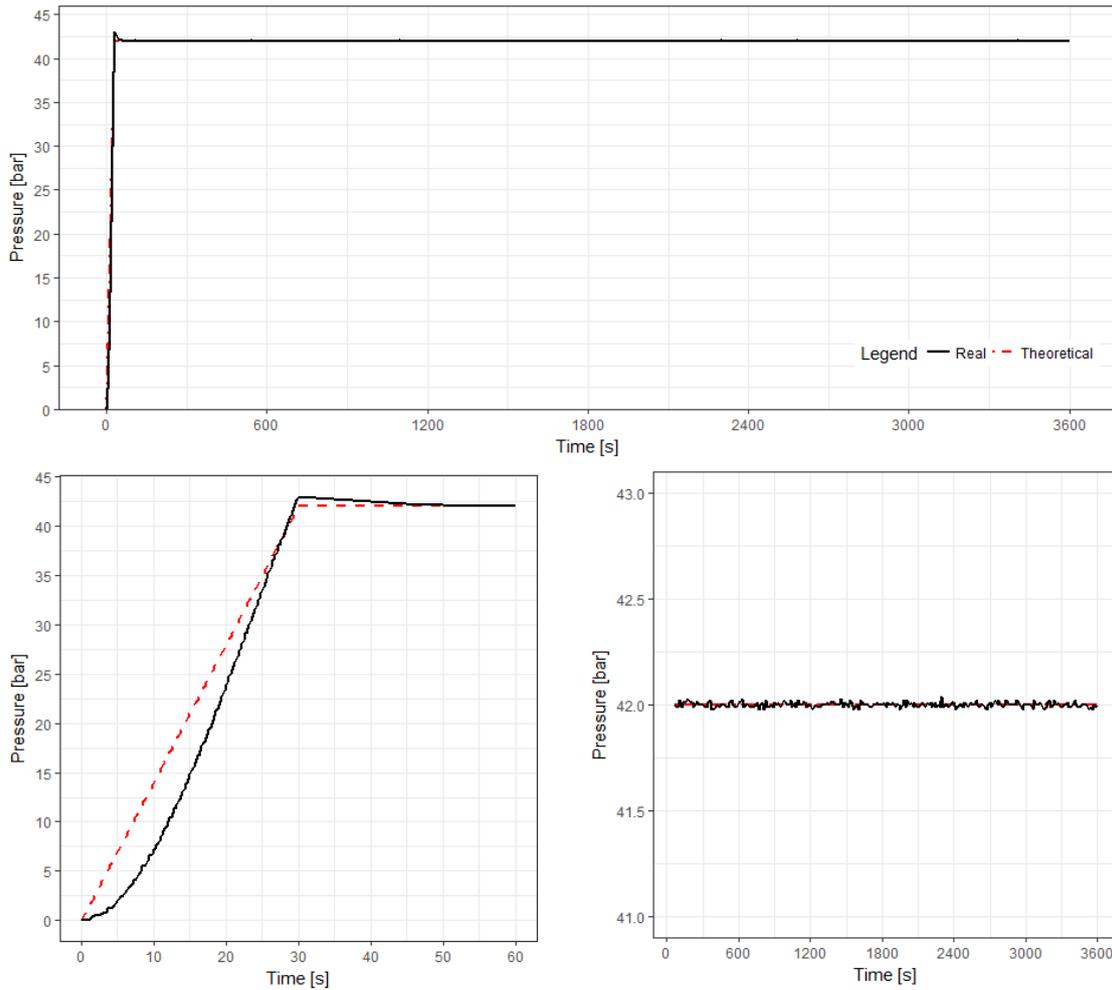


Figura G.8. Resultados del ensayo a presión del cuerpo. Fuente: [109].

En cuanto a los conjuntos de asiento y empaquetamiento, los resultados han sido satisfactorios y se observan en la Figura G.9. Debido a que no existen fugas a través del asiento y el empaquetamiento de la válvula durante el tiempo de prueba. En ambos casos, hay ruido en la medición de presión durante el ensayo a consecuencia del sensor que varía en $\pm 0,03$ bar.

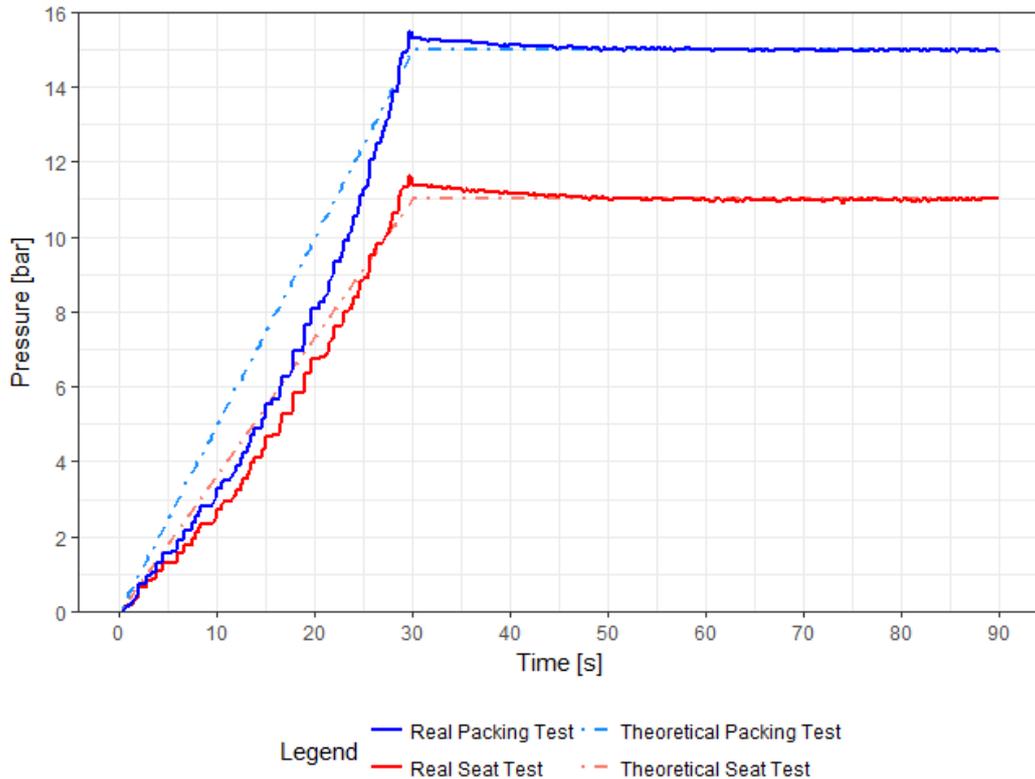


Figura G.9. Resultados del ensayo de presión en el asiento y el empaquetamiento. Fuente: [109].

La tecnología MJF es capaz de abarcar el nicho de mercado tanto del prototipado funcional como de las piezas finales en el ámbito de la conducción de fluidos, pudiendo sustituir a los métodos convencionales de transformación plástica, como el moldeo por inyección de plástico. MJF es una solución que evita el sellado de las piezas impresas como postproceso para lograr la funcionalidad deseada. Los sellados en forma de recubrimiento o infiltración solo admiten presiones con un máximo de 4,5 bar (65 psi) mientras que con tecnología MJF se han logrado hasta 42 bar (609 psi) de presión de agua durante una hora. Gracias a la buena adherencia entre capas y la poca porosidad en su estructura. La estanqueidad al agua ha sido validada a través de un caso real: una válvula de bola industrial. Las tuercas de carcasa y unión se han fabricado siguiendo una metodología: proceso de fabricación, una validación dimensional y por último de montaje. Posteriormente se ha seguido el procedimiento ISO 9393 para validar la calidad del producto. Las pruebas realizadas bajo las presiones normales de la carcasa y el asiento/empaquetamiento han sido satisfactorias al no mostrar fugas y, en consecuencia, ha superado el control de calidad especificado para las válvulas de bola PN10 fabricadas con material termoplástico.

Fruto de esta investigación se ha generado un banco de conocimientos relacionados con la resistencia a la presión de agua, a los esfuerzos mecánicos, la resistencia química

y la resistencia a la temperatura. Seguidamente, se explica de forma detallada el resultado de dichos estudios.

- **Resistencia a la presión**

Se han llevado a cabo unas pruebas de fugas con unos dispositivos cilíndricos fabricados mediante PA12 y MJF. En la Figura G.10 se muestran los resultados obtenidos.

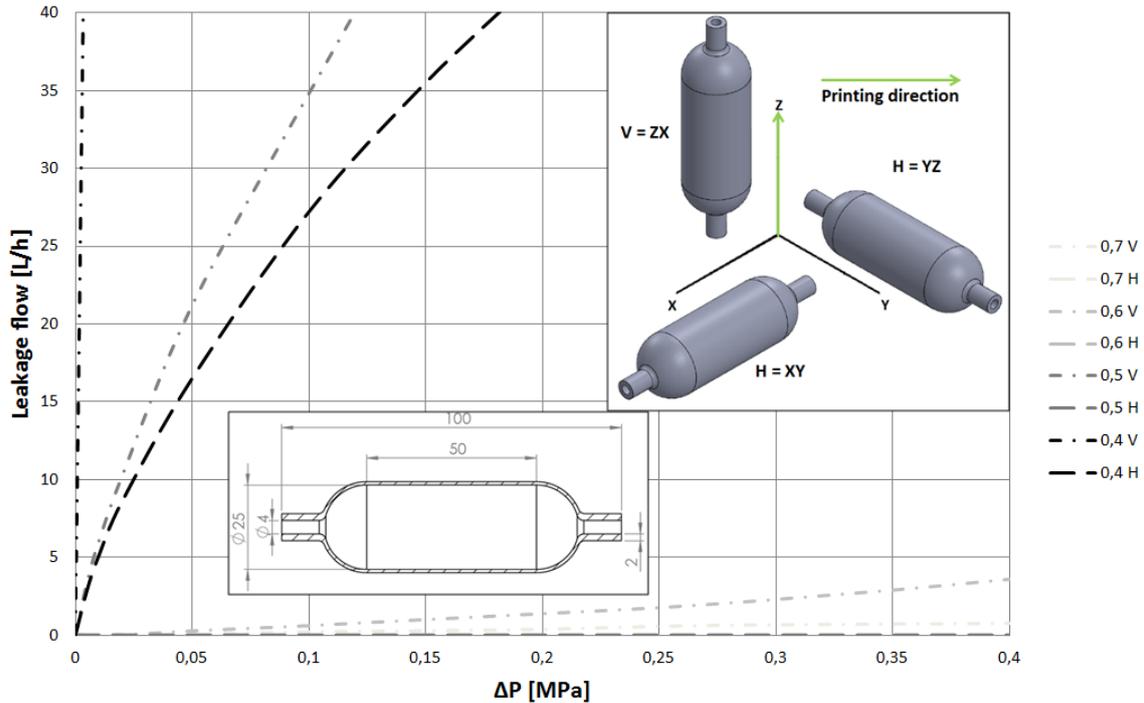


Figura G.10. Caudal de fuga y diferencial de presión para los diferentes especímenes. Fuente: [109].

En primer lugar, se han fabricado tres probetas para cada dirección y diferentes espesores. En el anterior gráfico se muestran los resultados de fugas para cada una de las probetas dependiendo del diferencial de presión. Los resultados muestran que, para probetas impresas con la misma orientación, un grosor menor conduce a valores de fugas más altos. Por otro lado, para muestras con el mismo espesor de pared, la orientación tiene un gran impacto en los valores de fuga, siendo la orientación vertical la más crítica. Este hecho está relacionado con la cantidad de capas y espacios de aire que pueden formarse durante el proceso de impresión en la interfase de las capas. Con respecto a la altura de impresión, el número de capas es mayor con la orientación vertical; por lo tanto, las probabilidades de que se formen espacios de aire durante el proceso de impresión son mayores. Se ha podido observar experimentalmente, que para asegurar la estanqueidad en cualquier orientación de impresión hasta 4 bar se debe tener una pared de mínimo 1 mm.

- **Resistencia a la temperatura**

Se ha realizado un análisis térmico mediante las técnicas DSC (*Differential Scanning Calorimetry*) y TGA (*Thermal Gravimetric Analysis*) mediante una termobalanza de Mettler Toledo, este proceso también es llamado análisis térmico simultáneo. Se trata de un proceso donde se parte de una muestra de material que se va calentando obteniendo un análisis calorimétrico y, además, simultáneamente se va pesando, obteniendo valores de descomposición del material. El objetivo de este estudio es analizar la muestra y determinar cuál es la temperatura de fusión y su estabilidad térmica. Además, se ha realizado un análisis infrarrojo del polímero después de la fusión para observar el espectro infrarrojo antes y después de la pirolisis determinando así su descomposición.

Dicho estudio se ha realizado porque, aunque la base del material es PA12, existen otros componentes asociados al material que pueden cambiar sus propiedades. Según la bibliográfica, el punto de fusión de la poliamida 12 está entre 178 y 180°C, y la entalpia de fusión es de 48,4 kJ/mol o 245 J/g, siendo la masa molecular de 197,3 g/mol. Se han realizado dos ensayos DSC tal como se observa en la Figura G.11. En el primer ensayo se localiza el punto de fusión entre 170 y 198°C, mientras que su máximo se observa en el 184°C. En el segundo ensayo, donde el contacto térmico mejora, ya que la muestra esta fundida y moja todo el crisol, se obtienen valores más fiables en un rango entre 166 y 196°C, con un pico de temperatura en 181°C.

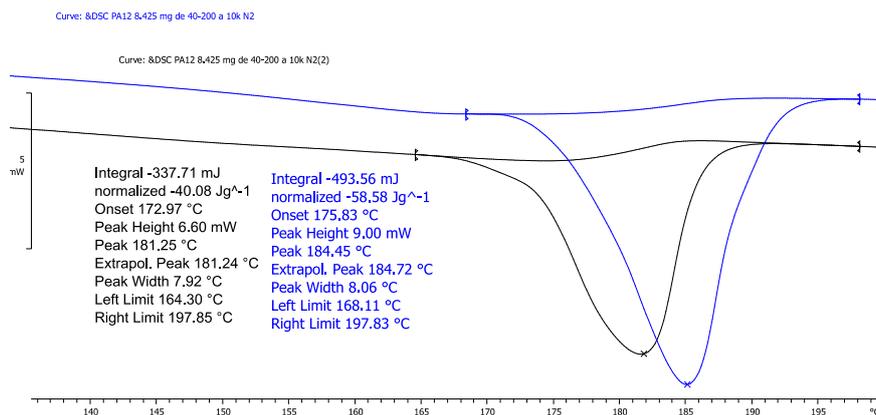


Figura G.11. Análisis DSC para la PA12 de MJF. Fuente: Propia.

Se puede comprobar que las temperaturas de fusión son inferiores que las del polímero totalmente cristalino, por eso la entalpia también es mucho menor a la del material cristalino. En el primer ensayo se obtienen 60 J/g, con lo que se puede afirmar que el material esté cristalinizado en torno al 25% después de la impresión.

Posteriormente, se ha realizado un ensayo DSC-TGA para observar la pérdida de masa después de aumentar la temperatura de la poliamida desde 50°C hasta 400°C.

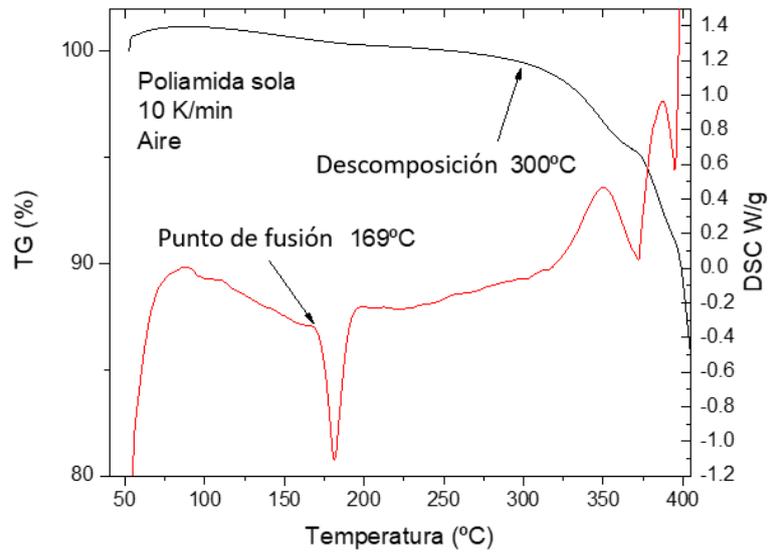


Figura G.12. Análisis DSC-TGA para la PA12 de MJF. Fuente: Propia.

En la Figura G.12 se observan los resultados obtenidos, donde la poliamida empieza a descomponerse en vapores a partir de los 300°C. También se puede observar que la fusión de la poliamida se inicia a 169°C. Posteriormente, se ha realizado un análisis infrarrojo para observar si la muestra se ha descompuesto a 300°C. El espectro infrarrojo coincide prácticamente con el espectro de referencia de la poliamida, tal como se observa en la Figura G.13.

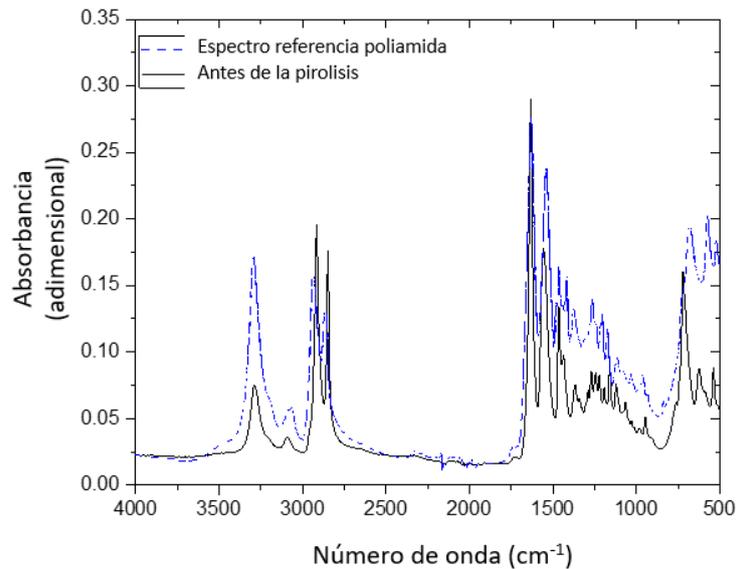


Figura G.13. Análisis IR de la PA12 a 300°C. Fuente: Propia.

Asimismo, incluso después de tratar la muestra a 400°C se puede comprobar que la degradación aun siendo muy importante está lejos de ser completada, tal como se ve en la Figura G.14.

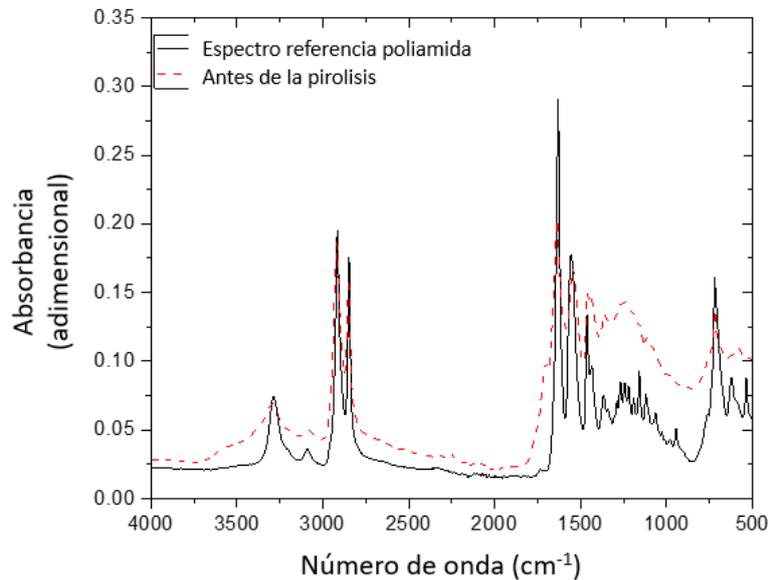


Figura G.14. Análisis IR de la PA12 a 400°C. Fuente: Propia

En conclusión, se puede afirmar que el punto de fusión de la PA12 utilizada en el proceso de consolidación de MJF está entre 166 y 196°C, con un pico de temperatura en 181°C, sin embargo, no se observa inicios de descomposición hasta los 300°C pudiendo afirmar que es muy estable térmicamente. Además, se ha aproximado que la cristalinidad de la poliamida al salir de la máquina ronda un 25%.

- **Esfuerzos mecánicos**

Se ha caracterizado la PA12 impresa mediante MJF mediante ensayos a tracción. Para ello, se han fabricado tres especímenes en las diferentes orientaciones de impresión siguiendo el ASTM D638 Tipo I. Se han obtenido los resultados que se muestran en la Figura G.15.

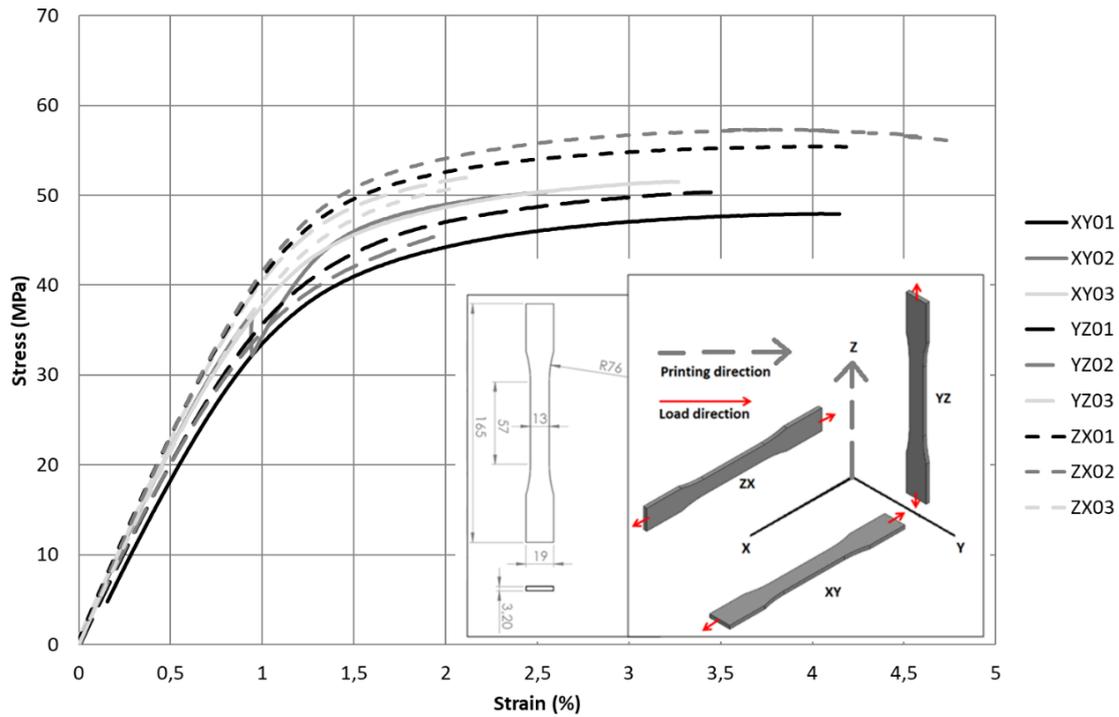


Figura G.15. Test de tensión-deformación para diferentes direcciones. Fuente: [109].

Tal como se observa en la anterior figura, aunque los ensayos son muy similares, las propiedades mecánicas dependen de la orientación de impresión. En la Tabla G.6 se muestran los valores correspondientes a las propiedades mecánicas que se han obtenido gráficamente.

Tabla G.6. Valores obtenidos de los ensayos tensión-deformación. Fuente: [109].

Dirección de impresión	E (Mpa)	σ_y (MPa)	σ_m (MPa)	ϵ (%)
XY01	3525	33,5	47,9	4,1
XY02	4202	35,2	50,3	2,5
XY03	4087	37,7	51,6	3,3
YZ01	3817	35,5	50,3	2,5
YZ02	3767	34,6	45,6	2,0
YZ03	4321	40,4	52,1	2,2
ZX01	4391	41,5	55,4	4,2
ZX02	4409	41,4	57,4	4,8
ZX03	4106	40,1	50,9	2,1

Además, se ha realizado un análisis de varianza (ANOVA) teniendo en cuenta tres poblaciones: XY, YZ y ZX. Los resultados obtenidos muestran que no existen evidencias para no considerar que todos los especímenes provengan de una sola población. Aunque el análisis de varianza afirma que el material es isotrópico, no es suficientemente representativo, ya que se necesitarían más ensayos.

- **Resistencia química**

En cuanto a la resistencia química de materiales frente a elementos químicos, existen diferentes bases de datos que se pueden consultar. Así, es posible comprobar la compatibilidad de materiales. En [140] se presenta un enlace para realizar las consultas de resistencia química para la PA12.

Referencias

- [1] “Fluidra.” [Online]. Available: www.fluidra.com. [Accessed: 11-Nov-2018].
- [2] “UPC.” [Online]. Available: www.upc.edu. [Accessed: 11-Nov-2018].
- [3] M. C. Jensen, “The Modern Industrial Revolution, Exit, and the Failure of Internal Control Systems,” *J. Finance*, 1993.
- [4] I. J. Petrick and T. W. Simpson, “3D Printing Disrupts Manufacturing,” *Res. Technol. Manag.*, 2013.
- [5] M. Berchon and B. Luyt, *La impresión 3D: Guía definitiva para makers, diseñadores, artistas y manitas en general*, Gustavo Gi. 2016.
- [6] N. Guo and M. C. Leu, “Additive manufacturing: Technology, applications and research needs,” *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2013.
- [7] R. D’Aveni, “The 3-D printing revolution,” *Harvard Business Review*. 2015.
- [8] COTEC, “Fabricación Aditiva,” Madrid, 2011.
- [9] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0,” *Procedia Manuf.*, 2017.
- [10] O. Diegel, “Additive Manufacturing: An Overview,” in *Comprehensive Materials Processing*, 2014.
- [11] J. De Vries, “The Industrial Revolution and the Industrious Revolution,” *J. Econ. Hist.*, 1994.
- [12] S. Prado, “The British Industrial Revolution in Global Perspective,” *Scand. Econ. Hist. Rev.*, 2010.
- [13] R. Sundar, A. N. Balaji, and R. M. Satheesh Kumar, “A review on lean manufacturing implementation techniques,” in *Procedia Engineering*, 2014.
- [14] J. F. Francolí y R. Blanco Díaz, “Estado actual y perspectivas de la impresión en 3D,” Barcelona, 2014.
- [15] M. M. Herterich, F. Uebernickel, and W. Brenner, “The impact of cyber-physical systems on industrial services in manufacturing,” in *Procedia CIRP*, 2015.
- [16] A. Vazhnov, *Impresión 3D. Cómo va a cambiar el mundo*, Baikal. 2013.

- [17] B. Vayre, F. Vignat, and F. Villeneuve, "Designing for additive manufacturing," in *Procedia CIRP*, 2012.
- [18] G. Boothroyd, "Product design for manufacture and assembly," *Comput. Des.*, vol. 26, no. 7, pp. 505–520, 1994.
- [19] N. Hopkinson, R. Hague, and P. Dickens, *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. 2005.
- [20] S. H. Khajavi, J. Partanen, and J. Holmström, "Additive manufacturing in the spare parts supply chain," *Comput. Ind.*, 2014.
- [21] R. Duray, "Mass customization origins: Mass or custom manufacturing?," *Int. J. Oper. Prod. Manag.*, 2002.
- [22] J. Hornick and D. Roland, "3D Printing and Intellectual Property : Initial Thoughts," *Licens. J.*, 2013.
- [23] P. Brody, "The new software-defined supply chain," 2013.
- [24] M. Gebler, A. J. M. Schoot Uiterkamp, and C. Visser, "A global sustainability perspective on 3D printing technologies," *Energy Policy*, 2014.
- [25] M. Domingo-Espin, J. M. Puigoriol-Forcada, A. A. Garcia-Granada, J. Llumà, S. Borros, and G. Reyes, "Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts," *Mater. Des.*, vol. 83, pp. 670–677, 2015.
- [26] J. Munguía, "RMADS: development of a concurrent Rapid Manufacturing Advice System," 2009.
- [27] B. Benhabib, *Manufacturing: Design, Production, Automation and Integration*. 2003.
- [28] K. V. Wong and A. Hernandez, "A Review of Additive Manufacturing," *ISRN Mech. Eng.*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012.
- [29] "Madrimasd." [Online]. Available: <http://www.madrimasd.org/blogs/patentesymarcas/2016/la-impresion-3d-y-las-patentes/>. [Accessed: 11-Nov-2018].
- [30] Gartner Inc, "Gartner Hype Cycle," *Reproduction*, 2011.

- [31] H. Gaub, “Customization of mass-produced parts by combining injection molding and additive manufacturing with Industry 4.0 technologies,” *Reinf. Plast.*, 2016.
- [32] M. K. Thompson *et al.*, “Design for Additive Manufacturing: Trends, opportunities, considerations, and constraints,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 65, no. 2, pp. 737–760, 2016.
- [33] S. Hällgren, L. Pejryd, and J. Ekengren, “(Re)Design for Additive Manufacturing,” in *Procedia CIRP*, 2016.
- [34] C. Klahn, B. Leutenecker, and M. Meboldt, “Design strategies for the process of additive manufacturing,” in *Procedia CIRP*, 2015.
- [35] N. Hopkinson and P. Dicknes, “Analysis of rapid manufacturing—using layer manufacturing processes for production,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 217, no. 1, pp. 31–39, 2003.
- [36] J. Minguella-Canela *et al.*, “Comparison of production strategies and degree of postponement when incorporating additive manufacturing to product supply chains,” *Procedia Manuf.*, 2017.
- [37] D. Thomas and S. Gilbert, “Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing - A Literature Review and Discussion,” *NIST Spec. Publ.*, 2014.
- [38] H. K. Alfares, “Production-inventory system with finite production rate, stock-dependent demand, and variable holding cost,” *RAIRO Rech. Opérationnelle*, vol. 48, pp. 135–155, 2014.
- [39] P. Berling, “The capital cost of holding inventory with stochastically mean-reverting purchase price,” *Eur. J. Oper. Res.*, 2008.
- [40] M. Cloudhury, K.D.; Saha, S.; Das, “An inventory model with Lot Size Dependent carrying/holding cost,” *Phys. Sci. Technol.*, vol. 7, pp. 133–136, 2011.
- [41] A. Al Masud, M. A.; Paul; S.K.; Azeem, “Optimisation of a production inventory model with reliability considerations,” *Int. Journ. Log. Syst. mgmnt*, vol. 17, pp. 22–45, 2014.
- [42] M. . Asadabadi, “A revision on cost elements of the EOQ model,” *Stud. Bus. Econ.*, vol. 11, pp. 5–14, 2016.
- [43] S. M. Samak-Kulkarni and N. R. Rajhans, “Determination of optimum inventory

- model for minimizing total inventory cost,” in *Procedia Engineering*, 2013.
- [44] A. Gambini, G. Mingari Scarpello, and D. Ritelli, “Mathematical properties of EOQ models with special cost structure,” *Appl. Math. Model.*, 2013.
- [45] S. Ziukov, “A literature review on models of inventory management under uncertainty,” *Bus. Syst. Econ.*, 2015.
- [46] T. Lesmono, D.; Limansyah, “A multi item probabilistic inventory model,” in *Journal of Physics*, 2017, pp. 1–7.
- [47] R. . Devy, N.L.; Ai, T.J.; Astanti, “A Joint Replenishment Inventory Model with Lost Sales,” *Mater. Sci. Eng.*, pp. 1–5, 2018.
- [48] M. Bosnjakovic, “Multicriteria Inventory Model for Spare Parts,” *Tech. Gaz.*, 2010.
- [49] McKinsey&Company, “Industrie 2.0, Jouer la rupture pour une Renaissance de l’industrie française,” 2013.
- [50] S. C. Ligon, R. Liska, J. Stampfl, M. Gurr, and R. Mülhaupt, “Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing,” *Chemical Reviews*, vol. 117, no. 15. pp. 10212–10290, 2017.
- [51] R. Rezaie, M. Badrossamay, A. Ghaie, and H. Moosavi, “Topology Optimization for Fused Deposition Modeling Process,” *Procedia CIRP*, vol. 6, pp. 521–526, 2013.
- [52] H. de A. Almeida and P. J. da Silva Bártolo, “Virtual topological optimisation of scaffolds for rapid prototyping,” *Med. Eng. Phys.*, vol. 32, no. 7, pp. 775–782, 2010.
- [53] O. S. Carneiro, A. F. Silva, and R. Gomes, “Fused deposition modeling with polypropylene,” *Mater. Des.*, vol. 83, pp. 768–776, 2015.
- [54] J. Minguella-Canela, S. Morales Planas, J. Gomà Ayats, and M. de los Santos López, “Assessment of the Potential Economic Impact of the Use of AM Technologies in the Cost Levels of Manufacturing and Stocking of Spare Part Products,” *Materials (Basel)*., vol. 11, no. 8, p. 1429, 2018.
- [55] L. D. Albano and N. P. Suh, “Axiomatic design and concurrent engineering,” *Comput. Des.*, vol. 26, no. 7, pp. 499–504, 1994.
- [56] D. Mann, “An introduction to TRIZ: The theory of inventive problem solving,”

- Creativity and Innovation Management*, vol. 10, no. 2, pp. 123–125, 2001.
- [57] H. J. Warnecke and R. Bäßler, “Design for Assembly — Part of the Design Process,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 37, no. 1, pp. 1–4, 1988.
- [58] T. OHASHI, M. IWATA, S. ARIMOTO, and S. MIYAKAWA, “Extended Assemblability Evaluation Method (AEM). Extended Quantitative Assembly Producibility Evaluation for Assembled Parts and Products.,” *JSME Int. J. Ser. C*, vol. 45, no. 2, pp. 567–574, 2002.
- [59] H. Rodrigue and M. Rivette, “An Assembly-Level Design for Additive Manufacturing Methodology,” *IDMME - Virtual Concept*, pp. 1–9, 2010.
- [60] I. Nizetic, K. Fertalj, and B. Milasinovic, “An Overview of Decision Support System Concepts,” *Race*, vol. 3, no. 2, pp. 1–14, 2007.
- [61] E. Turban and P. R. Watkins, “Integrating expert systems and decision support systems,” *MIS Q.*, pp. 121–136, 1986.
- [62] Mootaz M. Ghazy, “Development of an Additive Manufacturing Decision Support System – AMDSS,” Newcastle University, 2012.
- [63] L. E. Hornberger, “Rapid Prototyping Program.” Santa Clara University, Santa Clara, California, 2013.
- [64] R. I. Campbell and M. R. N. Bernie, “Creating a database of rapid prototyping system capabilities,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 61, no. 1–2, pp. 163–167, 1996.
- [65] H. H. Muller, H., Bauer, J. and Klingenberg, “Computer based rapid prototyping system selection and support,” in *Proceedings of the Time Compression Technologies Conference*, 1996.
- [66] D. K. Phillipson, “Rapid prototyping machine selection programme,” in *6th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing.*, 1997.
- [67] U. Durr, H. and Kaschka, “An approach for selection and comparative evaluation of conventional and rapid tooling process chains,” in *Proceedings of European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, 1998.
- [68] J. K. Hermann, A. and Allen, “Selection of Rapid Tooling Materials and Processes in a Distributed Design Environment,” in *ASME Design Engineering Technical*

Conference, 1999.

- [69] R. Bibb, "The development of a rapid prototyping selection system for small companies," University of Wales, 1999.
- [70] H. Muller, "The decision dilemma assessment and selection of rapid prototyping process chains," in *Proceedings of the 8th European conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, 1999.
- [71] F. Xu, Y. S. Wong, and H. T. Loh, "Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing," *J. Manuf. Syst.*, vol. 19, no. 5, pp. 283–296, 2001.
- [72] U. Kaschka and P. Auerbach, "Selection and evaluation of rapid tooling process chains with Protool," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 6, no. 1, 2000.
- [73] S. H. Masood and A. Soo, "A rule based expert system for rapid prototyping system selection," in *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2002, vol. 18, no. 3–4, pp. 267–274.
- [74] S. H. Masood and M. Al-Alawi, "The IRIS rapid prototyping system selector for educational and manufacturing users," *Int. J. Eng. Educ.*, vol. 18, no. 1, pp. 66–77, 2002.
- [75] J. Y. H. Mahesh, M., Loh, H. T., Wong, Y. S. and Fuh, "Integrated decision support system for selection of RP processes," in *The fourteenth Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2003.
- [76] H. S. Byun and K. H. Lee, "A decision support system for the selection of a rapid prototyping process using the modified TOPSIS method," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 26, no. 11–12, pp. 1338–1347, 2005.
- [77] M. Mahesh, J. Y. H. Fuh, Y. S. Wong, and H. T. Loh, "Benchmarking for decision making in rapid prototyping systems," in *Proceedings of the 2005 IEEE Conference on Automation Science and Engineering, IEEE-CASE 2005*, 2005, vol. 2005, pp. 19–24.
- [78] H. Lan, Y. Ding, and J. Hong, "Decision support system for rapid prototyping process selection through integration of fuzzy synthetic evaluation and an expert system," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 43, no. 1, pp. 169–194, 2005.
- [79] N. Hanumaiah, B. Ravi, and N. P. Mukherjee, "Rapid hard tooling process

- selection using QFD-AHP methodology,” *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 17, no. 3, pp. 332–350, 2006.
- [80] R. V. Rao and K. K. Padmanabhan, “Rapid prototyping process selection using graph theory and matrix approach,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 193, no. 1–3, pp. 81–88, 2007.
- [81] D. K. Pal, B. Ravi, and L. S. Bhargava, “Rapid tooling route selection for metal casting using QFD-ANP methodology,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 20, no. 4, pp. 338–354, 2007.
- [82] D. Pal and B. Ravi, “Rapid tooling route selection and evaluation for sand and investment casting,” in *Virtual and Physical Prototyping*, 2007, vol. 2, no. 4, pp. 197–207.
- [83] Nagahanumaiah, B. Ravi, and N. P. Mukherjee, “Rapid tooling manufacturability evaluation using fuzzy-AHP methodology,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 45, no. 5, pp. 1161–1181, 2007.
- [84] A. Armillotta, “Selection of layered manufacturing techniques by an adaptive AHP decision model,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 24, no. 3, pp. 450–461, 2008.
- [85] A. E. W. Smith, P. and Rennie, “Computer Aided Material Selection (CAMS) for Additive Manufacturing Materials,” *Virtual Phys. Prototyp. J.*, vol. 5, pp. 209–213, 2010.
- [86] Nagahanumaiah, K. Subburaj, and B. Ravi, “Computer aided rapid tooling process selection and manufacturability evaluation for injection mold development,” *Comput. Ind.*, vol. 59, no. 2–3, pp. 262–276, 2008.
- [87] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, “Guidelines for Process Selection,” in *Additive Manufacturing Technologies*, 2010, pp. 333–356.
- [88] J. Munguía, J. Lloveras, S. Llorens, and T. Laoui, “Development of an AI-based Rapid Manufacturing Advice System,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 48, no. 8, pp. 2261–2278, 2010.
- [89] S. Khrais, T. Al-Hawari, and O. Al-Araidah, “A fuzzy logic application for selecting layered manufacturing techniques,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 38, no. 8, pp. 10286–10291, 2011.
- [90] R. Bott, “RMADS: Development of a concurrent Rapid Manufacturing Advice

- System,” *Igarss 2014*, no. 1, pp. 1–5, 2014.
- [91] V. Shende and P. Kulkarni, “Decision Support System for Rapid Prototyping Process Selection,” *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 4, no. 1, pp. 2250–3153, 2014.
- [92] B. N. Panda, B. B. Biswal, and B. B. L. V Deepak, “Integrated AHP and fuzzy TOPSIS Approach for the Selection of a Rapid Prototyping Process under Multi-Criteria Perspective,” *5th Int. 26th All India Manuf. Technol. Des. Res. Conf. (AIMTDR 2014)*, no. Aimtdr, pp. 1–6, 2014.
- [93] Y. Zhang, Y. Xu, and A. Bernard, “A new decision support method for the selection of RP process: Knowledge value measuring,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 27, no. 8, pp. 747–758, 2014.
- [94] V. Kek, S. Vinodh, P. Brajesh, and R. Muralidharan, “Rapid prototyping process selection using multi criteria decision making considering environmental criteria and its decision support system,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, no. 2, pp. 225–250, 2016.
- [95] H.-S. Park and N.-H. Tran, “A decision support system for selecting additive manufacturing technologies,” in *ACM International Conference Proceeding Series*, 2017, vol. Part F1282, pp. 151–155.
- [96] J. K. Watson and K. M. B. Taminger, “A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption,” *Journal of Cleaner Production*, 2018.
- [97] N. Hopkinson and P. Erasenthiran, “High speed sintering - early research into a new rapid manufacturing process,” *Solid Free. Fabr. Symp. Proc.*, pp. 312–320, 2004.
- [98] R. Goodridge and S. Ziegelmeier, “Powder bed fusion of polymers,” in *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications*, 2016, pp. 181–204.
- [99] G. D. Kim and Y. T. Oh, “A benchmark study on rapid prototyping processes and machines: Quantitative comparisons of mechanical properties, accuracy, roughness, speed, and material cost,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 222, no. 2, pp. 201–215, 2008.
- [100] HP, “Introduction to Post-Processing,” 2017.

- [101] J. Buhigas, “Diseño para pieza plástica,” Barcelona, 2017.
- [102] HP, “White Paper - Design and printing guidelines,” 2017.
- [103] C. W. L. Hill, *International Business: Competing in the Global Marketplace*. 2013.
- [104] M. Domingo-Espin, S. Borros, N. Agullo, A.-A. Garcia-Granada, and G. Reyes, “Influence of Building Parameters on the Dynamic Mechanical Properties of Polycarbonate Fused Deposition Modeling Parts,” *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 1, no. 2, pp. 70–77, 2014.
- [105] M. Schmid and G. Levy, “Lasersintermaterialien – aktueller Stand und Entwicklungspotential,” *Addit. Fert. - vom Prototyp zur Ser.*, pp. 43–55, 2009.
- [106] J. A. Choren, S. M. Heinrich, and M. B. Silver-Thorn, “Young’s modulus and volume porosity relationships for additive manufacturing applications,” *Journal of Materials Science*, vol. 48, no. 15. pp. 5103–5112, 2013.
- [107] X. Ottemer and J. S. Colton, “Effects of aging on epoxy-based rapid tooling materials,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 8, no. 4, pp. 215–223, 2002.
- [108] D. K. Leigh, “a Comparison of Polyamide 11 Mechanical Properties Between Laser Sintering and Traditional,” *Int. Solid Free. Fabr. Symp.*, pp. 574–605, 2012.
- [109] S. Morales-Planas, J. Minguella-Canela, J. Lluma-Fuentes, J. A. Travieso-Rodriguez, and A.-A. García-Granada, “Multi Jet Fusion PA12 Manufacturing Parameters for Watertightness, Strength and Tolerances,” *Materials (Basel)*., vol. 11, no. 8, p. 1472, 2018.
- [110] “Integrated DEFinition Methods (IDEF),” 2018. [Online]. Available: www.idef.com. [Accessed: 11-Nov-2018].
- [111] S. Kappes, “Putting your IDEF0 model to work,” *Bus. Process Manag. J.*, vol. 3, no. 2, p. 151, 1997.
- [112] S. Morales Planas, “DSS - Fluidra,” 2018. [Online]. Available: https://dss-additivemanufacturing-mjf-pa12.shinyapps.io/3d_dss_fluidra/. [Accessed: 13-Nov-2018].
- [113] T. Wholers, “The Impact of Recent Developments in AM,” in *The Truth Behind the Additive Manufacturing Supply Chain*, 2014, pp. 4–6.
- [114] P. Alexander, S. Allen, and D. Dutta, “Part orientation and build cost determination

- in layered manufacturing,” *CAD Comput. Aided Des.*, vol. 30, no. 5, pp. 343–356, 1998.
- [115] F. Ansorge, K. Badstubner, and H. Reichl, “Novel Rapid Prototyping processes - Building movable parts,” *Virtual Rapid Manuf.*, pp. 665–666, 2008.
- [116] M. Rivette, J. Y. Hacoët, and P. Mognol, “A graph-based methodology for hybrid rapid design,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 221, no. 4, pp. 685–697, 2007.
- [117] O. Kerbrat, P. Mognol, and J.-Y. Hascoet, “Manufacturing criteria in hybrid modular tools: how to combine additive and subtractive processes,” in *3rd International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, 2007, pp. 419–424.
- [118] J. G. Zhou, D. Herscovici, and C. C. Chen, “Parametric process optimization to improve the accuracy of rapid prototyped stereolithography parts,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 2000.
- [119] O. S. Es-Said, J. Foyos, R. Noorani, M. Mendelson, R. Marloth, and B. A. Pregger, “Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples,” *Mater. Manuf. Process.*, 2000.
- [120] A. K. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, “Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts,” *Mater. Des.*, 2010.
- [121] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu, “Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments,” *Rapid Prototyp. J.*, 2008.
- [122] K. Puebla, K. Arcaute, R. Quintana, and R. B. Wicker, “Effects of environmental conditions, aging, and build orientations on the mechanical properties of ASTM type I specimens manufactured via stereolithography,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 18, no. 5, pp. 374–388, 2012.
- [123] B. Shaw and S. Dirven, “Investigation of porosity and mechanical properties of nylon SLS structures,” in *M2VIP 2016 - Proceedings of 23rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice*, 2017.
- [124] H. Packard, *HP 3D High Reusability PA 12*. 2016, pp. 3–4.
- [125] T. Jollivet, A. Darfeuille, B. Verquin, and S. Pillot, “Rapid manufacturing of polymer

- parts by selective laser sintering,” *Int. J. Mater. Form.*, vol. 2, no. SUPPL. 1, pp. 697–700, 2009.
- [126] D. Bourell *et al.*, “Materials for additive manufacturing,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 2, pp. 659–681, 2017.
- [127] H. Packard, “3D Fluid Tightness applications with the HP Multi Jet Fusion solution.” 2017.
- [128] S. Mansour, M. Gilbert, and R. Hague, “A study of the impact of short-term ageing on the mechanical properties of a stereolithography resin,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 447, no. 1–2, pp. 277–284, 2007.
- [129] Stratasys Inc, “Technical application guide: Comparision of sealing methods for FDM materials,” 2015.
- [130] D. Espalin, F. Medina, K. Arcaute, B. Zinniel, T. Hoppe, and R. Wicker, “Effects of vapor smoothing on ABS part dimensions,” in *Technical Paper - Society of Manufacturing Engineers*, 2009, vol. TP09PUB14, pp. 1–17.
- [131] J. G. Zhou, M. Kokkengada, Z. He, Y. S. Kim, and A. a Tseng, “Low temperature polymer infiltration for rapid tooling,” *Mater. Des.*, vol. 25, no. 2, pp. 145–154, 2004.
- [132] J. Mireles *et al.*, “Analysis of sealing methods for FDM-fabricated parts,” *Solid Free. Fabr.*, pp. 185–196, 2011.
- [133] International Organization for Standardization, “EN ISO 16135:2007 -Industrial valves - Ball valves of thermoplastics materials.” 2007.
- [134] CEPEX, *Industrial solutions catalogue*. 2017.
- [135] International Organization for Standardization, “ISO 9393 - Thermoplastics valves for industrial applications - Pressure test methods and requirements.” 2005.
- [136] International Organization for Standardization, “ISO 228-1 - Pipe threads where pressure-tight joints are not made on the threads -- Part 1: Dimensions, tolerances and designation.” 2000.
- [137] International Organization for Standardization materials, “ISO 1167-1:2006 Thermoplastics pipes, fittings and assemblies for the conveyance of fluids -- Determination of the resistance to internal pressure -- Part 1: General method,”

2006.

- [138] International Organization for Standardization materials, “ISO 9393-2:2005 Thermoplastics valves for industrial applications -- Pressure test methods and requirements -- Part 2: Test conditions and basic requirements,” 2005.
- [139] International Organization for Standardization, “ISO 9393 - Thermoplastics valves for industrial applications - Pressure test methods and requirements,” 2005.
- [140] Tangram, “Resistencia química PA12.” [Online]. Available: http://www.tangram.co.uk/TI-Polymer-PA12_Chemical.html. [Accessed: 11-Nov-2018].