



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Diseño Industrial y Desarrollo de
Producto

Análisis del Ciclo de Vida comparativo de la fabricación aditiva frente a la sustractiva

Autor:

Pérez Sánchez, Soraya

Tutores:

Martín Pedrosa, Fernando

Dpto. de Ciencia de los Materiales e Ingeniería
Metalúrgica

Cañibano Álvarez, Esteban

Dpto. de Construcciones Arquitectónicas,
Ingeniería del Terreno y Mecánica de los
Medios Continuos y Teoría de Estructuras /
Mecánica de los Medios Continuos y Teoría
de Estructuras

Valladolid, Julio de 2024

Agradecimientos

A mi tutor Fernando Martín, por permitirme realizar el tema del proyecto y dejarme la libertad para adaptarlo a mi gusto.

A la Fundación Cidaut, por confiar en mí y darme la oportunidad de hacer este trabajo con ellos. Ha sido un placer aprender en tantos ámbitos y tener mi primer contacto con una empresa.

A Esteban Cañibano, por guiarme durante este periodo, dedicarme su tiempo y ser un ejemplo de sabiduría y trabajo.

A Adrian Pedrosa, por compartir conmigo sus conocimientos acerca de este tema y estar siempre disponible para ayudarme.

A Miguel Cebrián, por su colaboración en el estudio del proceso de mecanizado.

A mis compañeros de Cidaut, por hacerme disfrutar de este tiempo en la empresa, acogerme como a una más y ayudarme en todo lo posible.

A mis amigos del grado, por estar a mi lado en los momentos más complicados y hacerme disfrutar de estos 4 años maravillosos. Os echaré mucho de menos.

A mi familia y amigos, por su apoyo incondicional, por no dejar que me rinda nunca y por haberme acompañado en esta etapa de mi vida.

Y, en especial, a mi madre por dar todo por mí, confiar en mí más de lo que yo lo he hecho y enseñarme que, aunque haya momentos difíciles, se pueden superar y aprender de ello. Gracias por hacerme la vida mucho más fácil.

Resumen

La fabricación aditiva engloba un conjunto de procesos que consisten en superponer capas de un material para formar una pieza realizada previamente en un modelo CAD. En los últimos años, este tipo de fabricación se ha desarrollado significativamente a causa del progreso de las tecnologías y del interés que supone para la industria. La impresión 3D con metales está captando cada vez más atención de determinados sectores como el aeronáutico, el médico o el de la automoción por su posibilidad de crear formas complejas y piezas optimizadas que reducen su peso y, por consiguiente, su consumo durante el uso.

El Análisis del Ciclo de Vida es una herramienta que permite evaluar el impacto ambiental de productos y servicios y que es de gran utilidad para comparar las nuevas tecnologías con las ya existentes y poner el foco en ciertos aspectos ambientales a mejorar, mostrando para qué aplicaciones es interesante cada una. Mediante el uso de este método se puede comparar la fabricación aditiva con metales con los procesos tradicionales de fabricación sustractiva, haciendo hincapié en las ventajas que supone el uso de cada una.

En el presente documento se hace una revisión de la fabricación aditiva, centrada en el proceso de fusión láser de lecho de polvo (LPBF), y se realiza un Análisis del Ciclo de Vida de una pieza fabricada por este proceso y por un mecanizado.

Palabras clave y simbología

Fabricación Aditiva (FA), fabricación sustractiva (FS), impresión 3D, fusión láser de lecho de polvo (LPBF), Análisis del Ciclo de Vida (ACV), Inventario del Ciclo de Vida (ICV), Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV), impactos ambientales, ReCiPe 2016, GaBi

Abstract

Additive manufacturing encompasses a set of processes that consist of superimposing layers of a material to form a part previously created on a CAD model. In recent years, this type of manufacturing has developed significantly due to the progress of technologies and the interest it represents for the industry. 3D printing with metals is attracting increasing attention from certain sectors such as aeronautics, medicine and the automotive industry, due to the possibility of creating complex shapes and optimised parts that reduce their weight and, consequently, their consumption during use.

Life Cycle Assessment is a tool for assessing the environmental impact of products and services and is very useful to compare new technologies with existing ones and to focus on certain environmental aspects to be improved, showing for which applications each one is of interest. Using this method, additive manufacturing with metals can be compared with traditional subtractive manufacturing processes, emphasising the advantages of using each.

This paper reviews additive manufacturing, focusing on the laser powder bed fusion (LPBF) process, and performs a Life Cycle Analysis of a part manufactured by this process and by machining.

Key words

Additive manufacturing (AM), subtractive manufacturing (SM), 3D printing, laser powder bed fusion (LPBF), Life Cycle Analysis (LCA), Life Cycle Inventory (LCI), Life Cycle Impact Assessment (LCIA), environmental impacts, ReCiPe 2016, GaBi

ÍNDICE

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Contexto.....	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Esquema del proyecto	3
Capítulo 2. Estado de la técnica.....	5
2.1. Fabricación aditiva	5
2.1.1. Introducción.....	5
2.1.2. Origen y antecedentes.....	6
2.1.3. Impresión 4D, 5D y 6D	7
2.1.4. Clasificación según la forma en la que se aporta el material.....	9
2.1.5. Aplicaciones.....	13
2.2. Fusión Láser de Lecho de Polvo	15
2.2.1. Introducción.....	15
2.2.2. Tipos de fusión de lecho de polvo con láser	17
2.2.3. Polvo metálico	18
2.2.4. Producción del polvo metálico	18
2.2.5. Reutilización del polvo metálico sobrante.....	20
Capítulo 3. Definición del Análisis del Ciclo de Vida	23
3.1. Introducción.....	23
3.2. Origen y desarrollo	24
3.3. Etapas del ACV	24
3.3.1. Objetivo y alcance	25
3.3.2. Análisis del inventario.....	26
3.3.3. Evaluación del impacto.....	27
3.3.4. Interpretación	30
3.3.5. Elaboración del Informe y revisión crítica.....	30
3.4. Aplicación del ACV a la fabricación aditiva.....	30
Capítulo 4. Justificación de la pieza a analizar	31
4.1. Procesos de fabricación	31
4.2. Geometría	31
4.3. Dimensiones máximas.....	32
4.4. Material.....	33
4.5. Aplicación de la pieza	35
Capítulo 5. Desarrollo del Análisis del Ciclo de Vida	37

5.1.	Software	37
5.2.	Desarrollo del ACV de fabricación aditiva	39
5.2.1.	Objetivo y alcance.....	39
5.2.2.	Análisis del inventario	41
5.2.3.	Evaluación del impacto e interpretación	46
5.3.	Desarrollo del ACV de fabricación sustractiva.....	53
5.3.1.	Objetivo y alcance.....	53
5.3.2.	Análisis del inventario	54
5.3.3.	Evaluación del impacto e interpretación	57
Capítulo 6. Comparación de los resultados		63
Capítulo 7. Presupuesto		65
7.1.	Costes directos	65
7.1.1.	Costes de material.....	65
7.1.2.	Costes de mano de obra	66
7.1.3.	Costes de amortización.....	66
7.1.4.	Costes directos totales.....	67
7.2.	Costes indirectos	67
7.3.	Costes totales	68
Capítulo 8. Conclusiones		69
7.1.	Conclusiones del ACV.....	69
7.2.	Conclusiones de los procesos y líneas futuras.....	70
7.3.	Conclusiones generales	71
Bibliografía.....		73
Anexo 1		79
	Fabricación aditiva.....	79
	Fabricación sustractiva	80
	Diseño y propiedades del utillaje	80
	Simulación del fresado	81
Anexo 2		83
	Fabricación aditiva.....	83
	Cálculo de las cantidades de acero inoxidable 316L en cada proceso...	83
	Otros cálculos	85
	Fabricación sustractiva	87
	Cálculo de las cantidades de acero inoxidable 316L en cada proceso...	87
	Cálculo de las cantidades de acero para herramientas en cada proceso	87
	Otros cálculos	88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo energético mundial del año 1990 al 2022 [3]	1
Figura 2. Emisiones de CO2 mundiales del año 1990 al 2022 [4]	1
Figura 3. Pieza realizada por fabricación aditiva [7]	5
Figura 4. Tipos de procesos de fabricación en función del flujo de material que entra y del que sale [8]	6
Figura 5. Ejemplo de una pieza impresa en 4D [13].....	8
Figura 6. Movimientos de una impresora 5D [14].....	8
Figura 7. Comparación de los resultados de una pieza realizada por impresión 4D y 6D [14]	9
Figura 8. Esquema del proceso de fotopolimerización en tanque [16].....	10
Figura 9. Esquema del proceso de proyección de material [16].....	10
Figura 10. Esquema del proceso de proyección de aglutinante [16]	11
Figura 11. Esquema del proceso de fusión de lecho de polvo [16].....	11
Figura 12. Esquema del proceso de extrusión de material [16]	12
Figura 13. Esquema del proceso de deposición de energía focalizada [16]...	12
Figura 14. Esquema del proceso de laminado de hojas [16].....	13
Figura 15. Fabricación por fusión láser de lecho de polvo [22]	16
Figura 16. Posprocesado de piezas realizadas por LPBF [21]	16
Figura 17. Diagrama de una máquina de LPBF [23].....	17
Figura 18. (a) Proceso de atomización de caída libre (b) Proceso de atomización de gas de acoplamiento cercano [25].....	20
Figura 19. Análisis del índice de Haunser para dos lotes de polvo [30].....	21
Figura 20. Comparación del mecanismo de compactación del polvo virgen (sin reutilización) y reutilizado [30]	22
Figura 21. Análisis del ángulo de reposo para dos lotes de polvo [30]	22
Figura 22. Etapas de un ACV [31].....	25
Figura 23. Aplicaciones parciales del ACV (Elaboración propia)	26
Figura 24. Diagrama de los elementos del inventario (Elaboración propia) ...	27
Figura 25. Elementos de la fase EICV [31]	28
Figura 26. Categorías de impacto del método ReCiPe2016 (Elaboración propia)	29
Figura 27. Pieza base para la optimización topológica (Ejemplo de Inspire 2023.1).....	31
Figura 28. Pieza guía para el modelo CAD de la unidad funcional (Ejemplo de Inspire 2023.1)	32

Figura 29. Pieza modelada inicialmente (Elaboración propia)	32
Figura 30. Pieza modelada finalmente (Elaboración propia)	32
Figura 31. Dimensiones máximas de la pieza (Elaboración propia).....	33
Figura 32. Composición del acero inoxidable 316L [36]	34
Figura 33. Información general del acero inoxidable 316L [36]	34
Figura 34. Propiedades mecánicas para fabricación aditiva del acero inoxidable 316L [36]	34
Figura 35. Brazo robótico de ejemplo [37]	35
Figura 36. Ejemplo de la definición de un proceso en GaBi (Elaboración propia)	38
Figura 37. Ejemplo de la definición de un flujo en GaBi (Elaboración propia)	38
Figura 38. Ejemplo de un plano de GaBi (Elaboración propia)	38
Figura 39. Balance de ejemplo de GaBi (Elaboración propia)	39
Figura 40. Plano general de la FA (Elaboración propia)	41
Figura 41. Plano de la producción de materia prima de la FA (Elaboración propia)	42
Figura 42. Esquema de los planos de transporte (Elaboración propia)	43
Figura 43. Plano de la atomización de gas (Elaboración propia).....	43
Figura 44. Plano de LPBF (Elaboración propia).....	44
Figura 45. Plano del posprocesado de la FA (Elaboración propia)	44
Figura 46. Plano del pintado de la pieza (Elaboración propia)	45
Figura 47. Plano de reciclado y reutilización de los desechos intermedios de la FA (Elaboración propia)	45
Figura 48. Plano fin del ciclo de vida de la FA (Elaboración propia).....	46
Figura 49. “Midpoint” del cambio climático de la FA (Elaboración propia).....	48
Figura 50. “Midpoint” del cambio climático de la producción de materias primas de la FA (Elaboración propia).....	48
Figura 51. “Midpoint” del agotamiento fósil de la FA (Elaboración propia)	49
Figura 52. “Midpoint” del consumo de agua dulce de la FA (Elaboración propia)	50
Figura 53. “Midpoint” de la ecotoxicidad del agua de la FA (Elaboración propia)	50
Figura 54. “Midpoint” de la toxicidad humana que causa cáncer de la FA (Elaboración propia)	51
Figura 55. “Midpoint” del agotamiento de metal de la FA (Elaboración propia)	52
Figura 56. “Midpoint” del agotamiento de metal de la producción de materias primas de la FA (Elaboración propia)	52

Figura 57. Plano del ciclo de vida de la FS (Elaboración propia)	54
Figura 58. Plano de producción de materias primas de la FS (Elaboración propia).....	54
Figura 59. Plano de producción del útil de sujeción (Elaboración propia)	55
Figura 60. Plano de limpieza de la pieza (Elaboración propia).....	56
Figura 61. Plano del posprocesado de la FS (Elaboración propia).....	56
Figura 62. Plano del reciclado y reutilización de los desechos del fresado (Elaboración propia).....	56
Figura 63. Plano del reciclado de la viruta de la pieza (Elaboración propia) ..	57
Figura 64. “Midpoint” del cambio climático de la FS (Elaboración propia)	57
Figura 65. “Midpoint” del cambio climático de la producción de materias primas de la FS (Elaboración propia)	58
Figura 66. “Midpoint” del agotamiento fósil de la FS (Elaboración propia).....	59
Figura 67. “Midpoint” del agotamiento fósil de la producción de materias primas de la FS (Elaboración propia).....	59
Figura 68. “Midpoint” del consumo de agua dulce de la FS (Elaboración propia)	60
Figura 69. “Midpoint” de la ecotoxicidad del agua de la FS (Elaboración propia)	60
Figura 70. “Midpoint” de la ecotoxicidad del agua de la producción de materias primas de la FS (Elaboración propia).....	61
Figura 71. “Midpoint” de la toxicidad humana que causa cáncer de la FS (Elaboración propia).....	61
Figura 72. “Midpoint” del agotamiento de metal de la FS (Elaboración propia)	62
Figura 73. Comparación de los "endpoints" totales (Elaboración propia)	63
Figura 74. Comparación de los “endopoints” totales (Elaboración propia).....	64
Figura 75. Datos de la pieza de Autodesk Fusion (Elaboración propia)	79
Figura 76. Simulación en el programa Autodesk Netfabb (Elaboración propia)	79
Figura 77. Tiempo de impresión (Elaboración propia)	80
Figura 78. Volumen de los soportes (Elaboración propia)	80
Figura 79. Geometría del útil de sujeción (Elaboración propia)	80
Figura 80. Datos del útil (Elaboración propia)	80
Figura 81. Simulación de la pieza en la fresadora (Elaboración propia)	81
Figura 82. Zonas de fresado (Elaboración propia)	81
Figura 83. Pieza durante el proceso de fresado (Elaboración propia).....	82
Figura 84. Datos del proceso de atomización de gas [28]	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Costes de materiales tangibles	65
Tabla 2. Costes de software	65
Tabla 3. Tiempo invertido en las actividades.....	66
Tabla 4. Costes de amortización.....	67
Tabla 5. Costes directos	67
Tabla 6. Costes indirectos	68
Tabla 7. Consumo en cada fase del LPBF.....	86

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1. CONTEXTO

A pesar de que en los dos últimos años el consumo mundial de energía ha ralentizado su crecimiento por diferentes factores socioeconómicos, en las últimas décadas, el consumo de energía y las emisiones de CO₂ han aumentado de forma drástica y preocupante [1], [2], como podemos observar en la Figura 1 y Figura 2. Es por ello que la consideración de los impactos ambientales de los productos y servicios está adquiriendo una notable importancia. La concienciación por su efecto sobre la salud y el medio ambiente ha ocasionado que la problemática llegue a todos los ámbitos de la sociedad, siendo indispensable tenerlo en cuenta para la fabricación actual.

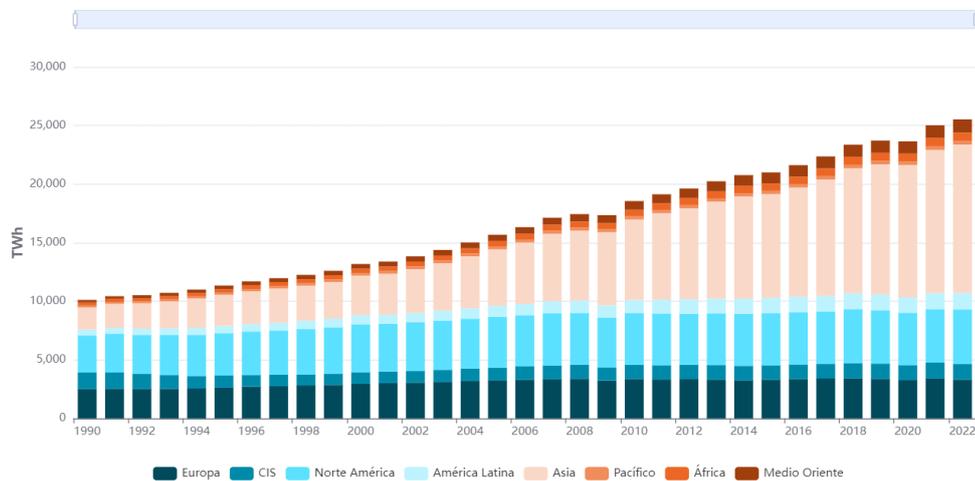


Figura 1. Consumo energético mundial del año 1990 al 2022 [3]

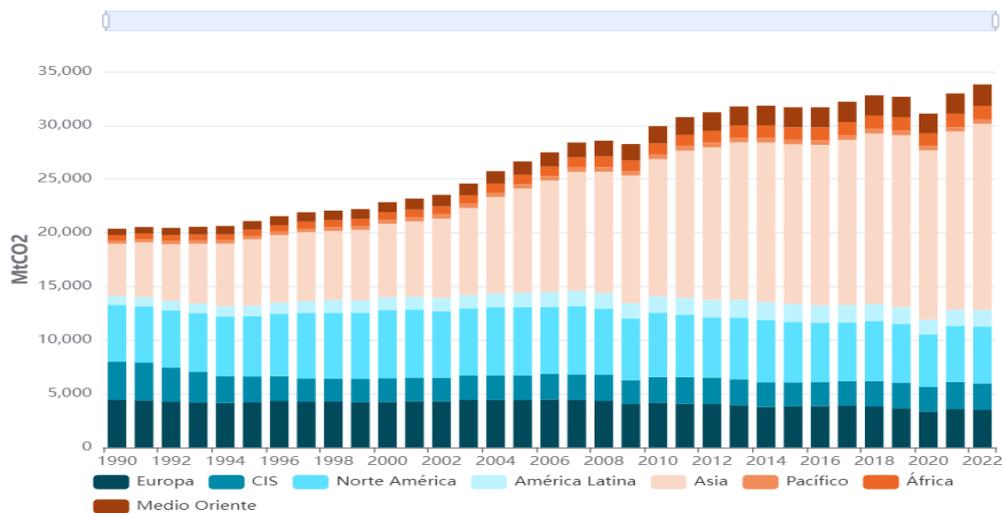


Figura 2. Emisiones de CO2 mundiales del año 1990 al 2022 [4]

Los impactos ambientales se detectaron por primera vez al inicio de la era industrial, cuando lo primordial era alejar la concentración de sustancias nocivas de la población. Posteriormente, se vieron que las consecuencias seguían existiendo, a pesar de no tener tanto impacto sobre la salud humana. Así, se trataron las emisiones mediante filtros, tratamientos químicos o combustión. Más tarde, se puso el foco en hacer los procesos más limpios y eficientes, con el fin de disminuir los residuos producidos y la extracción de materia prima no renovable. Hoy en día, se pretende que el producto o servicio sea limpio en todo su ciclo de vida, no solo durante su fabricación, atendiendo al agotamiento de los recursos naturales que se utilizan también durante el uso y reciclado de los productos y el deterioro que ocasiona en el medioambiente y la salud. [5]

Esto conlleva la necesidad de evaluar cómo afectan los impactos ambientales que se ocasionan con las actividades y disminuirlos. Por eso, el uso de herramientas que ayudan a conocer estos impactos es de creciente importancia. Esta ha sido la causa de la aplicación del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) como medio para analizar los impactos y poder reducirlos al mínimo, siendo la base para una producción y consumo sostenibles.

El rápido avance tecnológico de la sociedad y el interés de conseguir una mejora continua por parte de las industrias favorece la creación de nuevos procesos de fabricación. El surgimiento de nuevas tecnologías está limitado por la problemática del cuidado del medioambiente, por lo que se buscan métodos de fabricación que minimicen el impacto ambiental, además de optimizar el proceso y conseguir mejores resultados.

La fabricación aditiva surge como una tecnología prometedora en contraposición a la fabricación sustractiva, ya que no desperdicia material. Estos procesos han aumentado su uso notablemente en los últimos años, pero aún se encuentran en desarrollo. La fabricación aditiva con metales está adquiriendo importancia por sus posibilidades de aplicación, en especial, por su capacidad para poder crear productos complejos con gran precisión. En concreto, la fusión láser de lecho de polvo (LPBF) se está convirtiendo en un proceso interesante para la industria de la automoción, aeroespacial y médica, por lo que su estudio es necesario.

La evaluación del impacto ambiental de este proceso en comparación con el de un proceso de fabricación sustractiva es un área de investigación fundamental. Por ende, en este trabajo se realiza un Análisis del Ciclo de Vida de un proceso de fabricación aditiva y uno de sustractiva.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo es analizar el impacto ambiental durante todo el ciclo de vida de una pieza de un brazo robótico fabricada por fusión láser de lecho de polvo y de otra realizada por fabricación sustractiva, estudiando todos los procesos que intervienen, desde la extracción de la materia prima hasta su llegada al vertedero o reciclaje, para comparar los resultados entre dos procesos de fabricación opuestos.

Para lograr el objetivo general se plantea la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- Conocer el origen, tipos y aplicaciones de la fabricación aditiva.
- Definir la metodología de la fabricación aditiva, poniendo el foco en el proceso de fusión láser de lecho de polvo.
- Conocer los tipos de LPBF y polvo metálico aptos para esa aplicación que existen.
- Entender la forma de fabricación del polvo metálico para LPBF y su posibilidad de reutilización.
- Definir las fases del ACV.
- Realizar el Análisis del Ciclo de Vida de todas las etapas de la pieza realizada por fusión láser de lecho de polvo y la misma mecanizada.
- Seleccionar la herramienta y el método más adecuado para realizarlo.
- Obtener los datos de las entradas y salidas para realizar el inventario del ACV, como son el consumo de material, el consumo energético o los desechos que ocasiona cada proceso.
- Evaluar el impacto y la viabilidad ambiental que tiene el proceso de fusión láser de lecho de polvo para la fabricación de una pieza de un brazo robótico y estudiar la propuesta en comparación con un proceso de fabricación sustractiva, focalizando la atención en los procesos que necesiten una mayor mejora de sus impactos medioambientales.
- Generalizar los resultados obtenidos para que puedan servir de base para la toma de decisiones al seleccionar uno u otro proceso, indicando las ventajas y desventajas de cada forma de producción.

1.3. ESQUEMA DEL PROYECTO

El presente proyecto presenta la siguiente estructura con el fin de seguir los objetivos fijados anteriormente.

- **Capítulo 1. Introducción.** En lo expuesto hasta el momento, se realiza una descripción general del problema a abordar en el proyecto y se definen los objetivos.

- **Capítulo 2. Estado de la técnica.** Se realiza una introducción a la fabricación aditiva, definiendo qué es y enumerando los tipos existentes. Después, se describe con más profundidad la fusión láser de lecho de polvo, utilizada para el desarrollo del ACV de este documento.
- **Capítulo 3. Definición del Análisis del Ciclo de Vida.** Se explica brevemente en que consiste este método para evaluar los impactos ambientales y se exponen sus etapas.
- **Capítulo 4. Justificación de la pieza a analizar.** Se justifica la pieza que se ha escogido para analizar, indicando su geometría, material y posible aplicación.
- **Capítulo 5. Desarrollo del Análisis del Ciclo de Vida.** Se define el software a utilizar para el desarrollo del ACV y se realizan dos Análisis del Ciclo de Vida para la unidad funcional seleccionada, uno de los procesos llevados a cabo en el caso de la fabricación aditiva, siendo el LPBF el proceso principal, y otro en el caso de fabricación sustractiva, destacando el mecanizado. Se muestran los procesos, las entradas y salidas utilizadas y, finalmente, los resultados obtenidos.
- **Capítulo 6. Comparación de los resultados.** Se realiza una comparación de los resultados obtenidos en el ACV de la pieza de LPBF y el ACV de la pieza mecanizada, analizando las diferencias ambientales obtenidas.
- **Capítulo 7. .** Se muestra una estimación del coste económico del proyecto.
- **Capítulo 8. Conclusiones.** A partir de los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se presentan las conclusiones generales, así como las ventajas y desventajas de cada proceso y sus posibles aplicaciones en función de estas. También se comentan las líneas futuras de desarrollo e investigación.
- **Anexo 1.** Se muestran los resultados obtenidos de las diferentes simulaciones en distintos softwares para obtener los datos de la pieza para realizar el inventario.
- **Anexo 2.** Se calculan las entradas y salidas necesarias para cada proceso de cada uno de los ACV desarrollados.

CAPÍTULO 2. ESTADO DE LA TÉCNICA

2.1. FABRICACIÓN ADITIVA

2.1.1. Introducción

La fabricación aditiva (FA) engloba diferentes procesos de fabricación que permiten realizar piezas mediante la superposición de capas de material a partir de un modelo 3D computarizado de la pieza. [6]



Figura 3. Pieza realizada por fabricación aditiva [7]

Este tipo de procesos de fabricación se opone a los tradicionales y crea una nueva clasificación en función de la relación entre el flujo de material que entra y el que sale: [8] [6]

- Procesos de fabricación de conservación: el material se introduce en una preforma (molde o matriz) mediante la que obtendrá la geometría deseada. Se considera que la masa de la preforma es la misma que la de la pieza que se consigue. Los procesos típicos son la fundición, la pluvimeturgia, el conformado y la deformación.
- Procesos de fabricación sustractiva: la pieza se consigue sustrayendo material de otra de mayores dimensiones, por lo que la masa de la pieza inicial es mayor que la del producto final. El mecanizado (fresado, torneado, etc.) pertenece a este grupo.
- Procesos de fabricación por agregación: la geometría final es el resultado de la suma de todas las masas que se van añadiendo. Se incluyen los procesos de fabricación aditiva y la soldadura.

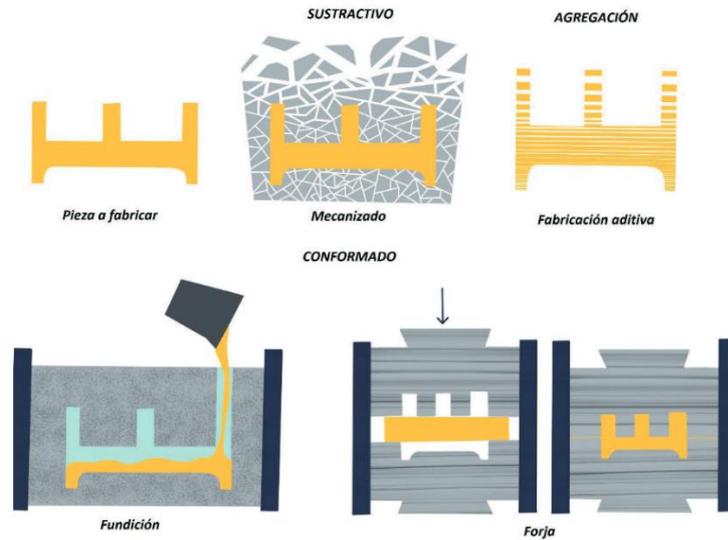


Figura 4. Tipos de procesos de fabricación en función del flujo de material que entra y del que sale [8]

Mediante la FA se pueden crear prototipos, moldes y utillaje de una forma más rápida, o piezas finales con geometrías complejas de una forma más sencilla [9]. Los procesos de fabricación convencional de mecanizado o moldeo tienen limitaciones en cuanto a la forma de las piezas que pueden crear; sin embargo, con la fabricación aditiva se pueden crear todos los diseños imaginables, convirtiéndose así en el proceso ideal para hacer productos personalizados [8]. Además, los procesos de FA favorecen el ahorro de material ya que utilizan solo el necesario para conseguir la pieza o disminuyen el desperdicio al mínimo; con la fabricación sustractiva se requiere mucho más material del que necesita la pieza final. Se crean piezas que requieren menos operaciones y, por lo tanto, menos trabajo del operario [10].

El interés por parte de la industria por este tipo de fabricación ha favorecido su integración en la sociedad, permitiendo que sean procesos que se utilicen tanto por parte de las grandes empresas productivas como de usuarios individuales.

La fabricación aditiva viene definida por la norma UNE-EN ISO/ ASTM 52900:2022, en la que se mencionan los conceptos básicos y los principales tipos de esta tecnología [9]. El uso de este tipo de normas ayuda a estandarizar los procesos mejorando la calidad final y promoviendo el uso rentable y sostenible de los recursos [6].

2.1.2. Origen y antecedentes

Antes de que surgiera la fabricación aditiva que conocemos actualmente, se fabricaron otros productos capa a capa. El pionero fue Peacock patentando unas herraduras laminadas en 1902, pero no es hasta 50 años más tarde, momento en el que Kojima muestra las ventajas de esta técnica, cuando se empieza a popularizar e impulsa el desarrollo de más patentes. Estas patentes

de entre los años 60 y 80 desencadenaron la concepción de la fabricación 3D por capas y, como resultado, el prototipado rápido. [8]

La base de la fabricación aditiva se encuentra en la fotopolimerización, proceso en el cual un polímero líquido se cura mediante el aporte de calor en forma de luz. Estas resinas fotopoliméricas se produjeron en los años 70, pero no fue hasta los 80 cuando se empezaron a desarrollar. En 1983 surgió la estereolitografía (SLA) para fabricar prototipos, gracias a Charles Hull, quien usó la fotopolimerización para crear objetos a partir de un modelo CAD. Charles creó la empresa 3D Systems en 1986, donde elaboró el archivo STL y, un año después, comercializó la primera máquina de SLA. Por otro lado, fueron surgiendo más procesos a medida que se iban comercializando las primeras impresoras 3D, como el proceso de Sinterización Selectiva por Láser (SLS), desarrollado por Carl Deckar y Joe Meaman en 1986; el Modelado por Deposición Fundida, desarrollado por Scott Crump en 1988; o la 3DP, desarrollada por el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) en 1993. [8]

La fabricación aditiva surge como evolución del prototipado rápido, que utilizaba un modelo digital para realizar un prototipo con procesos rápidos y posteriormente evaluarlo. Esto ha ido desarrollándose con el tiempo hasta convertirse en un conjunto de técnicas que permiten realizar piezas finales, además de prototipos y útiles. [8]

2.1.3. Impresión 4D, 5D y 6D

La fabricación aditiva es conocida como impresión 3D; sin embargo, también engloba la impresión 4D, 5D y 6D.

La impresión 4D es un método en desarrollo, surgido como evolución de la impresión 3D, que permite que las piezas estáticas impresas se transformen en dinámicas al usar materiales inteligentes. Estos materiales tienen memoria de forma y reaccionan ante ciertos estímulos de energía externa, como son la temperatura, la electricidad o la luz, una vez la pieza ya está impresa, y hacen que se transforme con el tiempo de forma controlada utilizando modelos matemáticos [10]. Pueden cambiar de forma o funcionalidad, doblarse, repararse e incluso desintegrarse [11].

No cuenta con tantos materiales para su uso como la impresión 3D, pero ya existen algunos específicos como las aleaciones con memoria de forma (SMAs), los polímeros con memoria de forma (SMPs), los hidrogeles con memoria de forma (SMHs) o los elastómeros de cristal líquido (LCEs) [12]. También se utilizan materiales más comunes como el ácido poliláctico (PLA), el politetrafluoroetileno (PTFE) o el etileno acetato de vinilo (EVA) [10].

El origen de esta técnica data del 2012, cuando Skylar Tibbits, del MIT (Massachusetts Institute of Technology), requirió la función dinámica.

Actualmente, los estudios acerca de la impresión 4D siguen en aumento, ya que es una técnica de gran interés para ciertas aplicaciones. Nos permite realizar piezas sin incrementar el coste, el tiempo de fabricación o el número de componentes necesarios. [10] Algunas de sus aplicaciones son la biomedicina, packagings inteligentes, dispositivos de autocuración [10], la industria alimentaria, el equipamiento eléctrico o los robots con materiales blandos que simulan organismos [11].

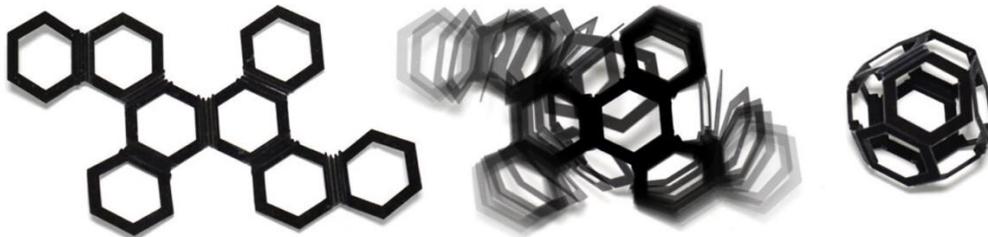


Figura 5. Ejemplo de una pieza impresa en 4D [13]

Por otro lado, la impresión 5D y la 6D surgen para solventar problemas de la impresión 3D y 4D.

La impresión 5D tiene la misma base que las otras, pero utiliza tres movimientos de desplazamiento (X, Y y Z) y dos ejes de rotación sin necesidad de añadir otros soportes en la pieza que se está imprimiendo. Los ejes de desplazamiento son los movimientos de la cabeza de impresión y los de rotación son los de la cama de impresión [14], lo cual se puede observar en la Figura 6, aunque también pueden estar todos integrados en la cabeza de impresión.

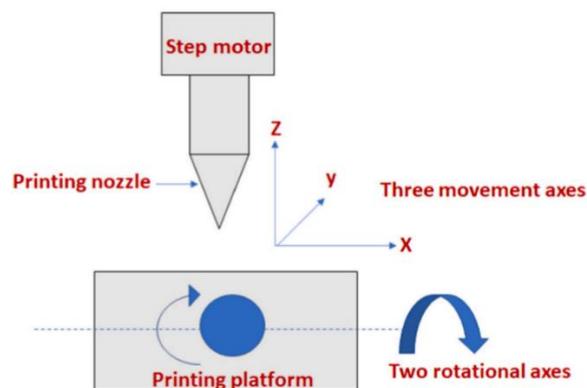


Figura 6. Movimientos de una impresora 5D [14]

El origen de la impresión 5D se encuentra en Mitsubishi Electric Research Laboratories (MERL) en 2016, durante la realización de pruebas de impresión de tapones de presión, en las que consiguieron mejores propiedades mecánicas con la impresión 5D que con la 3D. Además, esta tecnología tiene otras ventajas cuando su uso es correcto, como la posibilidad de conseguir un ahorro de material. [14]

Asimismo, la impresión 6D se consigue añadiendo materiales inteligentes a la impresión 5D. Sus inicios tuvieron lugar en 2021 gracias a Geogantzinos, que demostró las ventajas de esta tecnología respecto a la 4D y su posibilidad de reducir costes y tiempo. [14] En la Figura 7 se puede observar la diferencia de resultados obtenidos al imprimir en una máquina de 3D con materiales inteligentes y al hacerlo en una de 5D.

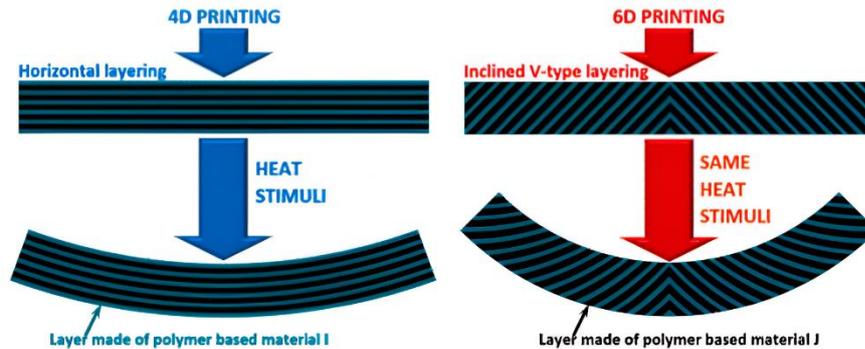


Figura 7. Comparación de los resultados de una pieza realizada por impresión 4D y 6D [14]

Estas técnicas se utilizan para las mismas aplicaciones que la impresión 3D y la 4D, aunque pueden realizar piezas más complejas de una forma más sencilla e incluso obtener mejores resultados. Uno de sus posibles usos tiene lugar en la industria alimentaria y su packaging [14].

2.1.4. Clasificación según la forma en la que se aporta el material

Existen varias formas de clasificar las más de 50 tecnologías [12] de fabricación aditiva diferentes: según el formato de aporte de material (sólido, líquido o polvo), según la forma de consolidar el material (aportación de calor, aglutinante o radiación ultravioleta), según el proceso de obtención del modelo (extrusión o inyección, fotopolimerización o granular) y según la forma en la que se llevan a cabo los procesos (fotopolimerización en tanque o cuba, proyección del material, proyección de aglutinante, extrusión de material, fusión de lecho de polvo, laminado de hojas o deposición de energía focalizada). [8]

En este documento se va a desarrollar la última clasificación mencionada, ya que es la definida por la “American Society for Testing and Materials” (ASTM) en la norma UNE-EN ISO 17296-2. Las categorías en las que se divide esta clasificación son: [15]

- **Fotopolimerización en tanque o cuba (“VAT Photopolymerisation”):** proceso en el cual una resina fotorreactiva líquida o en pasta se cura de forma selectiva en una cuba mediante la reacción química de polimerización UV con láser o una luz de área controlada.

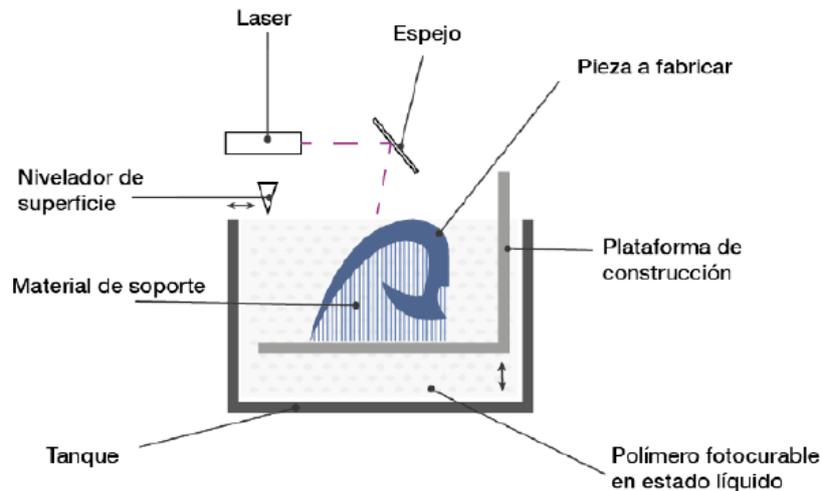


Figura 8. Esquema del proceso de fotopolimerización en tanque [16]

- **Proyección de material (“Material Jetting”):** es una técnica mediante la cual se realiza una pieza en 3D proyectando gotas de material selectivamente capa por capa. Se pueden utilizar materiales que posteriormente se solidifican a temperatura ambiente, como la cera fundida, o resinas fotosensibles líquidas que se solidifican con radiación luminosa.

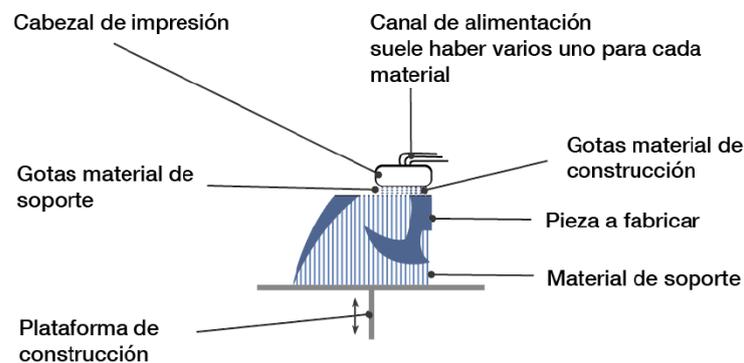


Figura 9. Esquema del proceso de proyección de material [16]

- **Proyección de aglutinante (“Binder Jetting”):** en este proceso se utiliza material en polvo o partículas y un agente aglutinante líquido para su adhesión por reacción química o térmica. El polvo puede ser de muchos tipos, ya sea polimérico, que utiliza ceras, epoxis y otros adhesivos; metálico o cerámico, que se unen por sinterizado o la adición de otro material fundido.

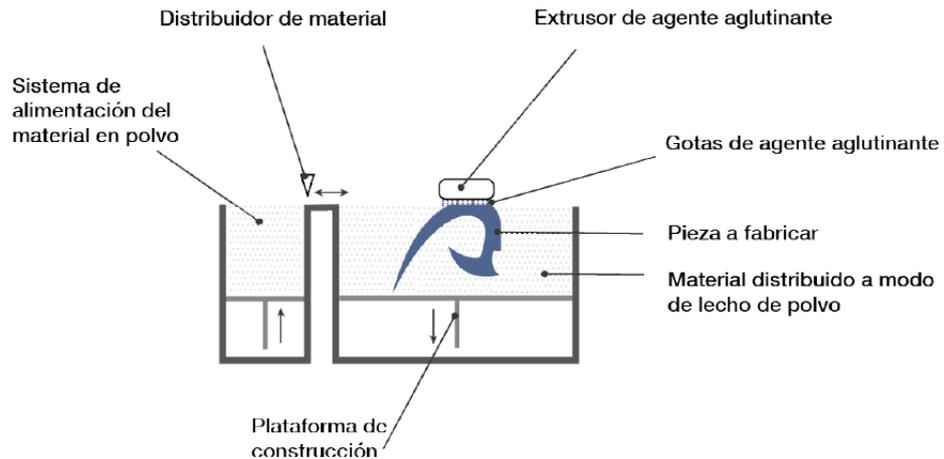


Figura 10. Esquema del proceso de proyección de aglutinante [16]

- **Fusión de lecho de polvo (“Powder Bed Fusion”)**: este proceso de fabricación utiliza un lecho de polvo que funde de forma selectiva mediante el aporte de energía térmica. Esta energía, que causa una reacción química, puede proceder de un láser, de un haz de electrones o de una lámpara de infrarrojos. Los polvos que se utilizan pueden ser polímeros termoplásticos, metales o cerámicas y la necesidad de aglutinantes o rellenos varía en función del proceso.

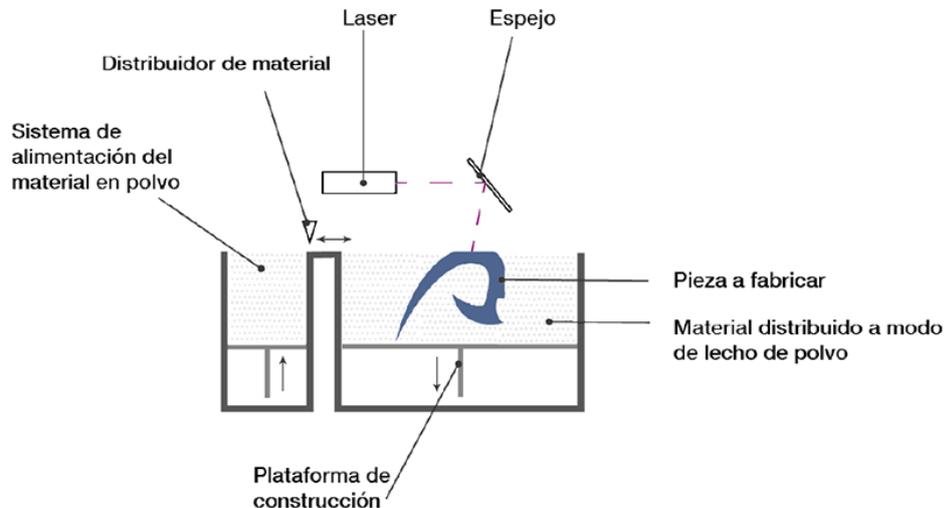


Figura 11. Esquema del proceso de fusión de lecho de polvo [16]

- **Extrusión de material (“Material Extrusion”)**: es una técnica en la que el material se distribuye capa a capa mediante una boquilla u orificio de forma controlada. El material, en forma de filamento o pasta, se une gracias a una fuente de calor, ultrasonidos o a una reacción química. Habitualmente se utilizan termoplásticos y cerámicas estructurales como materia prima.

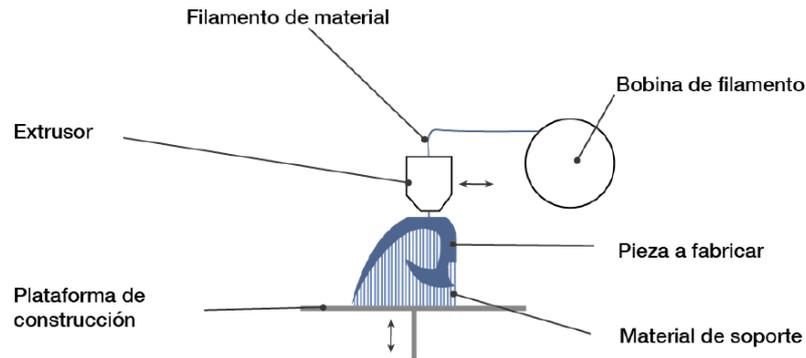


Figura 12. Esquema del proceso de extrusión de material [16]

- **Deposición de energía focalizada (“Direct Energy Deposition”)**: en este proceso los materiales en forma de polvo o filamento se unen formando las capas por medio de energía térmica (láser, haz de electrones o arco de plasma) que produce la fusión. Los materiales más utilizados son metales, aunque se puede añadir polvo cerámico para aplicaciones concretas

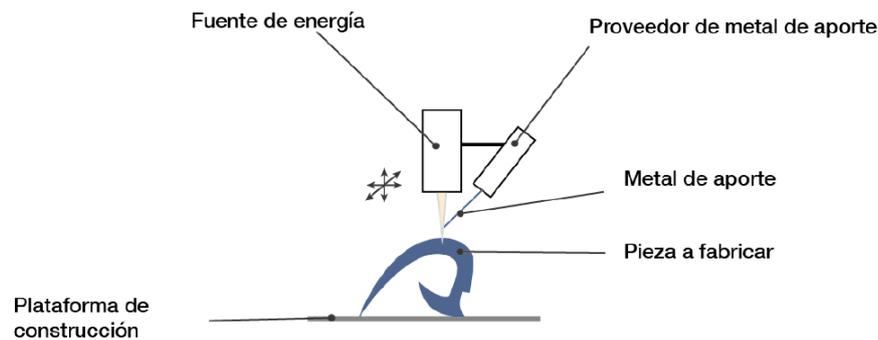


Figura 13. Esquema del proceso de deposición de energía focalizada [16]

- **Laminado de hojas (“Sheet Lamination”)**: en este método el material en forma de lámina u hoja se une capa a capa mediante un aglutinante, reacción térmica, química o ultrasonidos y se corta el exceso mediante un dispositivo de corte. El proceso puede realizarse con una bobina de material que funciona de forma continua o con hojas discontinuas. Los materiales de las láminas son papel, metales, polímeros o compuestos de metal y polvo cerámico, en su mayoría.

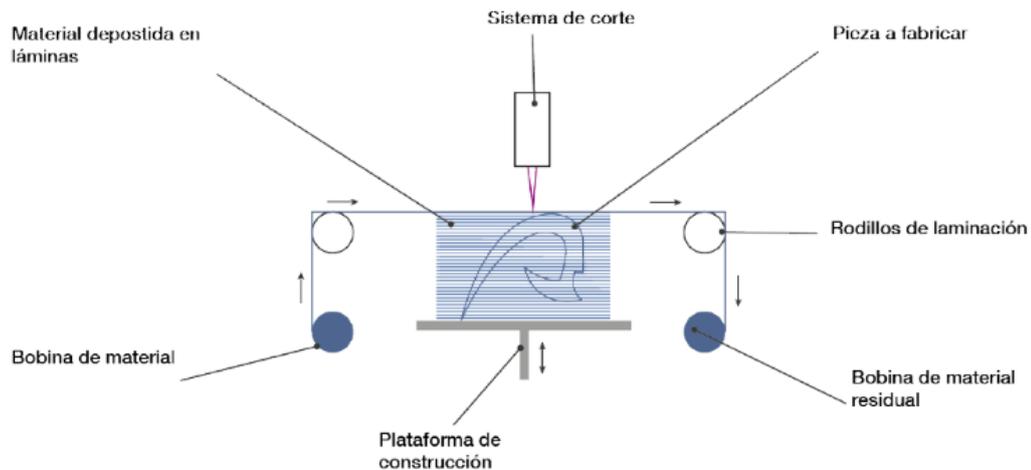


Figura 14. Esquema del proceso de laminado de hojas [16]

Cada proceso requiere un posprocesado diferente en función de la calidad y acabado que consiga y de la aplicación que vaya a tener la pieza impresa. Todos los que requieren de estructuras de apoyo precisan de un método adicional de eliminación de estos soportes, la mayoría necesitan limpieza y algunos necesitan tratamiento térmico, mecanizado, sinterizado, poscurado o pulido.

2.1.5. Aplicaciones

La fabricación aditiva tiene una amplia variedad de aplicaciones por su capacidad para realizar piezas complejas y personalizadas, simplificando el procedimiento con relación a los métodos tradicionales existentes.

Uno de los usos más habituales de la fabricación aditiva tiene lugar durante las fases de diseño y desarrollo de un producto, ya que es una técnica que permite el “rapid prototyping”, mediante lo que se fabrican prototipos de forma rápida y sencilla [10], que posibilitan la realización de pruebas del producto final (en especial la evaluación de la forma, la ergonomía y la estética), la comprobación de que el modelo cumple ciertos requisitos y la presentación del modelo del futuro producto al cliente. Este tipo de fabricación también puede acelerar el proceso de desarrollo del producto al permitir realizar moldes o utillaje rápidamente, sin necesitar otro utillaje específico o muchos procesos de fabricación. Asimismo, este método permite fabricar piezas y productos finales, además de complementar procesos de fabricación tradicional. Incluso ofrece la posibilidad de fabricar la misma pieza con más de un material, sin uniones añadidas, lo cual aporta propiedades muy complicadas de conseguir con otros procesos de fabricación tradicionales [17].

Los sectores más habituales de aplicación son: [18]

- Sector médico: es uno de los mayores productores de piezas impresas en 3D por las grandes ventajas que ofrece el uso de este tipo de tecnologías. Destacan estas piezas por la posibilidad para personalizarse en función de cada paciente, por la calidad que ofrecen para el usuario, por las complejas geometrías que pueden brindar para adaptarse completamente a la necesidad y por la posibilidad de integrarse en los sistemas médicos. Se pueden realizar biomodelos para ayudar al cirujano a estructurar una cirugía complicada, implantes artificiales, prótesis, herramientas para intervenciones y scaffolds (estructuras que soportan de forma temporal tejidos y permiten su crecimiento). Dentro de las posibilidades aplicadas a este sector se encuentra la bioimpresión, una tecnología muy novedosa que posibilita la regeneración de tejidos u órganos [19]. Técnicas similares permiten imprimir alimentos y podrían llegar a posibilitar la personalización de su contenido nutricional [20].
- Sector aeronáutico: es un gran demandante de piezas fabricadas por impresión 3D por ser una industria que no requiere grandes volúmenes de producción y por la necesidad de piezas con resistencia mecánica, geometrías complejas y ligeras. Un ejemplo de aplicación son los componentes de plástico para conducciones de aire o piezas metálicas para turbinas de motores.
- Sector de la automoción: utilizan la fabricación aditiva para realizar prototipos y primeras series, aunque este sector se ve limitado por la baja producción que permiten las máquinas de impresión 3D. Sin embargo, en el ámbito de la competición, como en la Fórmula 1, ofrece grandes ventajas por los requerimientos de resistencia mecánica, ligereza, tiempos y personalización.
- Sector de producción de moldes y matrices: engloba a otros sectores, como el de la automoción, que requiere de sus servicios. Una de las ventajas de la fabricación aditiva está directamente relacionada con este ámbito, al permitir la personalización y optimización de piezas sin necesidad de programar toda una cadena de producción para realizarlas, lo que simplifica la producción de moldes, partes de estos o canales de refrigeración. Los moldes fabricados por aditiva permiten realizar canales y geometrías complejas adaptadas a las necesidades, lo cual ofrece ventajas de control del enfriamiento del material, del ciclo de inyección y de mejora de los requerimientos de la pieza final.

- Sector de la joyería, textil, arte, mobiliario y construcción: el uso de la fabricación aditiva en este campo es de gran interés por las posibilidades de libertad y de fabricación de diseños propios con relativa rapidez. En la joyería, actualmente, se utiliza poco, por el coste de las materias primas necesarias y su gestión. Sin embargo, la posibilidad de imprimir en gran variedad de materiales abre las puertas a realizar, por ejemplo, productos de arcilla e, incluso, de hormigón o cemento, útiles para fabricar casas de forma muy rápida.

Hoy en día, la fabricación aditiva cuenta con limitaciones que acotan sus aplicaciones, como la dificultad de homologar este tipo de productos y procesos, los tiempos y la productividad de las máquinas, los acabados, las tolerancias, el coste y el tamaño máximo de la pieza. Todas estas características se están trabajando para conseguir una mejora. Además, se están ampliando las posibilidades que tienen estas tecnologías, buscando nuevas aplicaciones. Se pretende conseguir la personalización en masa y se plantean opciones de negocio relacionadas con la flexibilidad que ofrecen estos productos, como la fábrica 2.0, que permitiría que los usuarios diseñen su producto y envíen el modelo digital para su fabricación, reduciendo los costes, inventarios y tiempos de entrega, o la fábrica itinerante, para solventar la necesidad de piezas donde no hay posibilidad de fabricarlas, por ejemplo, en misiones militares. [18]

2.2. FUSIÓN LÁSER DE LECHO DE POLVO

2.2.1. Introducción

Como se ha mencionado anteriormente, la Fusión Láser de Lecho de Polvo (LPBF) es un tipo de fabricación aditiva, en concreto, de fusión de lecho de polvo, que utiliza un láser como energía térmica para fundir la materia prima que se encuentra en forma de partículas. [15]

El origen del LPBF que se conoce hoy en día tiene lugar en la década de los 90, cuando algunas empresas empezaron a indagar en la fusión de lecho de polvo con metales. En 1995, la empresa EOS patentó el proceso de Sinterización Directa de Metal por Láser (DSLML) y, a su vez, el Instituto Fraunhofer expuso un proceso muy similar, la Fusión Selectiva por Láser (SLM). [21]

La tecnología de LPBF, que engloba tanto a la DSLML como a la SLM, consiste en fundir de forma selectiva áreas del lecho de polvo capa a capa dibujando las diferentes secciones transversales de la pieza hasta completarla. En primer lugar, se realiza un diseño CAD de la pieza que se quiere imprimir para, posteriormente, exportarla al software de impresión 3D correspondiente. A continuación, se prepara el polvo fino de la materia prima, que se almacena en una tolva, se inserta en la máquina y se extiende formando la cama de polvo.

Esta máquina cuenta con una atmósfera controlada y una plataforma donde se coloca el polvo. Antes de comenzar con el proceso, es necesario calentar el polvo a la temperatura conveniente en cada caso, cercana a su punto de fusión, pero inferior, para que la solidificación tenga lugar rápidamente después del paso del rayo láser. La potencia de este láser se ajusta para conseguir la unión entre las partículas del polvo de la capa superior. Una vez realizada la sección de esa capa de la cama de polvo, se baja la cama de impresión y se aplica otra fina capa mediante un rodillo. Según se van realizando las capas, se van enfriando y solidificando. Este proceso se repite hasta completar la pieza. [21] [22]

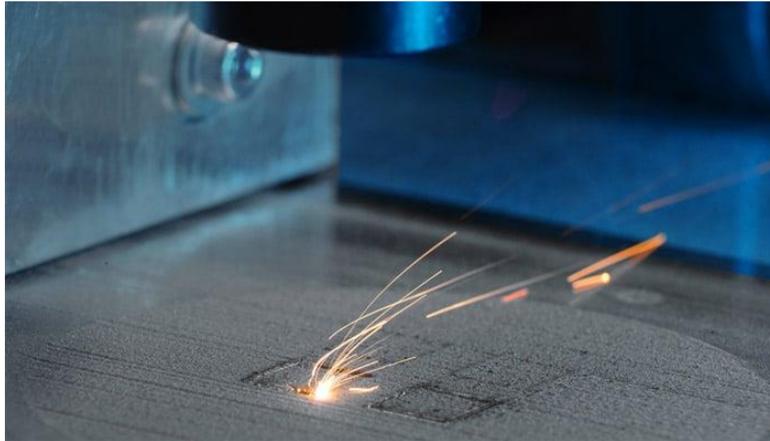


Figura 15. Fabricación por fusión láser de lecho de polvo [22]

En el momento en el que se obtiene la pieza impresa, se enfría la impresora y se elimina todo el polvo sobrante, frecuentemente mediante succión, aire comprimido o chorro de arena, aunque también se puede realizar de forma manual. Para poder realizar correctamente la pieza y disminuir las distorsiones se utilizan soportes, cuya eliminación es necesaria durante el postratamiento por mecanizado, corte o electroerosión por hilo. Tras estos pasos necesarios, la pieza se puede someter a algún posprocesado adicional en función de la aplicación que se le vaya a dar, como un tratamiento superficial para mejorar la calidad o un tratamiento térmico para aliviar las tensiones residuales. [21]



Figura 16. Posprocesado de piezas realizadas por LPBF [21]

2.2.2. Tipos de fusión de lecho de polvo con láser

Tal como se ha señalado antes, la fusión de lecho de polvo puede realizarse mediante diferentes fuentes de energía: láser, haz de electrones o lámpara de infrarrojos [15]. Los tipos de procesos que se incluyen en el grupo de fusión de lecho de polvo de energía láser se pueden dividir en 3 bloques: Sinterización Selectiva por Láser (SLS), Fusión Selectiva por Láser (SLM) y Sinterización Directa de Metales por Láser (DMLS). Dentro de este grupo, los procesos que usan mayoritariamente polvo metálico son los llamados Fusión Láser por Lecho de Polvo (LPBF), entre los que se encuentran el SLM y el DMLS. Ambos procesos se suelen tratar como uno solo, aunque existan diferencias entre ellos. [17] El proceso más conocido por LPBF es el SLM.

En la Fusión Selectiva por Láser se funde por completo el polvo llevándolo a estado líquido para formar un elemento uniforme, de forma que se una el polvo de una misma capa entre sí y se adhiera a la capa anterior, lo cual crea una buena unión y una pieza con una estructura sólida, más dura y duradera, pero que necesita un mayor tiempo de enfriamiento. Por otro lado, en la Sinterización Directa de Metales por Láser la capa de polvo se calienta con el láser a una temperatura menor que en el proceso anterior, consiguiendo calentar la superficie lo necesario para que las partículas de polvo se fusionen parcialmente para unirse, sin llegar a fundirse al completo. Este proceso es más eficiente en términos de consumo energético, pero las piezas que se obtienen son más porosas y por lo tanto con una peor microestructura. [17]

Otra diferenciación que puede existir en los procesos de LPBF es en función de la máquina de impresión. Comúnmente, las máquinas de este tipo utilizan espejos galvanométricos y lentes de enfoque $f-\theta$ para dirigir el haz del láser con mayor libertad y precisión, como se puede observar en la Figura 17 [23], permitiendo una configuración más compactada de la máquina. Así la fuente láser podría estar situada en la posición más favorable, en cuanto a ahorro de espacio se refiere, y enfocar a uno o varios espejos que serían los encargados de dirigir el haz y desplazarse. Sin embargo, algunas máquinas más simples enfocan el haz de láser directamente sobre la cama de polvo.

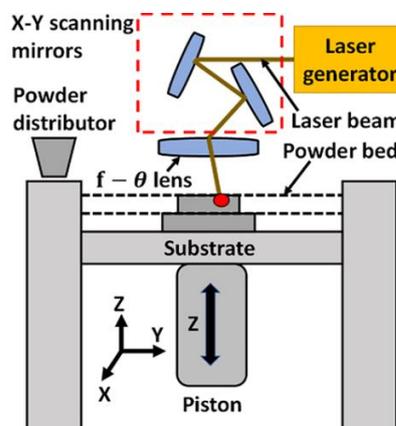


Figura 17. Diagrama de una máquina de LPBF [23]

2.2.3. Polvo metálico

El material que constituye la cama de polvo y mediante el que se realiza una pieza por LPBF es el polvo metálico, en general, aunque se puede usar polvo cerámico o compuesto. Los polvos utilizados y las aplicaciones más comunes son: [24]

- Aleaciones de aluminio: son materiales ligeros muy utilizados en mecánica, automoción o la industria aeroespacial.
- Aleaciones de titanio: tienen buenas propiedades por la relación entre su densidad y resistencia, además, constan de buena resistencia a altas temperaturas y a la corrosión. El titanio es un material caro, por lo que se utiliza para aplicaciones concretas como la medicina o piezas aeroespaciales.
- Aleaciones de cobalto: son duras, resistentes al desgaste y biocompatibles; utilizadas en el ámbito dental, médico, aeroespacial y en maquinaria. Las más comunes están constituidas por cromo-cobalto [21].
- Aleaciones de cobre: con buenas propiedades térmicas y eléctricas; utilizadas en componentes y dispositivos eléctricos y electrónicos.
- Aleaciones de níquel: son resistentes a altas temperaturas y a la corrosión y usadas en la industria aeroespacial, de la automoción y de maquinaria.
- Aceros inoxidable: son dúctiles y resistentes a la corrosión y a los productos químicos. Sus aplicaciones principales son en maquinaria y en la industria alimentaria y química.
- Aceros para herramientas: son duros y tienen buena ductilidad y resistencia al desgaste. Su uso típico se centra en la fabricación de moldes y útiles.
- Metales amorfos: son resistentes a la corrosión e isotrópicos; con aplicaciones en la electrónica de consumo y aplicaciones médicas por ser biocompatibles.
- Metales preciosos: tienen buena resistencia a la corrosión y son utilizados en joyería y moda por su alto brillo metálico.
- Metales refractarios: su punto de fusión y su densidad son elevados. Se usan comúnmente en medicina nuclear.

2.2.4. Producción del polvo metálico

El polvo para la fabricación aditiva tiene unas propiedades concretas de esfericidad, es por ello que no todos los procesos para obtener polvo son aptos.

Los métodos más comunes y con mejores resultados para producir polvo metálico para fabricación aditiva son la atomización de gas, de agua, de plasma y centrífuga; aunque cada uno obtiene polvo con diferente forma y tamaño. La atomización por plasma es con la que se consiguen partículas con una mejor forma; sin embargo, es la más cara y necesita que el material de aporte sea cable o polvo. La atomización centrífuga por sí misma es la que mayor tamaño de partícula produce, alrededor de unas 100 micras, por lo que es el método que menos conviene. [25] La atomización a base de agua consigue polvo de tamaño de grano mayor y con una morfología más alargada, por lo que tampoco es la mejor opción para la fabricación aditiva. Mientras que la atomización de gas obtiene partículas más finas y esféricas [26]. Por lo tanto, el proceso que se va a utilizar para el estudio y, por consiguiente, a desarrollar es la atomización de gas, por ser el más compensado en cuanto a calidad de partícula y precio y el más utilizado en este sector. [25]

La atomización de gas consiste en fundir el material que se va a utilizar como base, atomizarlo, posprocesarlo y validarlo.

En primer lugar, hay que seleccionar el material que se va a fundir según sus características, ya que estas afectan al proceso de fundido y a las propiedades del polvo que se obtiene, por lo que es recomendable obtener muestras y analizarlas. Este material puede estar en estado sólido en forma de tocho o polvo y pueden ser tanto metales puros, como aleaciones, como chatarra. Para fundir la materia prima se puede utilizar un sistema abierto al aire o cerrado, que usa un sistema de vacío, lo cual tiene ciertas ventajas al protegerlo de la contaminación del aire, de la oxidación, de ciertos gases o de otros elementos, aunque el tamaño del lote que se obtiene normalmente es menor. Las máquinas de atomización de gas contienen un horno para fundir el material bajo unas determinadas condiciones en una atmósfera protectora o en vacío. [25] El proceso se fundamenta en insertar el material sólido en un crisol, donde se lleva a una determinada temperatura para ser vertido por medio de una hilera perforada [26].

Este proceso de atomización consiste en cotar el hilo de metal líquido mediante una corriente de gas a presión y, posteriormente, enfriarlo de forma rápida para que solidifiquen las pequeñas gotas según van cayendo para conseguir el polvo [25]. Los gases más utilizados para usar a presión en este proceso son el argón y el nitrógeno [27] que, al ser gases inertes, pueden ayudar a prevenir la oxidación durante el proceso de fabricación [28].

Hay dos formas de realizar la atomización: la caída libre y la atomización de gas de acoplamiento cercano (CCA) o de colector único (SGA), que se pueden observar en los esquemas de la Figura 18. Ambas se basan en los mismos principios, pero su diferencia reside en la distancia que hay entre el flujo de gas y la cámara donde se deposita el polvo resultante, siendo la de caída libre de entre 10 y 30 cm y la CCA casi inmediata. Las ventajas de la segunda es la

capacidad de producir polvo fino necesitando menos espacio y la posibilidad de conseguir polvo más puro al reducir la distancia en la que este se pueda contaminar. En cambio, sus desventajas son la posibilidad de reflujo y de congelación. [25]

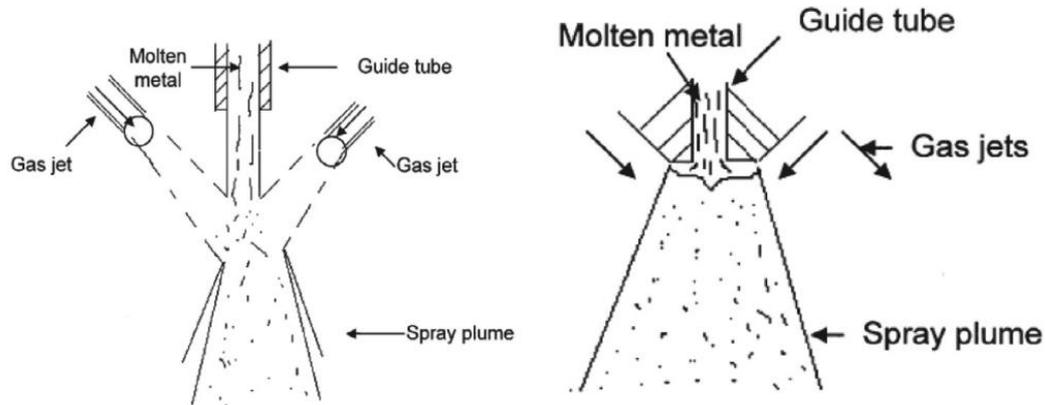


Figura 18. (a) Proceso de atomización de caída libre (b) Proceso de atomización de gas de acoplamiento cercano [25]

Mediante este proceso se obtienen partículas de polvo de entre 10 y 100 micras [26]. Para conseguir partículas más pequeñas hay que aumentar la velocidad del flujo de metal y de gas. Sin embargo, la forma y distribución de las partículas están condicionadas por la aleación y el sistema que se use. [25]

2.2.5. Reutilización del polvo metálico sobrante

Una de las ventajas de la fabricación aditiva con respecto de la fabricación sustractiva es la minimización del desperdicio de materia prima. Para que esto se pueda cumplir y se fabrique la pieza únicamente con el material necesario, es imprescindible que no se deseche el polvo sobrante del lecho, que se estima que ronda el 70% del total. Las características específicas de estas partículas, es decir, su morfología, tamaño, distribución y composición hacen que se eleve el precio, por lo que su reutilización y caracterización es crucial tanto para el medio ambiente como para los costes del producto. [29]

Para reutilizar el polvo sobrante es necesario tamizarlo y limpiar las posibles impurezas de partículas con mayor tamaño o aglomeradas, ya que hay que eliminar ese polvo cercano al lugar al que se encontraba la pieza y que puede haberse fundido parcialmente. Existen máquinas incluso que permiten filtrar el polvo automáticamente. [29]

Tras depurarlo, se puede utilizar directamente ese polvo o mezclarse con polvo nuevo. La mezcla de polvos tiene sus riesgos al no poder cuantificarse de forma clara el cambio de las propiedades del polvo y, por consiguiente, de la pieza fabricada. A causa de que los sectores de aplicación de las piezas realizadas por fusión láser de lecho de polvo son bastante estrictos, es necesario estudiar la degradación de las propiedades del polvo con los sucesivos usos. [29]

Estas propiedades del polvo reutilizado han sido analizadas en diferentes estudios, mediante varias pruebas, como el test del embudo de fluidez, el análisis del índice de Hausner y la medición del ángulo de reposo. Se ha concluido que tras sucesivas reutilizaciones el tamaño de las partículas va aumentando y su esfericidad disminuyendo, empeorando su morfología. [30]

En lo referido a la fluidez del polvo existe más controversia entre diferentes estudios y pruebas. Tras ciertas pruebas de embudo se ha obtenido que al reutilizar el polvo la fluidez aumenta a causa del aumento del tamaño del grano y la disminución de la adhesión y las fuerzas entre partículas. Esto lo corrobora la disminución del índice de Hausner con el aumento de las reutilizaciones (mostrado en la Figura 19), que indica una reducción en la cohesión entre las partículas del polvo y, por lo tanto, el aumento de su fluidez y de la capacidad para moverse libremente. Con este polvo no virgen las partículas más pequeñas se unen a las grandes, lo que les impide situarse en los intersticios y, por ende, compactarse. Esto crea una distribución más homogénea en cada capa de la cama por el tamaño de las partículas y mayor dificultad de movimiento entre ellas. Esta diferencia entre la compactación de partículas reutilizadas y sin reutilizar se puede observar en la Figura 20. Otros estudios muestran que la fluidez mejora por la supresión de parte de la humedad por las prolongadas exposiciones al vacío a altas temperaturas y por la disminución de las partículas satélite, que son pequeñas partículas que se adhieren a la superficie de la pieza que se está imprimiendo, debidas a salpicaduras de material fundido o desprendimiento de partículas del lecho al depositar una nueva capa. Sin embargo, otros análisis de fluidez han concluido que la reutilización del polvo y su consecuente disminución de esfericidad reduce su capacidad de compactación y su fluidez. [30]

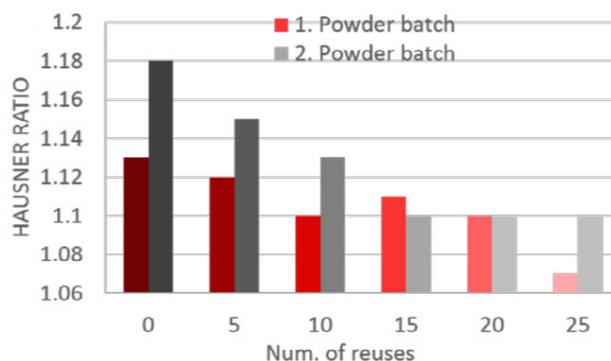


Figura 19. Análisis del índice de Hausner para dos lotes de polvo [30]

Por otro lado, el ángulo de reposo del polvo decrece a medida que aumenta el número de reutilizaciones realizadas, a causa del aumento de tamaño de la partícula, que ocasiona la disminución de las fuerzas de fricción entre estas y el aumento de la fluidez [30]. En la Figura 21 la imagen A presenta el polvo en reposo tras 5 reutilizaciones y la B el polvo tras 25.

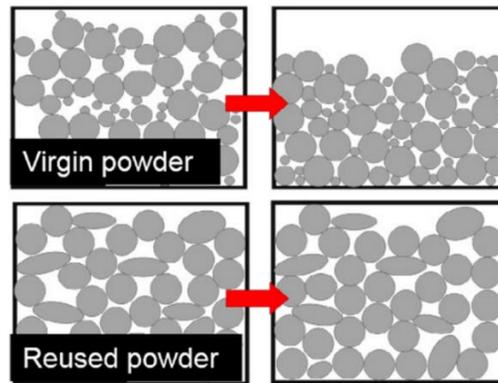


Figura 20. Comparación del mecanismo de compactación del polvo virgen (sin reutilización) y reutilizado [30]

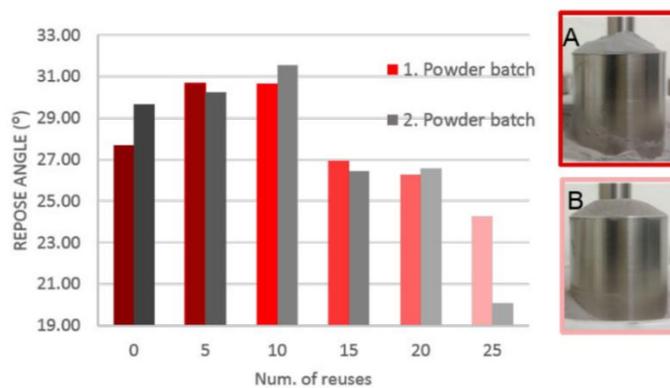


Figura 21. Análisis del ángulo de reposo para dos lotes de polvo [30]

En la pieza final realizada con polvo reutilizado también se observan diferencias en comparación con la de polvo virgen. Su rugosidad aumenta a causa de que el tamaño de las partículas también lo hace; entonces, el tamaño de las partículas que se encuentren parcialmente fundidas en la superficie también aumenta. La porosidad de la pieza también incrementa en función de las propiedades del polvo, debido al aumento de las salpicaduras de metal fundido en el lecho de polvo, ya que las partículas de óxido más pequeñas no se pueden tamizar; o por el cambio en la compactación de la capa, que ocasiona una irregular distribución del calor del láser, o una fusión incompleta. Además, algún estudio ha determinado que la resistencia máxima a la rotura aumenta con este polvo. [30]

Por estos cambios en las propiedades del polvo, el número de veces que se puede reutilizar para que las características se mantengan dentro de los valores admisibles está limitado. También este número depende del material del que este formado el polvo, por lo que si se requiere conocer en profundidad esta posibilidad de reutilización sería necesario realizar estudios con el material concreto. Además, hay que tener en cuenta que por cada reutilización es necesario ajustar los parámetros de impresión para conseguir unos resultados óptimos.

CAPÍTULO 3. DEFINICIÓN DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

3.1. INTRODUCCIÓN

La creciente concienciación del cuidado del medio ambiente por parte de los productos que se realizan y se consumen en la industria, así como el impacto de las actividades que se llevan a cabo, obliga a otorgar importancia a la sostenibilidad de lo que se produce.

Es común pensar que la sostenibilidad de un producto depende de cuanta energía consume o cuantas emisiones genera durante su uso. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los productos o servicios no solo crean impacto ambiental durante la fase de uso, sino que fabricarlos, reciclarlos y otras muchas etapas de su ciclo de vida también influyen. Por esto, es crucial analizar todos los recursos que se consumen y las emisiones o desperdicios que se producen durante todas las fases del producto desde la extracción de su materia prima hasta el final de su vida y su reciclaje, si es pertinente.

El Análisis del Ciclo de Vida es una técnica de gestión ambiental que estudia los impactos ambientales potenciales que ocasiona un producto o proceso a lo largo de su ciclo de vida. Esta herramienta trata de recopilar y evaluar las entradas y salidas de un sistema de producto durante su ciclo de vida. El sistema de producto está constituido por un conjunto de procesos unitarios, los cuales comprenden una secuencia de operaciones de una misma etapa, que se conectan por flujos formando el modelo del ACV. Estos flujos pueden ser elementales, es decir, que proceden o terminan en el medioambiente directamente; de producto, que son productos de entrada o salida que se intercambian entre sistemas; o intermedios, que tienen lugar entre los procesos unitarios. [31]

El ACV viene definido por las normas UNE-EN ISO 14040 y UNE-EN ISO 14044, aunque las normas ISO 14041, ISO 14042 e ISO 14043 son complementarias [32].

El impacto ambiental de un producto o servicio está constituido por los efectos en el medioambiente resultados de sus aspectos ambientales, es decir, son las repercusiones del sistema de producto sobre el ecosistema, la salud humana y el consumo de los recursos. Un ejemplo de impacto ambiental puede ser el efecto invernadero y el agotamiento de los recursos. [33]

Hoy en día, el ACV es una técnica muy común que se utiliza en una amplia variedad de ámbitos, como para productos de consumo, industriales y del sector de la construcción; o servicios.

3.2. ORIGEN Y DESARROLLO

Esta herramienta se originó gracias al Midwest Research Institute (MRI), quienes realizaron el primer ACV en 1969 para Coca-Cola, que buscaba minimizar los recursos consumidos y, por consiguiente, las emisiones producidas. [34]

A continuación, el desarrollo se realizó casi al mismo tiempo en Estados Unidos y Europa, de forma que durante la década de los 70 se llevaron a cabo múltiples análisis, en algunos de los cuales participó el MRI con otros grupos efectuando cálculos de energía y métodos de balance de entradas y salidas. Algunas empresas concluyeron que esta herramienta no era apta para todos los estudios, ya que requiere mucho tiempo e implica un alto coste, en especial para las empresas pequeñas. [34]

Durante los años 80 el uso del ACV fue adquiriendo popularidad, además de que se produjeron cambios importantes para su aplicación, como la creación de metodologías que categorizan los impactos o la accesibilidad para el público en general. [34]

Para el establecimiento definitivo del ACV en muchos de los proyectos que se realizan en todo el mundo fue clave la Sociedad de Toxicología y Química Medioambiental (SETAC), quienes definieron el primer Código de prácticas para el ACV, para estandarizar los estudios. Más adelante, la Organización Internacional de Normalización (ISO) definió una estructura para el ACV, así como métodos, terminologías y procedimientos. [34]

El Análisis del Ciclo de Vida ha continuado su evolución; sin embargo, actualmente, se encuentra aún en desarrollo. En los próximos años se pretende realizar ACV completos para aplicaciones muy variadas.

3.3. ETAPAS DEL ACV

La metodología de análisis consiste en seguir las etapas que se desarrollan a continuación.

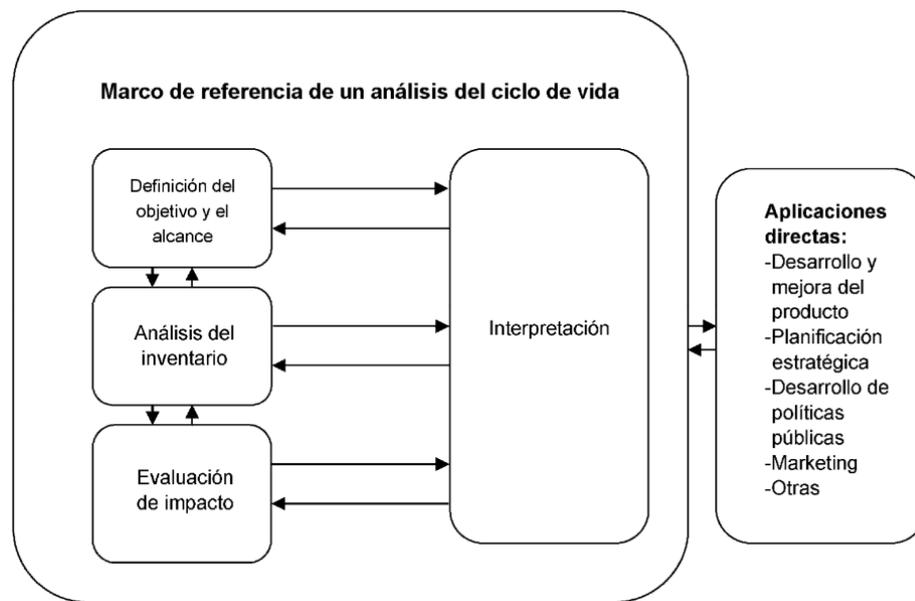


Figura 22. Etapas de un ACV [31]

3.3.1. Objetivo y alcance

En esta etapa se define el producto, servicio o proceso que se va a estudiar, la unidad funcional, la metodología que se va a utilizar, se determina el contexto en que se realiza, se definen los límites del sistema, los efectos ambientales que se van a evaluar, se establece la aplicación, las razones para elaborar el ACV y el público al que se orienta [33]. La unidad funcional es el tipo de producto o elemento que tiene una función determinada y se compara entre los diferentes sistemas que se estudian. Además, mediante la unidad funcional se cuantifican las entradas y salidas. Esta no tiene por qué ser una única unidad de producto, puede ser un número definido de unidades siempre que se indique claramente. [31]

Dentro de los límites del sistema se pueden determinar aplicaciones parciales del ACV, expuestas en la Figura 23. Existen diferentes denominaciones para el Análisis del Ciclo de Vida en función de las etapas del ciclo de vida del producto que involucra, pudiendo realizarse únicamente de la fase de fabricación (“gate to gate” o de la puerta a la puerta); desde la extracción de la materia prima hasta la fabricación (“cradle to gate” o de la cuna a la puerta); desde la extracción de la materia prima hasta el desecho y reciclado parcial, pasando por la fabricación, el ensamblaje, el transporte, el uso y el mantenimiento (“cradle to grave” o de la cuna a la tumba); o desde la extracción de la materia prima hasta el cierre del ciclo, en la que el producto se reutiliza o se recicla para crear nuevos productos o el mismo (“cradle to cradle” o de la cuna a la cuna).

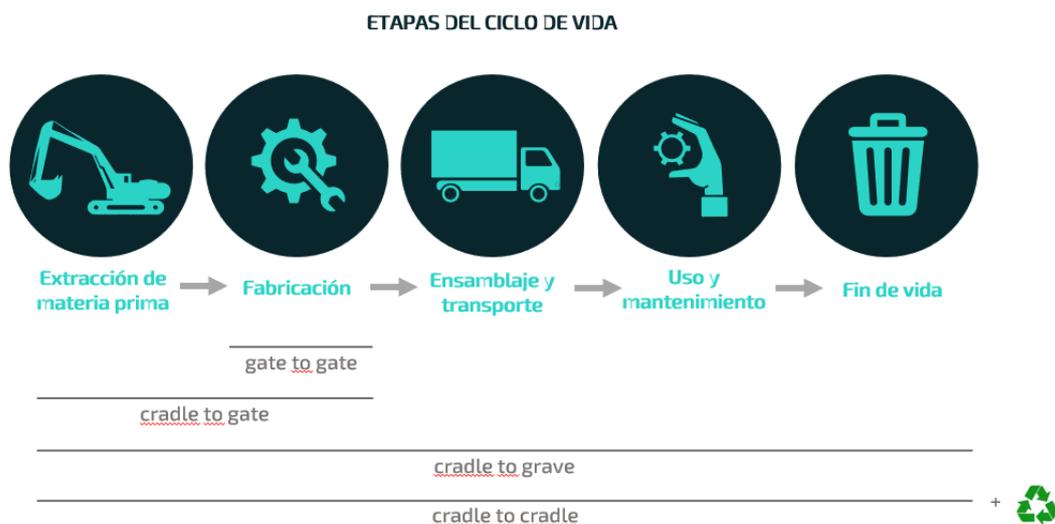


Figura 23. Aplicaciones parciales del ACV (Elaboración propia)

Sin embargo, tal como se ha mencionado antes, hay que tener en cuenta que siempre va a ser mejor un análisis del ciclo completo, ya que todos los impactos son importantes. La aplicación parcial del ACV solo es recomendada para usos concretos que no requieren todas las etapas, aunque también depende de otros factores como la limitación de los datos y costes, las hipótesis establecidas y los criterios de corte [31].

En el alcance, también es necesario definir el tipo y formato del informe del ACV que se va a realizar según el público objetivo. [33]

Tanto el objetivo como el alcance se puede cambiar a medida que se desarrolla en análisis [31], ya que todas las etapas tienen que estar relacionadas de forma correcta con ello.

3.3.2. Análisis del inventario

En el Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (AICV) se introducen los procesos unitarios que forman el ciclo de vida del producto y sus correspondientes entradas y salidas. Los elementos del inventario son los procesos unitarios, los flujos intermedios, el sistema de producto, y los flujos de entradas y salidas de cada proceso, que se pueden agrupar en categorías. En esta etapa se determinan los materiales y recursos utilizados (entradas) y se definen las emisiones ambientales y residuos que ocasiona cada proceso (salidas). Además, en las salidas se determinan los productos resultantes de realizar cada proceso.

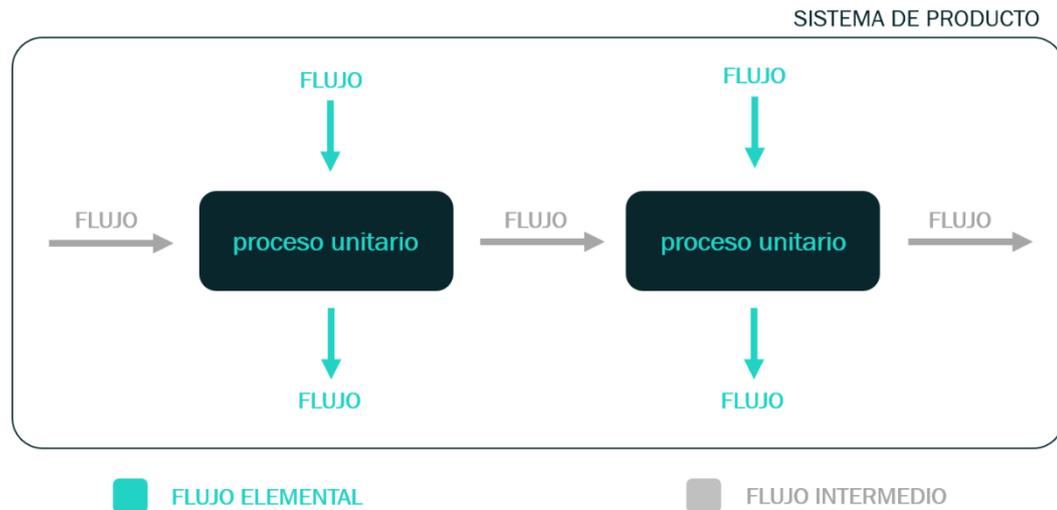


Figura 24. Diagrama de los elementos del inventario (Elaboración propia)

Esta es la etapa que más tiempo conlleva, ya que la obtención de datos de fuentes fiables y la realización de los correspondientes cálculos es un requisito indispensable para que el análisis obtenga resultados válidos. Los datos pueden ser de dos tipos según su fuente: datos primarios, que son los datos generados por medición directa, cálculos o estimaciones de la fuente original; o datos secundarios, que se obtienen de bibliografía.

En ocasiones, el Análisis del Ciclo de Vida se puede limitar a elaborar e interpretar tan solo el análisis del inventario, lo que se conoce como Inventario del Ciclo de Vida (ICV). Estos estudios están compuestos de 3 etapas: la definición del objetivo y el alcance, el análisis del inventario y la interpretación [31].

3.3.3. Evaluación del impacto

En esta etapa se analizan los posibles efectos del consumo de recursos y de los impactos ambientales definidos en la fase anterior, sobre el ser humano y el medioambiente [33]. La evaluación del impacto solo estudia los aspectos ambientales que se definen en la primera etapa, no todos los existentes.

Los resultados del inventario son una serie de sustancias emitidas potencialmente peligrosas o elementos cuyo consumo puede afectar al medio ambiente que es necesario clasificar en categorías de impacto, definiendo los indicadores y los modelos de caracterización. [33] La Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) convierte la extracción de recursos y las emisiones en los factores de caracterización [35]. La caracterización consiste en calcular los valores de los indicadores multiplicando los números obtenidos en el inventario por los factores de caracterización, para determinar cuánto influye cada indicador a la categoría de impacto [33].

Existen dos tipos de categorías donde encontramos diferentes tipos de indicadores: de efectos intermedios o “midpoint”, que identifican a un problema en concreto, por ejemplo, el calentamiento global o la acidificación; y los de efectos de punto final o “endpoint”, que clasifica el impacto ambiental en 3 grandes bloques: biodiversidad o calidad del ecosistema, efecto en la salud humana y escasez de recursos. Los “endpoint” agrupan a los “midpoint” facilitando su comprensión. [35]

Es necesario tener en cuenta las categorías de impacto pertinentes en función de los elementos que forman los resultados del inventario, es decir, en función de los indicadores de categoría.

Los elementos concretos de la fase de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida se pueden observar en la Figura 25. Aquí se determinan también los elementos optativos de esta fase, que simplifican el análisis de los resultados. Estos son la normalización de los resultados, la agrupación de las categorías de impacto en diferentes grupos y la ponderación de los impactos en función de su gravedad relativa [33].

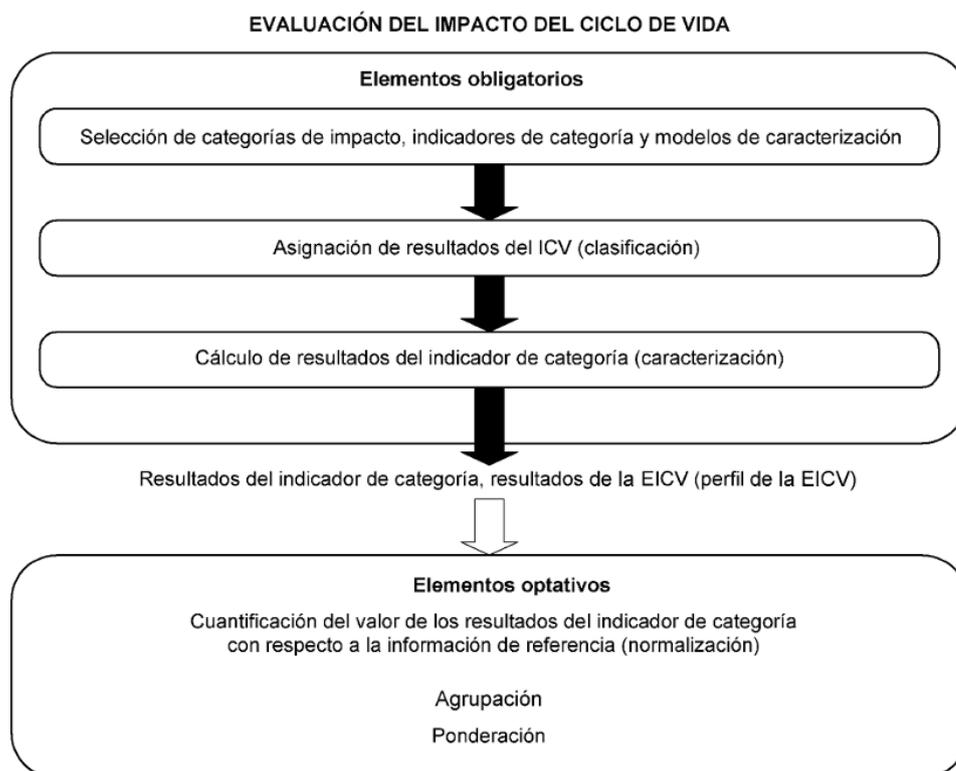


Figura 25. Elementos de la fase EICV [31]

Como añadido, es posible realizar otros análisis para establecer la calidad de los datos, como son: un análisis de gravedad, que determina los datos que más afectan al indicador; un análisis de incertidumbre de los datos y las hipótesis; o un análisis de sensibilidad, que estipula cómo los cambios en los datos o metodologías afectan a los resultados obtenidos. [33]

Para evaluar los impactos del Análisis del Ciclo de Vida existen varias metodologías o modelos de caracterización que, aunque no estén normalizadas, se utilizan para asignar los indicadores a cada categoría de impacto y determinan que datos del ICV se utilizan para cada indicador y cómo afecta cada sustancia al medio ambiente. Algunas metodologías exponen resultados más concretos y otras más generalizados. [33]

Método ReCiPe 2016

La metodología que se va a utilizar para el desarrollo de los dos ACV es el Método ReCiPe 2016, por lo que es la única que se va a definir.

Se ha escogido este método de evaluación de impactos por su ajuste al objetivo que está definido posteriormente en el desarrollo del ACV, ya que esta metodología transforma resultados más concretos en otros más tangibles, que muestran los impactos obtenidos aplicados a la salud humana, el medio ambiente y los recursos, y permite comparar ambos Análisis del Ciclo de Vida. Además, el software que se utiliza, GaBi, dispone de esta metodología para el análisis de los resultados, lo cual es un punto imprescindible y es una de las más utilizadas en los estudios.

Las categorías de impacto que estudia GaBi para esta metodología se definen en la Figura 26, en la que se observa cómo las categorías “midpoint” se convierten en las 3 categorías “endpoint”.

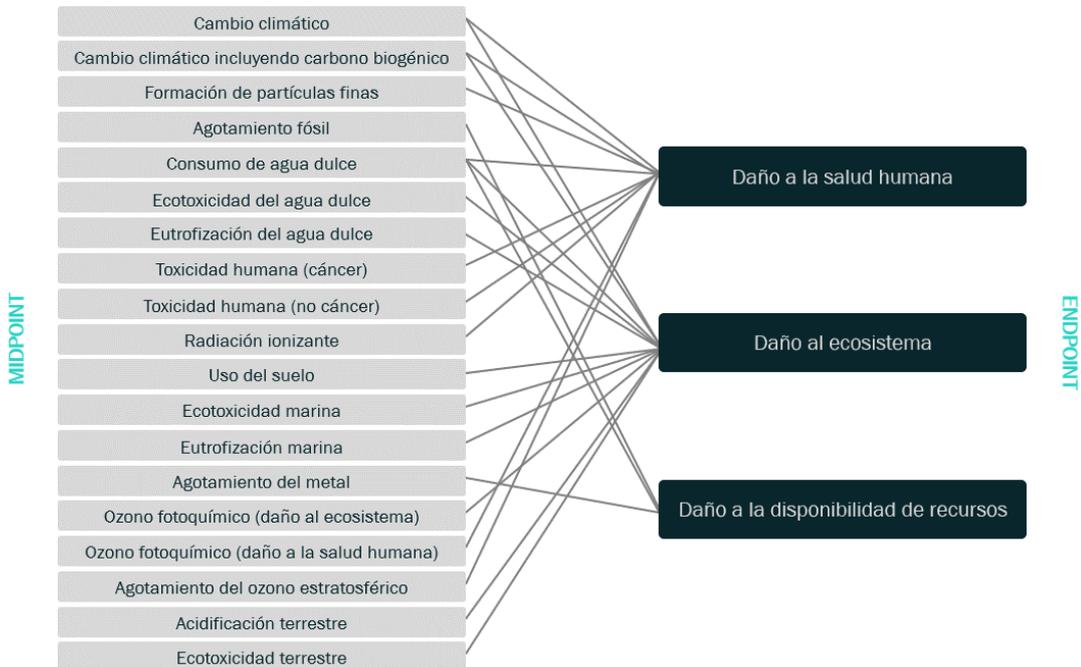


Figura 26. Categorías de impacto del método ReCiPe2016 (Elaboración propia)

3.3.4. Interpretación

En este momento, se evalúan los resultados obtenidos en las dos fases anteriores, para llegar a una conclusión que determine el proceso, producto o servicio que mejor se adapta al caso concreto [33].

En esta fase se determinan las hipótesis en las que se ha basado el estudio y se realiza un análisis de sensibilidad si se desea, que señala la incertidumbre del análisis realizado [33]; además, se verifica que el estudio sea completo y coherente en cuanto a los resultados obtenidos, también con lo definido en la etapa 1 [31].

3.3.5. Elaboración del Informe y revisión crítica

Tras la interpretación de los resultados obtenidos, de forma adicional, se elabora un informe y una revisión crítica externa.

El informe debe incluir las etapas del análisis y lo obtenido en él. Para realizarlo hay que conceder importancia al objetivo y al alcance del ACV; además, todos los datos, métodos, resultados y puntos determinantes incluidos en este se expondrán de forma precisa, total, clara y veraz. [33]

Por otro lado, la revisión crítica implica la participación de un experto interno, externo o una tercera parte independiente. Con ella se verifica el correcto uso de las normas, la validez de los datos, los métodos, la relación de las interpretaciones con el objetivo definido y la corrección del informe, en especial cuando va a ser público. [33]

3.4. APLICACIÓN DEL ACV A LA FABRICACIÓN ADITIVA

Para poder conocer la utilidad y la viabilidad ambiental de la fabricación aditiva se requiere realizar un Análisis del Ciclo de Vida de una pieza concreta siguiendo los pasos expuestos anteriormente. Para poder hablar en términos comparativos y comprender la diferencia existente en estos aspectos con un proceso tradicional de fabricación sustractiva, es necesario realizar el análisis de una misma unidad funcional fabricada por un proceso de aditiva, en este caso el LPBF, y otro de sustractiva, un mecanizado, con todos los procesos y elementos que conlleva la realización de estos.

En los siguientes capítulos se expondrá lo necesario para realizar ambos ACV, comenzando con una justificación de la unidad funcional de los análisis y siguiendo con el desarrollo y las conclusiones de este.

CAPÍTULO 4. JUSTIFICACIÓN DE LA PIEZA A ANALIZAR

4.1. PROCESOS DE FABRICACIÓN

El proceso de fabricación convencional que se va a utilizar para realizar la pieza es el mecanizado, en concreto, el fresado por la geometría que tiene. Es un buen proceso para comparar con la fabricación aditiva por ser opuestos, ya que uno aporta material y otro lo elimina del tocho inicial. Esto permite mostrar las ventajas que tiene la impresión 3D en lo que se refiere a ahorro de material.

El proceso de fabricación aditiva escogido es la fusión láser de lecho de polvo, ya que es uno de los tipos más utilizados para realizar piezas metálicas y de los que más energía consume. Además, permite obtener piezas con aplicaciones industriales y que son comparables con un proceso de fabricación sustractiva.

4.2. GEOMETRÍA

La geometría escogida para realizar los procesos es la siguiente pieza de un brazo robótico. El diseño de esta pieza se ha obtenido de un ejemplo de una optimización topológica realizada por el programa Inspire de Altair. Las piezas optimizadas topológicamente son buenas opciones para realizar por fabricación aditiva por la posibilidad de realizar las formas complejas y nervios con el mínimo material posible. Además, esta pieza mínimamente adaptada se puede fabricar por mecanizado por lo que es una opción apta tanto para fabricación aditiva como para sustractiva.

En la Figura 27 se puede observar la pieza inicial de la que se ha partido para realizar la pieza optimizada, mostrada en la Figura 28.

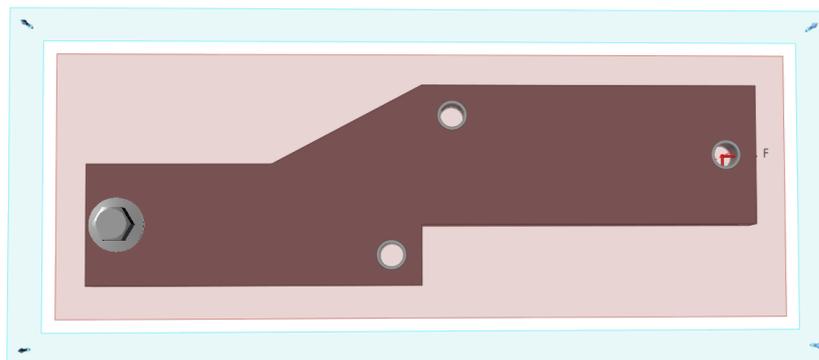


Figura 27. Pieza base para la optimización topológica (Ejemplo de Inspire 2023.1)



Figura 28. Pieza guía para el modelo CAD de la unidad funcional (Ejemplo de Inspire 2023.1)

En base a esta pieza, se ha realizado el correspondiente modelo CAD de la unidad funcional que se va a utilizar para el Análisis del Ciclo de Vida. En un principio se realizó el modelo de la Figura 29; sin embargo, al no poder fabricarse esta pieza por el proceso de fresado, se modificó la zona por la que no podía pasar la herramienta y se definieron todos los radios con un valor mayor de 2mm, ya que la herramienta que se utilizaría sería de diámetro 4 mm. Así la pieza con la que se realiza el estudio es la de la Figura 30.

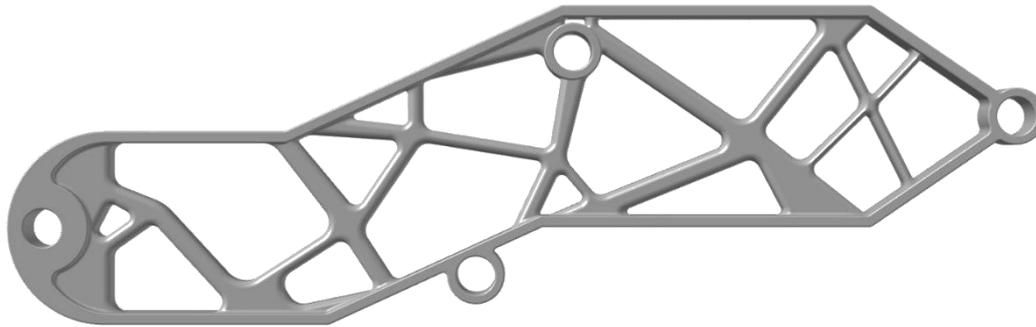


Figura 29. Pieza modelada inicialmente (Elaboración propia)

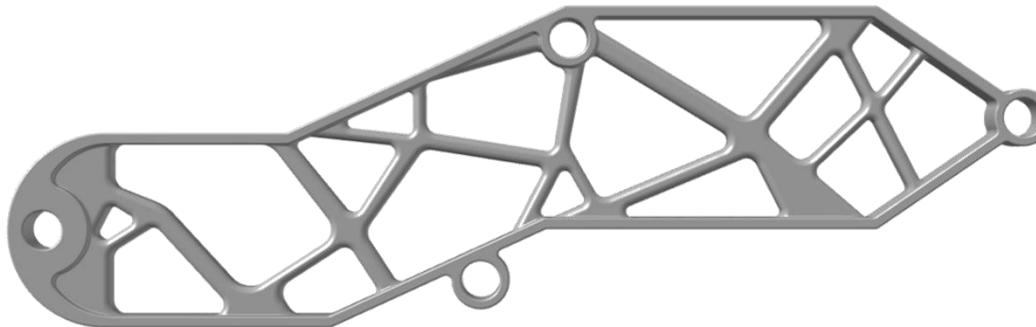


Figura 30. Pieza modelada finalmente (Elaboración propia)

4.3. DIMENSIONES MÁXIMAS

Las dimensiones máximas de la pieza, las cuales se pueden observar en la Figura 31, son 433 x 134,29 x 20,32 mm.

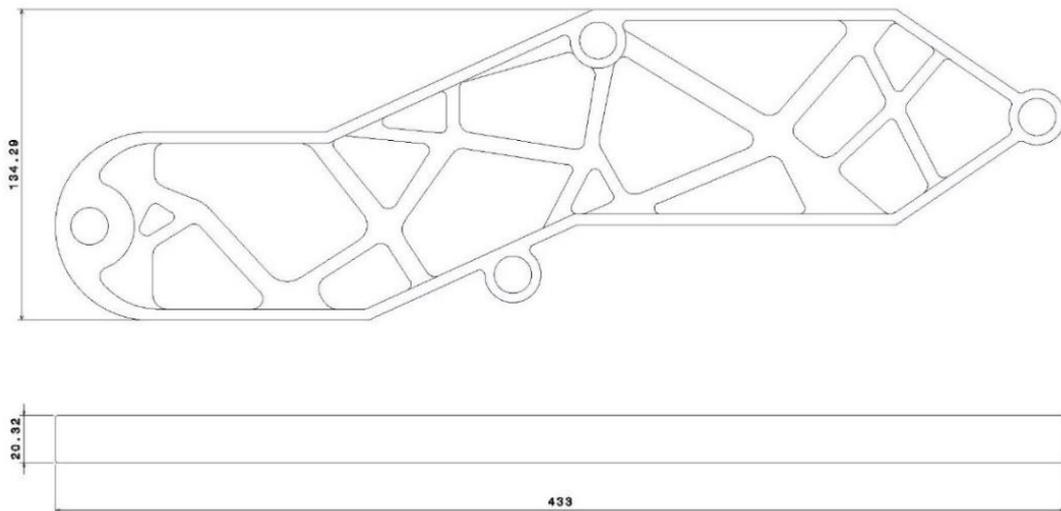


Figura 31. Dimensiones máximas de la pieza (Elaboración propia)

4.4. MATERIAL

Para la selección de un material apropiado para la pieza y para realizar los ACV se han tenido en cuenta varios puntos.

En primer lugar, se ha escogido un material apto para procesar por LPBF y por mecanizado. En un principio se planteó la aleación de aluminio AISi10Mg por su bajo punto de fusión y su buena conductividad térmica, características positivas para procesar el material por LPBF. Sin embargo, tras una búsqueda de datos para introducir en las entradas del inventario del ACV, se ha escogido el acero inoxidable 316L, material del que se posee más información. Este también es apto para fabricar por ambos procesos y tiene ventajas con respecto al AISi10Mg como su mayor resistencia a la corrosión y a la oxidación. Además, en la versión educativa del software que se va a utilizar hay algunos procesos útiles para este estudio. Su punto negativo es la baja conductividad térmica, pero esto es posible controlarlo mediante el ajuste de los parámetros de impresión y de la temperatura durante el procesado.

El material 316L es una aleación de acero inoxidable austenítico cuya composición se puede observar en la Figura 32.

Element	Mass (%)
Iron	Balance
Chromium	16.00 to 18.00
Nickel	10.00 to 14.00
Molybdenum	2.00 to 3.00
Manganese	≤ 2.00
Silicon	≤ 1.00
Nitrogen	≤ 0.10
Oxygen	≤ 0.10
Phosphorus	≤ 0.045
Carbon	≤ 0.03
Sulphur	≤ 0.03

Figura 32. Composición del acero inoxidable 316L [36]

En concreto, el material escogido tiene un 65,2% de hierro, 17% de cromo, 12% de níquel, 2,5% de molibdeno, 2% de manganeso, 1% de silicón, 0,1% de nitrógeno, 0,1% de oxígeno, 0,045% de fósforo, 0,03% de carbono y 0,025% de azufre.

La información general del material se recoge en la Figura 33.

Density	7.99 g/cm ³
Thermal conductivity	16.2 W/mK
Melting range	1371 °C to 1399 °C
Coefficient of thermal expansion (see note 1)	16 10 ⁻⁶ K ⁻¹

Figura 33. Información general del acero inoxidable 316L [36]

Las propiedades mecánicas del material escogido para productos realizados por fabricación aditiva con polvo metálico son las siguientes.

	As Built
Upper tensile strength (UTS) (See note 2)	
Horizontal direction (XY)	676 MPa ±2 MPa
Vertical direction (Z)	624 MPa ±17 MPa
Yield strength (see note 2)	
Horizontal direction (XY)	547 MPa ±3 MPa
Vertical direction (Z)	494 MPa ±14 MPa
Elongation at break (see note 2)	
Horizontal direction (XY)	43% ±2%
Vertical direction (Z)	35% ±8%
Modulus of elasticity (see note 2)	
Horizontal direction (XY)	197 GPa ±4 GPa
Vertical direction (Z)	190 GPa ±10 GPa
Hardness (Vickers) (see note 3)	
Horizontal direction (XY)	198 HV0.5 ±8 HV0.5
Vertical direction (Z)	208 HV0.5 ±6 HV0.5
Surface roughness (R_a) (see note 4)	
Horizontal direction (XY)	4 μm to 6 μm
Vertical direction (Z)	4 μm to 6 μm

Figura 34. Propiedades mecánicas para fabricación aditiva del acero inoxidable 316L [36]

4.5. APLICACIÓN DE LA PIEZA

Como se ha mencionado anteriormente, la pieza forma parte de un brazo robótico. Esta pieza se colocaría de forma duplicada en una de las articulaciones del brazo y se conectaría al resto mediante las 4 zonas de unión. En la Figura 35 se encuentra destacada una posible localización de esta pieza en un brazo de un robot.

Por las propiedades del material escogido, la pieza es apta para aplicaciones dentro de un ambiente corrosivo o que requieran soportar bastante fuerza. Se ha seleccionado el tamaño del brazo indicado con anterioridad de cara a la posibilidad de usar el robot para mover piezas o cajas medianamente pesadas.



Figura 35. Brazo robótico de ejemplo [37]

CAPÍTULO 5. DESARROLLO DEL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

5.1. SOFTWARE

Para realizar el Análisis del Ciclo de Vida de las piezas indicadas se ha utilizado el software GaBi, ya que es uno de los más utilizados a nivel profesional por las empresas y, en concreto, es el que se usa en Cidaut.

Esta herramienta incluye todas las fases del análisis, desde la definición de los procesos y organización de los datos, hasta la presentación de los resultados obtenidos [38]. Permite introducir las entradas y salidas de cada proceso, seguir los flujos y evaluar diferentes categorías de impacto ambiental. Además, es un programa que puede tratar datos económicos y de impacto social, como añadido a los datos ambientales [38].

Los elementos necesarios para hacer un proyecto con GaBi son los flujos, los planos y los procesos. Los procesos se modelan con los datos de las entradas y salidas, los flujos conectan los procesos entre ellos y con entradas y salidas que provienen o acaban directamente en el medio y los planos se conforman mediante estos elementos.

En GaBi se pueden incluir varias bases de datos para adaptarse a lo que necesita cada proyecto que se realiza; sin embargo, en este caso solo se cuenta con la base de datos educativa. Con la base de datos adecuada, los procesos y flujos incluirían los recursos necesarios para analizar el impacto ambiental de esa determinada actividad, siendo solo necesario editar las cantidades de materia que se utilizan específicamente en cada ACV. En cambio, si los procesos no están incluidos en las bases de datos, es necesario modelarlos con información obtenida de otras fuentes.

En la Figura 36 se puede observar la definición de un proceso de este software, con sus correspondientes entradas y salidas; en la Figura 37 la definición de un flujo, formado por las cantidades correspondientes de los componentes que se definen para el valor de 1kg de ese flujo; y en la Figura 38 un plano formado por sus correspondientes procesos y flujos que forma el sistema de producto.

Nombre	ES	Fresado	Fuente	u-so - Unidad de proceso, operac			
Parámetros							
Parámetros	Fórmula	Valor	Mínimo	Máximo	Desviaci	Coment	
Parámetros							
ACV LCC: 0 EUR ACTT Documentación							
Integridad Ningún dato							
Entradas							
Flujo	Magnitud	Cantidad	Unidad	M	Desviaci	Origen	Comentario
Electricity [Electric power]	Energy (net ca	16	MJ	X	0 %	(Ningún dato)	
Pieza sin acabado (acero inoxidable)	Mass	2,4	kg	X	0 %	(Ningún dato)	
Taladrina [Materials]	Mass	10,9	kg	X	0 %	(Ningún dato)	
Útil de sujeción [Materials]	Mass	10,5	kg	X	0 %	(Ningún dato)	
Flujo							
Salidas							
Flujo	Magnitud	Cantidad	Unidad	M	Desviaci	Origen	Comentario
Pieza (acero inoxidable 316L) [M	Mass	1,74	kg	X	0 %	(Ningún dato)	
Taladrina [Materials]	Mass	10,4	kg	X	0 %	(Ningún dato)	
Útil de sujeción [Materials]	Mass	10,5	kg	X	0 %	(Ningún dato)	
Sobranate acabado superficial [Waste	Mass	0,653	kg	*	0 %	(Ningún dato)	
Taladrina evaporada [Emissions to air	Mass	0,546	kg		0 %	(Ningún dato)	
Flujo							

Figura 36. Ejemplo de la definición de un proceso en GaBi (Elaboración propia)

Magnitud	1 kg = *	Unidad	1 [Magnitud]	Comentario
Carbon	0,652	kg	0 %	1,53
Chromium (E)	0,17	kg	0 %	5,88
EDIP 1997, Phosphorus	0,00045	kg	0 %	2,22E003
EDIP 1997, Sulphur	0,00025	kg	0 %	4E003
Manganese in alloy (E)	0,02	kg	0 %	50
Molybdenum (E)	0,025	kg	0 %	40
Nickel (E)	0,12	kg	0 %	8,33
Nitrogen	0,001	kg	0 %	1E003
Number of pieces	0,573	pcs.	0 %	1,74
Oxigen	0,001	kg	0 %	1E003
Silicon (E)	0,01	kg	0 %	100
Carbon (E)	0,0003	kg	0 %	3,33E003

Figura 37. Ejemplo de la definición de un flujo en GaBi (Elaboración propia)

SPOILER - Tutorial Model - DONE

Diagrama proceso GaBi. Mass (kg)
Se muestran los nombres de los procesos básicos.

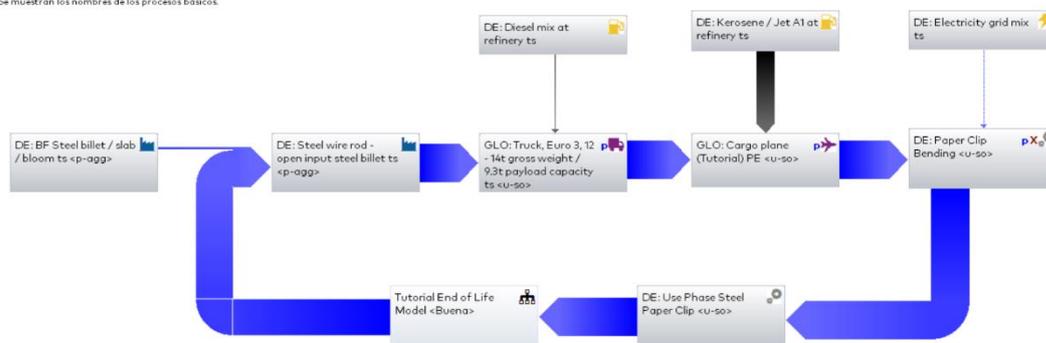


Figura 38. Ejemplo de un plano de GaBi (Elaboración propia)

Tras modelar todo el inventario en el programa, se ejecuta el cálculo del balance para la metodología escogida y se obtienen los resultados del impacto ambiental general o de cada proceso.

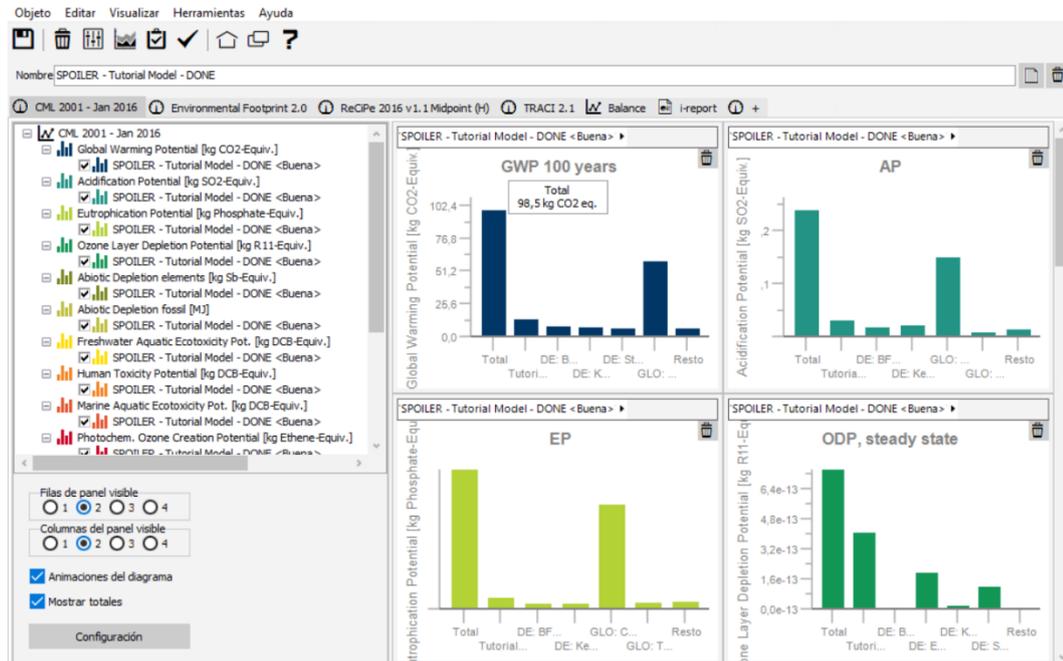


Figura 39. Balance de ejemplo de GaBi (Elaboración propia)

A causa de que los valores obtenidos pueden ser complicados de interpretar por un público no experto en el tema, realizar un estudio de esta clase es también útil para comparar entre diferentes ACV y obtener conclusiones a modo comparativo y no con datos numéricos.

5.2. DESARROLLO DEL ACV DE FABRICACIÓN ADITIVA

Para desarrollar el Análisis del Ciclo de Vida de la pieza realizada por fabricación aditiva se siguen los pasos expuestos en el Capítulo 3.

5.2.1. Objetivo y alcance

Al realizar un nuevo proyecto en GaBi es necesario escribir el objetivo, la función, la unidad funcional, los límites del sistema, los requisitos de calidad de los datos, las comparaciones del sistema y las consideraciones de la prueba. Estos apartados hay que redactarlos antes de continuar; sin embargo, se pueden editar posteriormente.

El objetivo del análisis es comparar el impacto sobre la salud, el medio ambiente y los recursos de todo el ciclo de vida de una misma pieza realizada por fabricación aditiva y por fabricación sustractiva y así establecer conclusiones en base a los resultados que se obtienen.

La unidad funcional a estudiar es la pieza del brazo robótico mostrada en el Capítulo 4.

Los límites del sistema según las etapas del ciclo de vida que abarca el ACV son “cradle to cradle” (de la cuna a la cuna), que involucra los procesos desde la extracción del material hasta el fin del ciclo de vida del producto, incluyendo el reciclado y la reutilización para crear nuevos productos o el mismo. El nivel de detalle de estos procesos será el máximo dentro de lo posible, teniendo en cuenta la limitación de datos con la que se encuentra el proyecto al no disponer de la base de datos Ecoinvent 3, utilizada en la mayoría de estos casos, u otra útil para este análisis. La calidad de las entradas y salidas está definida por la base de datos de la versión educativa de GaBi y por las fuentes de datos encontradas.

En el apartado de comparaciones entre sistemas se indica que este ACV se desarrollará para obtener las diferencias de los impactos ambientales que se ocasionan en todo el ciclo de vida y en cada uno de los procesos semejantes relevantes en relación con el Análisis del Ciclo de Vida de la pieza realizada por fabricación sustractiva.

Por otro lado, el público de este análisis será cualquier individuo u organización interesada en conocer a modo comparativo el impacto medioambiental de una serie de procesos que realizan una pieza por fabricación aditiva y por sustractiva, siendo la razón de su realización informar sobre estos aspectos. En especial, es interesante para empresas involucradas en el desarrollo de procesos de fabricación o que se dediquen a realizar piezas y pueda servirles como factor determinante para escoger un proceso u otro.

El lugar en el que se van a realizar los procesos principales del ACV para concretar las distancias que se van a recorrer en el transporte es el Parque Tecnológico de Boecillo, en Valladolid, España. Sin embargo, muchos de los datos que se van a definir en las entradas y salidas se han obtenido de forma general, sin proceder de un lugar concreto, por las limitaciones en la base de datos y la bibliografía.

La metodología a utilizar en este caso será la ReCiPe 2016, mediante la que se analizarán las categorías de impacto más relevantes.

En este ACV el informe se incluirá en el presente Trabajo de Fin de Grado mediante los apartados indicados en el índice, sin formar parte de un documento externo.

5.2.2. Análisis del inventario

Como se ha mencionado anteriormente, esta etapa es la que requiere mayor tiempo para su realización y, a su vez, es la más complicada. Para realizar el inventario con los correspondientes procesos y flujos se ha obtenido la información de diversas fuentes disponibles, con el objetivo de conseguir los datos más similares a la realidad dentro de los límites de las bases de datos e información con la que se cuenta.

En primer lugar, para poder introducir los flujos de entrada y salida necesarios para los procesos hay que crearlos. Algunos de los flujos creados para estos proyectos son el tocho de acero inoxidable 316L, el polvo producido, el polvo sobrante o la pieza resultante de cada una de las etapas de posprocesado por las que pasa. En cada uno de estos procesos se introducen los componentes de los que está formado en su correspondiente porcentaje y la relación entre los kilogramos y la cantidad de unidades del flujo si es necesario.

El plano realizado para la fabricación aditiva se ha organizado en planos más pequeños de cara al balance de la evaluación de impactos y la siguiente comparación con el plano de la fabricación sustractiva. Tanto este plano como el de fabricación sustractiva se han dividido en producción de las materias primas necesarias, procesado, posprocesado, uso, reutilización y reciclaje de algún producto intermedio, fin del ciclo de vida, y transportes (algunos de los cuales se encuentran incluidos en sus correspondientes planos). El resultado de este sistema de producto se puede observar en la Figura 40.

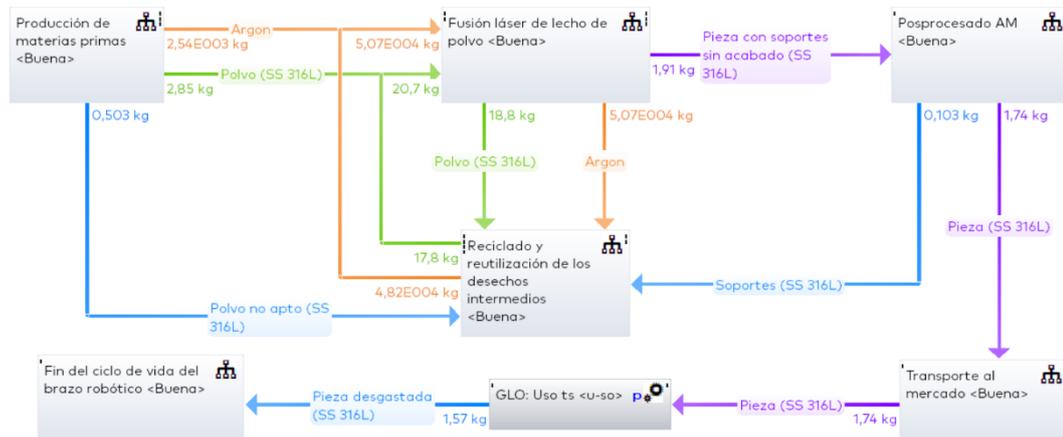


Figura 40. Plano general de la FA (Elaboración propia)

A continuación, se explica por planos cómo se ha realizado en el programa GaBi cada uno de los procesos que involucra el ACV. Cabe destacar que los valores calculados que han sido introducidos como entradas y salidas de los procesos del análisis se encuentran expuestos en el Anexo .

Producción de materia prima

El plano de producción de materia prima está formado por los siguientes procesos y planos.

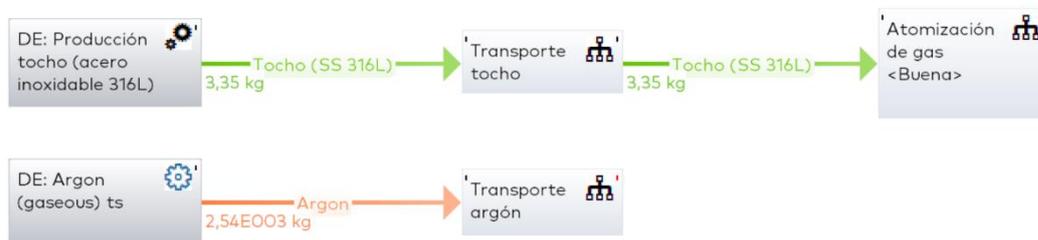


Figura 41. Plano de la producción de materia prima de la FA (Elaboración propia)

Para la creación de tocho de acero inoxidable 316L que se utiliza como material inicial, se ha partido del proceso “BF Steel billet / Slab / Bloom” de GaBi y se ha modificado el correspondiente flujo de salida del tocho. En el proceso del software, BF significa “Blast Furnace” (alto horno), lo cual es el método para producir piezas de acero mediante materias primas vírgenes, obteniendo hierro fundido y posteriormente el acero deseado. Los términos “Slab” y “Bloom” determinan el bloque de acero plano y con sección rectangular, que se realiza solidificando el material líquido en moldes de colada continua. Las entradas de este proceso son los recursos necesarios para la producción que vienen indicados y las salidas son el tocho del material de masa determinada y las correspondientes emisiones ocasionadas.

El siguiente plano a este proceso es el transporte del tocho desde la empresa donde se produce (en este caso es Suministros Industriales Azan S.A.) hasta el Parque Tecnológico de Boecillo. Todos los planos de transporte tienen el esquema de la Figura 42, en donde se encuentra el proceso de su correspondiente medio de transporte (en estos casos se usa el camión más pequeño que se encuentra en la base de datos) y el proceso de la entrada de combustible que incluye sus correspondientes entradas y salidas. Además, en este proceso entra el tocho que sale del anterior en forma de carga para el camión y sale ese mismo tocho y las emisiones que produce el proceso. El cálculo de las emisiones y del combustible necesario lo realiza GaBi mediante la introducción de la cantidad de carga y los kilómetros que realiza, al ser un proceso que se encuentra en su base de datos. Esto lo calcula suponiendo que el camión está lleno y dividiendo la cantidad de recursos y de impactos entre lo que se usa en cada caso particular.

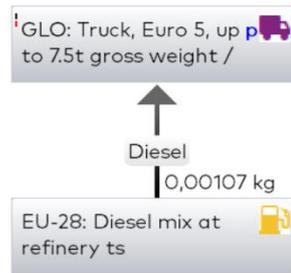


Figura 42. Esquema de los planos de transporte (Elaboración propia)

Continuando con los componentes del plano, el proceso de atomización de gas para fabricar el polvo de acero ha sido creado para este ACV. Las entradas de este proceso son el material que se va a convertir en polvo, es decir, la salida del tocho del proceso anterior; gas argón; agua para el enfriamiento; y energía para poder realizar el proceso. Todos estos procesos de producción de argón, electricidad y agua proceden de la base de datos de GaBi. Por otro lado, las salidas son el polvo que se va a utilizar en el LPBF y el polvo obtenido que no es apto para usar en ese proceso y que, por tanto, se reciclará posteriormente.

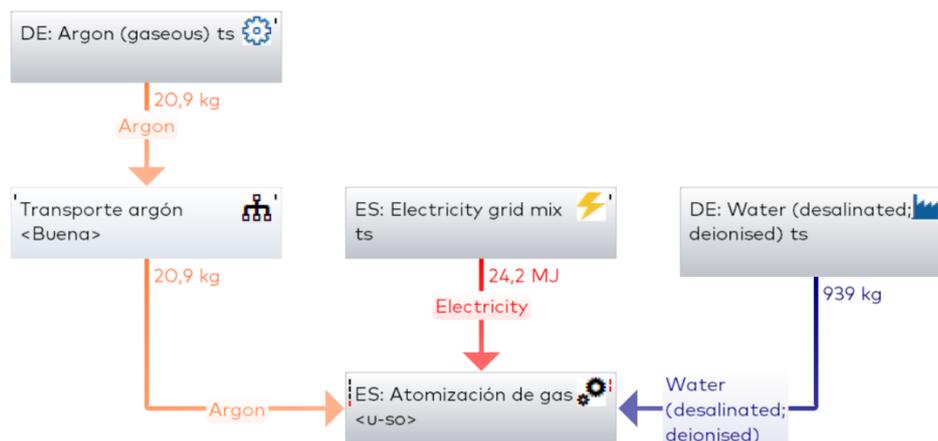


Figura 43. Plano de la atomización de gas (Elaboración propia)

Por último, en el plano de producción de materia prima también se ha incluido la producción y transporte del argón necesario para realizar la fusión láser de lecho de polvo. Este transporte se realiza desde la empresa Air Liquide situada en Valladolid hasta el Parque Tecnológico de Boecillo.

Fusión láser de lecho de polvo

Como se ha mencionado, una de las entradas de este proceso es el polvo que se coloca en el lecho y otra el argón que crea la atmósfera inerte, ambas procedentes del plano anterior; además, entra la energía necesaria. Las salidas son la pieza sin posprocesado, el polvo sobrante de la cama y el argón que filtra la propia máquina para reutilizarlo y se muestra en el plano de reciclado y reutilización de los desechos intermedios.



Figura 44. Plano de LPBF (Elaboración propia)

Como se puede observar por las imágenes anteriores, los planos que requieren como entrada algún producto como agua, argón, electricidad, diésel, etc. se conectan con los planos de la producción de estos recursos.

Posprocesado

El plano del posprocesado está formado por los procesos de las distintas etapas que este conlleva, indicados en la Figura 45.



Figura 45. Plano del posprocesado de la FA (Elaboración propia)

El primer proceso que se realiza consiste en eliminar los soportes de la pieza impresa. En este caso se ha definido que se realizará de forma manual con herramientas como sierras, alicates de corte, cinceles, etc. Por lo tanto, las entradas y salidas de este proceso únicamente dependen del material que se transforma, es decir, entra la pieza con los soportes y salen los soportes y la pieza por separado.

Para realizar el acabado superficial del brazo robótico se ha definido un proceso de pulido eléctrico, ya que solo se está estudiando una única pieza y otros procesos como el acabado superficial vibratorio mediante abrasivos generarían demasiado impacto y no se ajustarían a la realidad porque en esas máquinas se procesarían varias piezas a la vez. Además, la pieza puede ser un prototipo por lo que bastaría con realizar este acabado. En el pulido se introduce la pieza sin acabado superficial tras eliminarse los soportes y de él sale la pieza acabada y el sobrante de polvo obtenido de este proceso. Además, al ser un proceso eléctrico, requiere una entrada de energía.

Para pintar la pieza se utiliza pintura en aerosol, por lo tanto, en su plano expuesto en la Figura 46 se incluye la creación de esta pintura en la que se han introducido sus componentes [39], lo cual conlleva realizar otros procesos de producción de la resina, la acetona, etc. Para el transporte se ha definido como punto de partida la fábrica de pintura de Montana Colors.



Figura 46. Plano del pintado de la pieza (Elaboración propia)

Por último, cabe mencionar que en el posprocesado no se ha realizado un tratamiento térmico en la pieza, ya que sería necesario estudiar previamente las propiedades mecánicas de esta en comparación con la realizada por fabricación sustractiva para encontrar el tratamiento térmico y los parámetros adecuados para equiparar las propiedades de ambas.

Reciclado y reutilización de los desechos intermedios

En este plano se recogen los procesos que se encargan de reutilizar o reciclar ciertos sobrantes de otros procesos que se han considerado aprovechables.



Figura 47. Plano de reciclado y reutilización de los desechos intermedios de la FA (Elaboración propia)

En primer lugar, se encuentra el proceso de filtrado de argón que realiza la propia máquina de LPBF y se estima que recupera y devuelve a como entrada a la fusión de lecho de polvo un 95% del argón que se introduce al principio.

Luego está el tamizado del polvo sobrante, que se conecta con el flujo de polvo sobrante del proceso de LPBF. A pesar de que se tendría que estudiar en concreto para este material en forma de polvo cuantas reutilizaciones es viable usarlo, se va a reutilizar el polvo sobrante del lecho mediante un tamizado que obtiene en su mayor parte polvo útil que se reintroduce en el LPBF y una pequeña porción de polvo no apto que es el que está conectado con el transporte de los desechos.

Al transporte de los desechos también entran el polvo no apto para LPBF que salió de la atomización y los soportes sobrantes de la pieza, además del diésel necesario. Los materiales que se cargan en el transporte son llevados a la empresa de fabricación del tocho (Suministros Industriales Azan S.A.) que funde la chatarra en un horno de arco eléctrico ("Electric Arc Furnace"), a diferencia del proceso utilizado en la producción de materias primas. El proceso de fundido de chatarra se ha obtenido editando la correspondiente entrada y

salida del proceso “EAF Steel billet / Slab / Bloom” de GaBi. Posteriormente, el material obtenido se reciclará con un origen indefinido, ya que para fijar una función para este habría que realizar un estudio de sus propiedades tras los usos.

Transporte al mercado

Tras el posprocesado de la pieza es necesario transportar esta al lugar donde se va a comercializar, en este caso a la oficina central de FANUC Iberia S. L. U., una empresa de suministros industriales que fabrica robots. En este proceso se introduce la pieza terminada y el diésel oportuno, como en el resto de los transportes.

Uso de la pieza

La fase de uso se ha realizado en base al proceso “Use phase (stainless steel product)” que incluye GaBi. En él se ha introducido la pieza como entrada y la pieza con su correspondiente desgaste en la salida.

Fin del ciclo de vida

El plano del fin del ciclo de vida de la pieza se indica en la Figura 48.

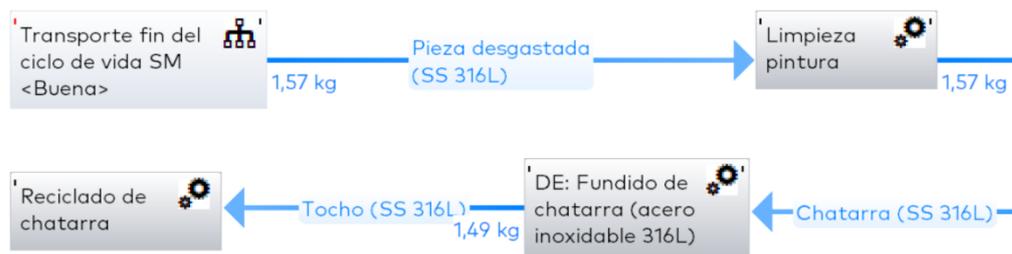


Figura 48. Plano fin del ciclo de vida de la FA (Elaboración propia)

El primer proceso que conlleva es el transporte hasta la empresa que se encarga de fabricar y reciclar el tocho, de nuevo Suministros Industriales Azan S.A. Allí se elimina la pintura del brazo robótico con acetona, por lo que en este proceso entra la pieza y la acetona y sale la pieza limpia. Se ha supuesto que se utilizan 0,005 kg de acetona para este proceso.

Los siguientes procesos son los mismos que se utilizan en el reciclaje de los desechos intermedios y, de igual manera, se establece que la pieza será reciclada tras fundirse. Es posible que la futura aplicación de los materiales que se reciclan durante el ciclo diera lugar de nuevo a parte del material inicial que se utiliza, creando un ciclo cerrado; sin embargo, para que esto ocurriese sería necesario estudiar en profundidad las propiedades de este material reciclado y ver si son válidas para reintroducirlo.

5.2.3. Evaluación del impacto e interpretación

Los “midpoints” que analiza GaBi para la metodología ReCiPe 2016 son el cambio climático, el cambio climático incluyendo el carbono biogénico, la

formación de partículas finas, el agotamiento fósil, el consumo, la ecotoxicidad y la eutrofización del agua dulce, la toxicidad humana que ocasiona cáncer, la que no ocasiona cáncer, la radiación ionizante, el uso del suelo, la ecotoxicidad y la eutrofización marina, el agotamiento del metal, la formación de ozono fotoquímico que daña al ecosistema, la que daña a la salud humana, el agotamiento del ozono estratosférico y la acidificación y ecotoxicidad terrestre. Al ser una gran cantidad de categorías no se van a analizar todas en concreto, ya que en este caso los planos que ocasionan un mayor impacto en una son los que lo ocasionan en el resto.

A continuación, se encuentran las tablas de los impactos ambientales más importantes que incluye GaBi representando los “midpoints” de la metodología ReCiPe 2016. Estas gráficas representan en el eje de las abscisas los diferentes planos o procesos y en el eje de las ordenadas la cantidad de impacto en unas unidades determinadas. Después se realizará un comentario general de todas y se definirán cuáles son los procesos que más impacto generan. Además, parte del análisis de estas gráficas se va a indicar en el Capítulo 6, con la comparación de los resultados de la producción por fabricación aditiva y por sustractiva.

En primer lugar, el cambio climático es una de las categorías más importantes para el análisis de los impactos ambientales. Esto se debe a que produce graves consecuencias a nivel mundial a largo plazo que pueden observarse en diferentes ámbitos como en el derretimiento de los polos y el consecuente aumento del nivel del mar, en graves sequías y en diversas catástrofes ambientales que ocasionan la reducción de las especies [40]. Esta categoría se mide en kilogramos de CO₂ equivalente, que incluye la cantidad de gases de efecto invernadero (metano, óxido nitroso, clorofluorocarbonos, ozono troposférico) con relación a la cantidad de CO₂. Estos gases son de gran importancia, por ejemplo, el CO₂ es necesario para realizar procesos biológicos como la fotosíntesis; sin embargo, su exceso por la sobreproducción es un peligro por su capacidad de atrapar el calor en la atmósfera. [41]

En la gráfica de la Figura 49 se pueden observar los resultados del inventario obtenidos para esta categoría. En esta gráfica se ve que el plano de la producción de materias primas es el que mayores impactos ocasiona y, en segundo lugar, con una gran diferencia, se encuentra el proceso de fusión láser de lecho de polvo.

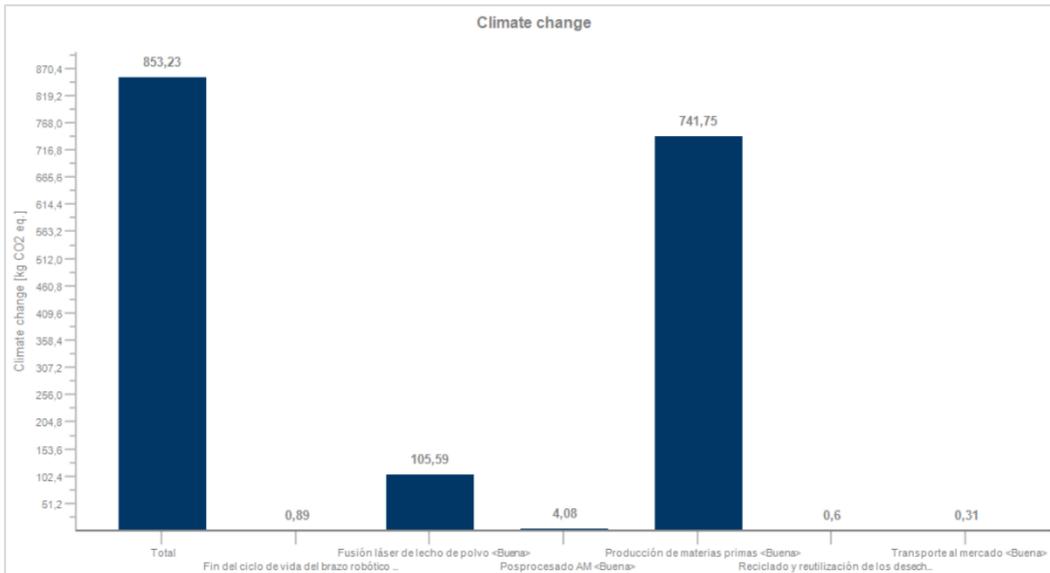


Figura 49. "Midpoint" del cambio climático de la FA (Elaboración propia)

Analizando en concreto los procesos del plano de producción de materia prima, en la Figura 50, se ve como el causante de la mayor parte de estos impactos es la producción del gas argón, necesario para la fabricación en la impresora de LPBF, ya que la larga duración del proceso requiere el uso de una gran cantidad de argón en la máquina seleccionada para realizar esta pieza. El tiempo que conlleva imprimir esta pieza también es la causa de que el plano de la fusión láser sea el segundo que más impactos genera porque requiere estar conectada a una fuente de energía un largo periodo.

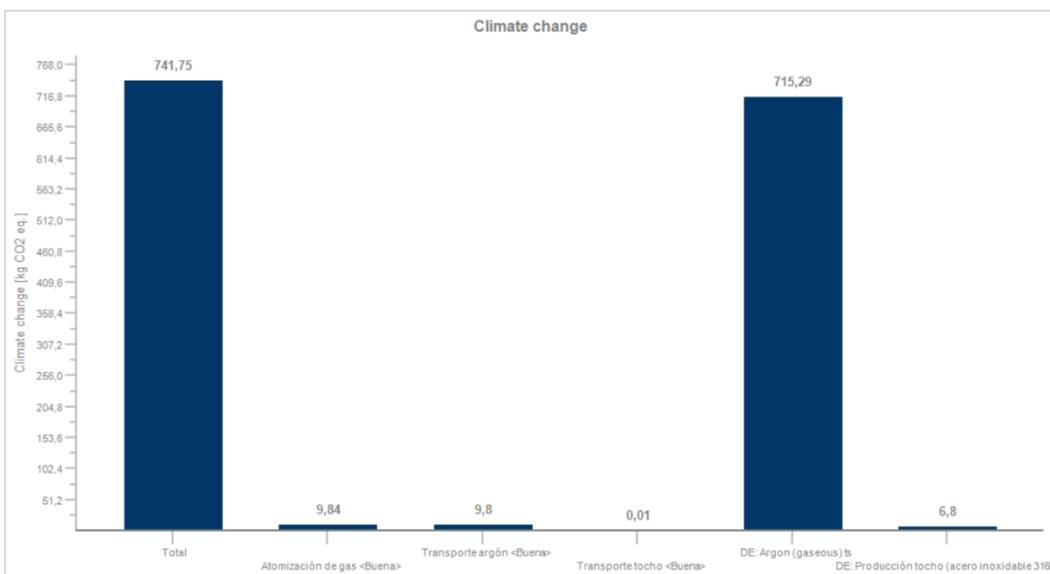


Figura 50. "Midpoint" del cambio climático de la producción de materias primas de la FA (Elaboración propia)

En el posprocesado, lo que más impacto genera, aunque en una considerable menor medida que los procesos nombrados anteriormente, es el pulido

eléctrico por la misma razón que el LPBF, el consumo energético. El fin del ciclo de vida del brazo robótico y los reciclados y reutilizaciones intermedias no tienen valores de impacto destacables en comparación con los del resto de planos. Ocurre lo mismo con el transporte al mercado y el resto de los transportes pertenecientes a los planos, al usarse un camión pequeño y recorrer distancias no excesivamente grandes los impactos son mínimos relativamente.

El segundo “midpoint” a destacar es el agotamiento de recursos fósiles, ya que es otro de los que genera grandes valores de impacto. Es importante controlar el consumo de estos recursos porque son limitados y necesarios para producir energía actualmente. Estos se utilizan para producir combustibles de petróleo, gas natural y carbón que generan la mayor parte de la energía que se consume en el mundo. [42] La unidad que utiliza son los kilogramos de petróleo equivalentes, que compara diferentes tipos de combustibles fósiles de igual manera que lo hacen los kilogramos de CO₂ equivalentes con los distintos gases de efecto invernadero. Los kilogramos de petróleo equivalentes relacionan la cantidad de petróleo crudo que se necesita para producir cierta cantidad de energía con la cantidad de otros combustibles que se necesitarían para producir la misma energía.

Al igual que en el gráfico anterior, en el del agotamiento fósil (Figura 51) destaca la producción de materias primas y, en segundo lugar, muy por debajo, la fusión láser de lecho de polvo. Igualmente, la producción de argón es el proceso que más contribuye a este impacto, ya que es un proceso costoso que requiere mucha energía.

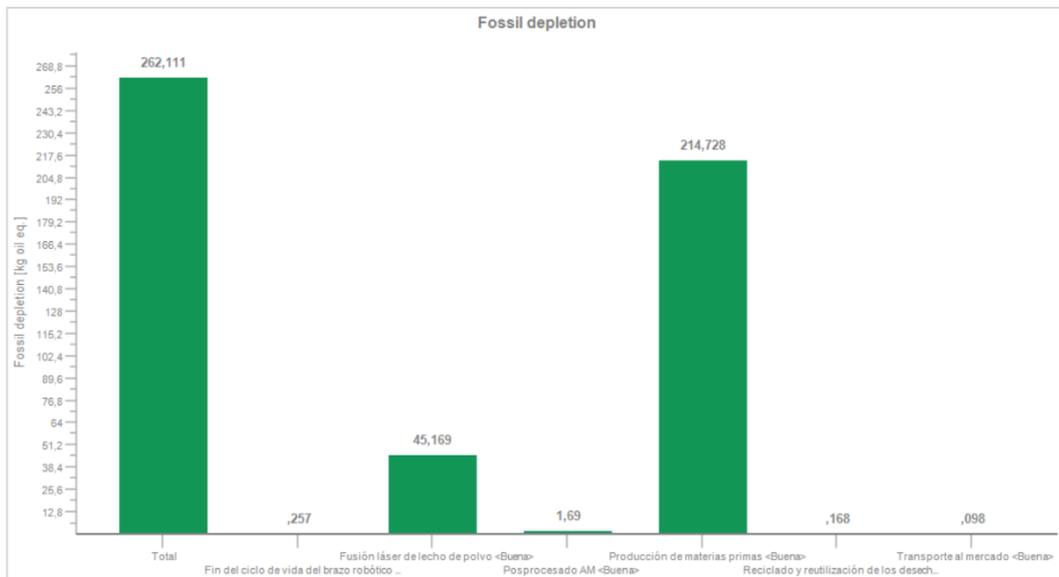


Figura 51. “Midpoint” del agotamiento fósil de la FA (Elaboración propia)

Por otro lado, también se van a analizar los resultados del consumo de agua dulce, ya que es otro de los problemas que se sufren actualmente en la sociedad. En muchos lugares se limita el consumo de agua durante las épocas

del año más secas a causa de la escasez provocada por causas como la disminución de las precipitaciones y el calentamiento global.

En este caso, en la gráfica también destaca la producción de materias primas y luego la fusión láser de lecho de polvo, aunque con una diferencia menos pronunciada que en el resto de categorías.

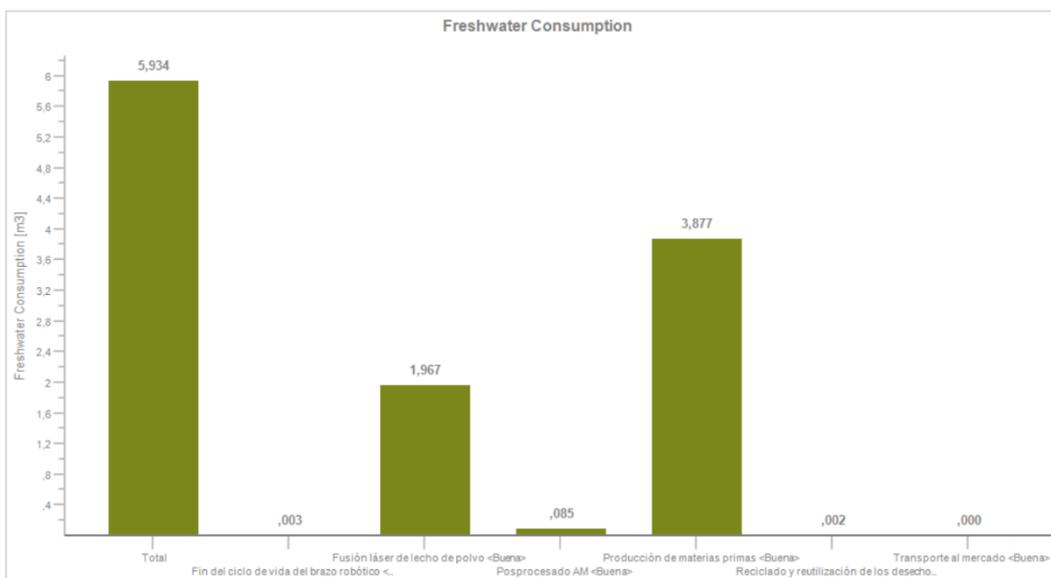


Figura 52. "Midpoint" del consumo de agua dulce de la FA (Elaboración propia)

Siguiendo con el agua, uno de los factores más importantes es su nivel de ecotoxicidad, ya que afecta de forma negativa a los organismos que viven en el medio acuático y, de forma más indirecta, a la salud humana. La gráfica con los resultados de la ecotoxicidad del agua se puede observar en la Figura 53.

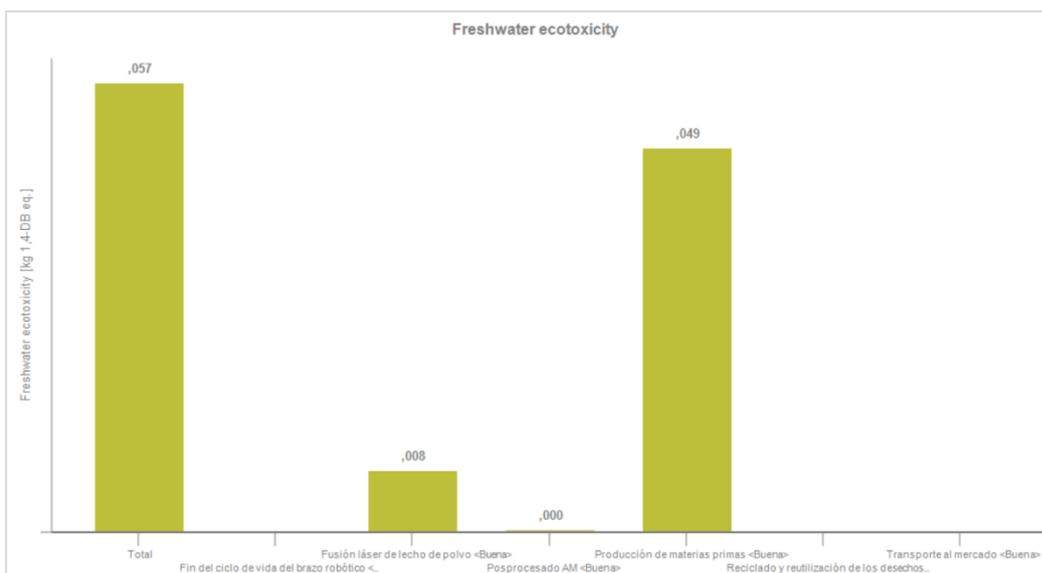


Figura 53. "Midpoint" de la ecotoxicidad del agua de la FA (Elaboración propia)

Otro de los “midpoints” más importantes relacionados con la salud humana es el que indica la potencial toxicidad de sustancias que pueden causar cáncer a los humanos. Evaluar este potencial puede ser útil incluso para comprobar si los valores están dentro de los límites legales regulados por las normativas, ya que estos componentes tóxicos pueden ser un problema para la salud pública. Este punto incluye las emisiones al aire y agua que pueden afectar a los humanos. La unidad de referencia son los kilogramos equivalentes de 1,4 diclorobenceno, que tiene el mismo funcionamiento que el resto de kilogramos equivalentes. [43] Los resultados se pueden observar en la Figura 54. Las etapas que parece que tienen impacto cero, sí que tienen, solo que son cifras muy pequeñas en comparación con el resto.

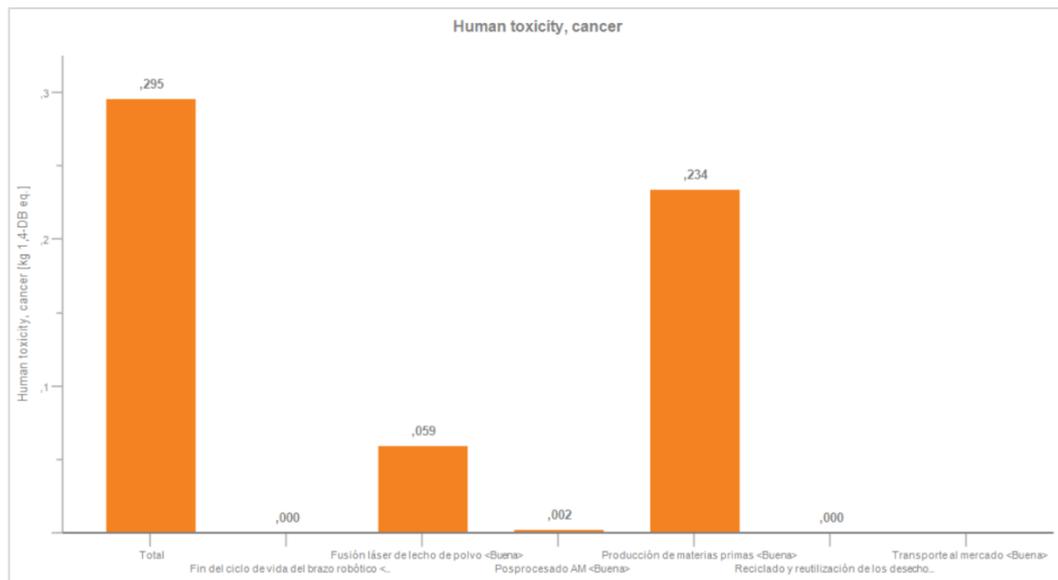


Figura 54. “Midpoint” de la toxicidad humana que causa cáncer de la FA (Elaboración propia)

Por último, se van a comentar los resultados del “midpoint” del agotamiento de metal, ya que es el material que se utiliza para realizar la pieza en ambos casos. Las unidades del eje Y de esta gráfica son los kilogramos equivalentes de cobre, cuyo significado tiene la misma razón que el resto de unidades de kilogramos equivalentes.

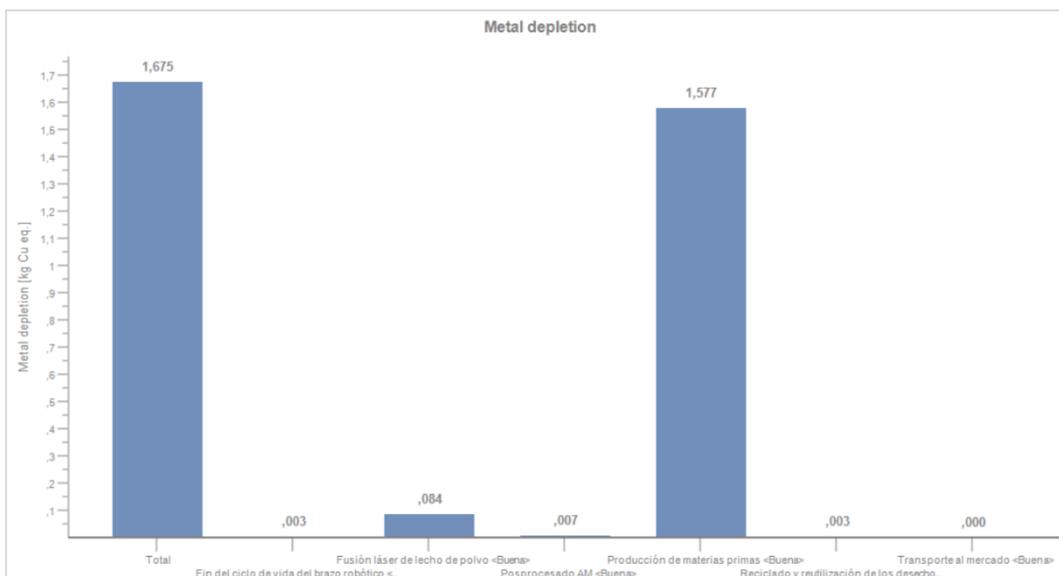


Figura 55. “Midpoint” del agotamiento de metal de la FA (Elaboración propia)

Como en los demás “midpoints”, el plano que más destaca es el de producción de materias primas. Sin embargo, en este caso además del gran consumo por parte del proceso de producción de argón, destaca también el proceso de producción del tocho inicial ya que requiere metales para su fabricación.

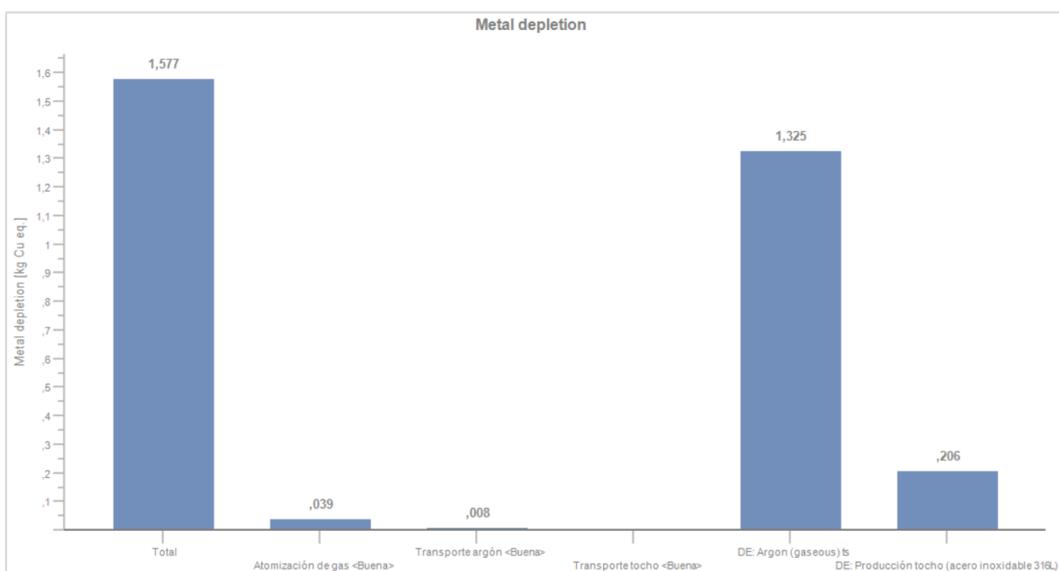


Figura 56. “Midpoint” del agotamiento de metal de la producción de materias primas de la FA (Elaboración propia)

También es interesante comentar los impactos que generan los procesos de reciclado y reutilización de los productos intermedios y el fin del ciclo de vida de la pieza en todos los gráficos, aunque en comparación con el resto de las etapas produzcan valores mínimos. Observando las distintas gráficas para ambos planos, se ve que el proceso que más impacto produce es el fundido de

la chatarra, ya que a pesar de ser un proceso que compensa en cuanto a ahorro de material, sigue necesitando recursos y energía para su producción.

Como conclusión, en las gráficas mostradas y en el resto de las gráficas de los “midpoints” se observa una tendencia similar, de forma proporcional, siendo el proceso de fabricación del argón el que más destaca por sus impactos a causa de la gran cantidad que tiene que fabricar y la complejidad del proceso, seguido del proceso de fabricación LPBF a causa de su duración y el consumo de energía que eso ocasiona.

Para finalizar este apartado, cabe destacar que, si se varían algunos procesos, en concreto los que más impactos generan y cuyos datos no son 100% exactos al no haber sido calculados de manera práctica, el valor de los impactos generados puede cambiar drásticamente. Para calcular detalladamente cómo afectarían las variaciones de todos los datos sería interesante realizar un análisis de sensibilidad. Aquí habría que tener en cuenta que no todos los procesos son de igual importancia, es decir, no es demasiado relevante si los datos del proceso de pintado no son del todo exactos y pueden variar respecto a la realidad, pero sí que afectaría mucho más si ocurre esto con los datos del LPBF o de la producción de argón. Además, en muchos procesos se han supuesto o aproximado valores, ya que no hay demasiados datos útiles sobre ellos. También afectaría en gran medida el cambio de la impresora de la pieza por otra diferente, con otro consumo energético y de argón y otros tiempos de impresión diferentes, ya que este proceso ocasiona bastantes impactos y está relacionado directamente con el proceso más crítico que es el de producción de gas argón.

Parte de la interpretación de estos resultados se encuentra también en el Capítulo 6, en donde se comparan con los obtenidos en el ACV de la pieza realizada por fabricación sustractiva. Además, en ese apartado se incluyen los “endpoints”, no incluidos aquí porque por sí solos, sin compararse con otros, no tienen demasiado valor.

5.3. DESARROLLO DEL ACV DE FABRICACIÓN SUSTRACTIVA

5.3.1. Objetivo y alcance

En este caso el Análisis del Ciclo de Vida se realizará de la misma unidad funcional que el anterior, es decir, el brazo robótico mostrado en el Capítulo 4, pero con un ciclo de vida cuyo proceso de fabricación se centra en un mecanizado.

Tanto el objetivo, como la unidad funcional, los límites del sistema, el público objetivo, la metodología y el contexto son los mismos que en ACV del apartado previo. Sin embargo, en este caso la comparación se realizará, en viceversa, con el ciclo de vida de la pieza realizada por fabricación aditiva.

5.3.2. Análisis del inventario

En este caso el sistema de producto se define por el plano de la siguiente figura.

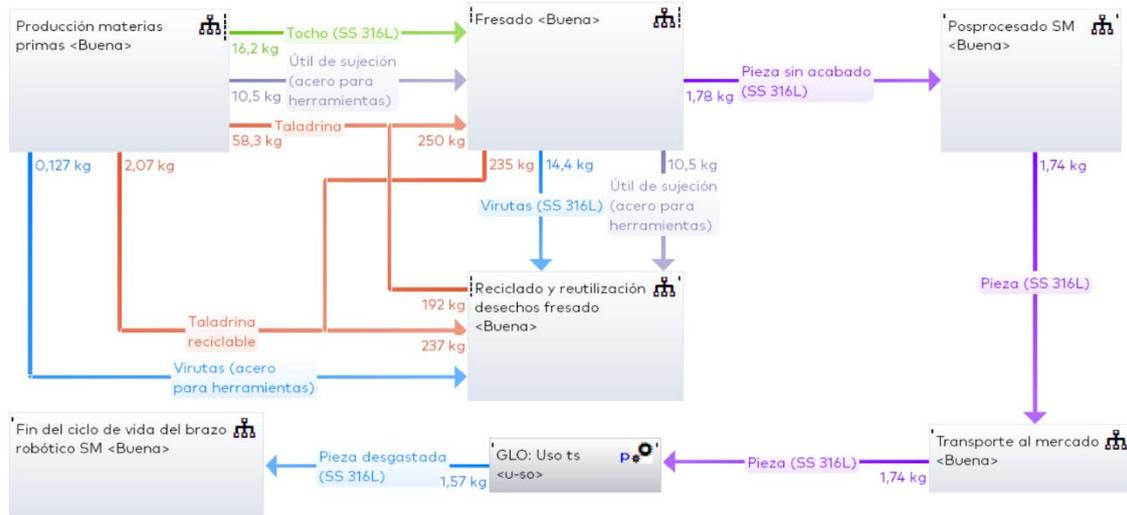


Figura 57. Plano del ciclo de vida de la FS (Elaboración propia)

Este plano tiene la misma organización que el del ACV anterior; sin embargo, utiliza diferentes procesos para la fabricación de la pieza. El transporte al mercado, uso y fin de ciclo de vida son los mismos que para el otro caso, por lo tanto, esos no se van a desarrollar de nuevo.

Producción de materias primas

Para la realización de la pieza por mecanizado se requieren ciertas materias primas concretas.



Figura 58. Plano de producción de materias primas de la FS (Elaboración propia)

Al igual que en el caso anterior, es necesario producir el tocho de materia prima del que se va a partir en el fresado, aunque con unas medidas concretas diferentes, y después transportarlo hasta el lugar donde se va a realizar el fresado. Se ha utilizado el mismo proceso de producción del tocho que en fabricación aditiva.

El fresado también necesita taladrina que es necesario producir y transportar para refrigerar, lubricar, mantener las propiedades del material y de la máquina, prevenir la oxidación y ayudar a la eliminación de la viruta de la zona

de corte durante el procesado. Se ha considerado que la taladrina utilizada es a base de agua y tiene unos porcentajes de 5% aceite y 95% agua. [44] La taladrina que se ha modelado está formada por aceite obtenida de petróleo refinado, ya que GaBi cuenta con un proceso de producción para ello, y agua tratada apta para realizar productos industriales.

Por otro lado, para sujetar la pieza durante el fresado se requiere de un útil que hay que fabricar, detallado en el Anexo 1. Su proceso de fabricación tiene el mismo esquema que el fresado de la pieza principal, ya que se fabrican de forma similar. Se produce el tocho de las dimensiones necesarias para realizar el útil, se transporta al Parque Tecnológico de Boecillo que es donde se realizará y se fresa utilizando la taladrina y energía necesaria y produciendo los desechos que se indican en el apartado que se encuentra a continuación.



Figura 59. Plano de producción del útil de sujeción (Elaboración propia)

Fresado

Este es el proceso principal del plano y, al no encontrarse en la base de datos de GaBi, es necesario examinar sus entradas y salidas con detalle.

En las entradas se incluye el tocho de material, el útil de sujeción, la taladrina y la electricidad. En cambio, sus salidas son la pieza, el útil que se reutilizará, las virutas de desecho, la taladrina que se ha evaporado y el restante de taladrina reciclable.

Posprocesado

Para el primer paso del posprocesado de la pieza se realiza una limpieza con aire a presión para eliminar los residuos del fresado.



Figura 60. Plano de limpieza de la pieza (Elaboración propia)

Después se hacen el pulido eléctrico y el pintado, al igual que en el posprocesado de la pieza realizada por fabricación aditiva. La única diferencia es que el pulido en este caso dura menos tiempo y elimina menos material porque el acabado superficial del fresado es mejor que el del LPBF.



Figura 61. Plano del posprocesado de la FS (Elaboración propia)

Reciclado y reutilización de los desechos del fresado

Tras el fresado hay ciertos productos resultantes a los que es necesario dar un fin. Tal y como se ha indicado en las salidas del proceso, estos son el útil que se ha utilizado, la taladrina y las virutas.



Figura 62. Plano del reciclado y reutilización de los desechos del fresado (Elaboración propia)

Para reciclar la viruta resultante del fresado de la pieza, en primer lugar, hay que recoger todas las virutas y excedentes de acero que se han producido. Seguido se compactan para formar bloques sólidos por medio del briquetado, el proceso más importante para su correcto reciclado. Este proceso necesita un aporte de energía y produce las briquetas separando el metal de la taladrina. Posteriormente, se transporta el acero desde la fábrica de la pieza hasta la fábrica donde se produce los tochos iniciales que se encarga de su correcto reciclado. El reciclado de la viruta sobrante de mecanizar el útil sigue los mismos procedimientos. En ambos procesos de briquetado se produce viruta que no se evapora y que, con la que sobra de los procesos de fresado, se lleva

a un proceso de filtrado que se encargará de limpiarla y producir un porcentaje de esta que será aprovechable. Se ha determinado que esta taladrina reutilizada se reintroduce en el proceso de fresado principal, ya que solo se fabricaría un único útil asique este no necesita más taladrina, pero se podrían fabricar más brazos robóticos.

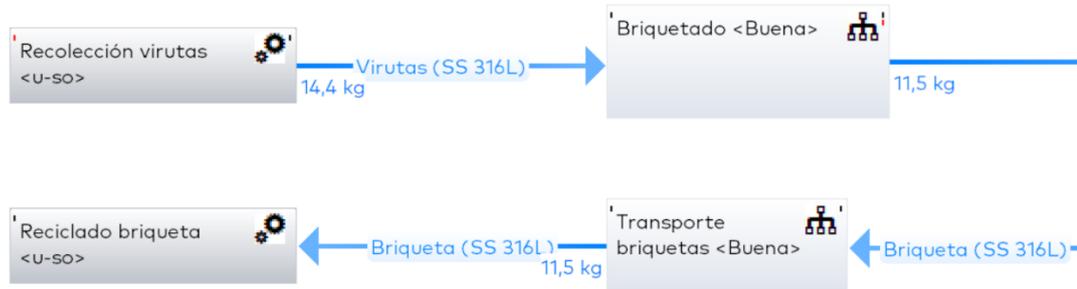


Figura 63. Plano del reciclado de la viruta de la pieza (Elaboración propia)

Por otro lado, el útil se reutiliza tal y como está en los sucesivos procesos de fresado de las piezas.

5.3.3. Evaluación del impacto e interpretación

En este apartado se van a mostrar las gráficas de las mismas categorías que se han incluido en el apartado semejante de la fabricación aditiva.

En primer lugar, la Figura 64 representa los impactos ambientales que ocasionan las diferentes etapas de la fabricación sustractiva para la categoría de cambio climático. En esta gráfica la etapa que más destaca es la producción de materias primas, seguida del proceso de fresado. El resto de planos tienen considerablemente menos impacto.

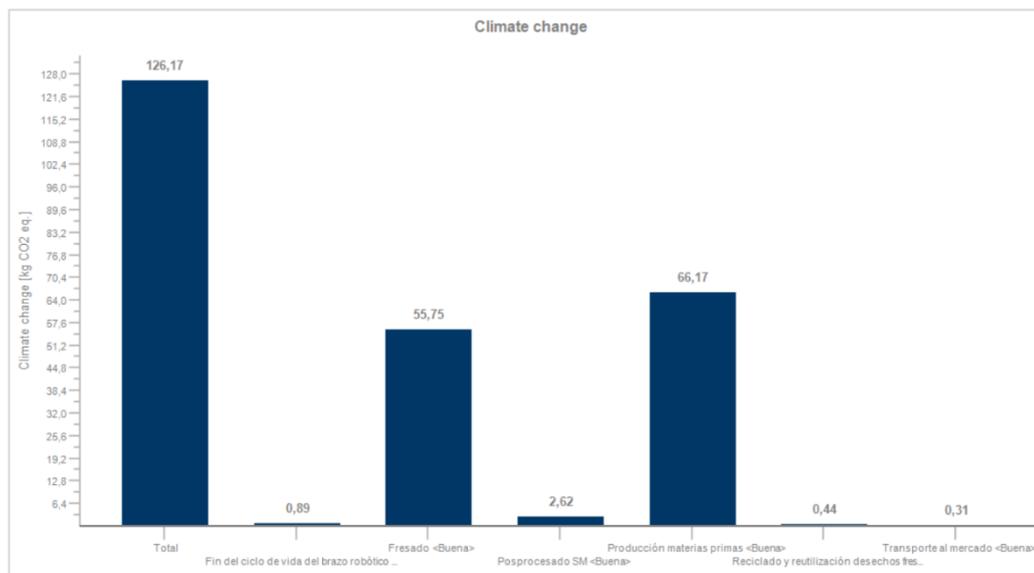


Figura 64. "Midpoint" del cambio climático de la FS (Elaboración propia)

Dentro del plano de producción de materias primas, lo que más impacto genera es la producción del tocho de partida de la pieza que se va a fresar, seguido de la producción del útil de sujeción y con gran diferencia con los procesos de producción de la taladrina. Estos resultados se pueden observar en la Figura 65.

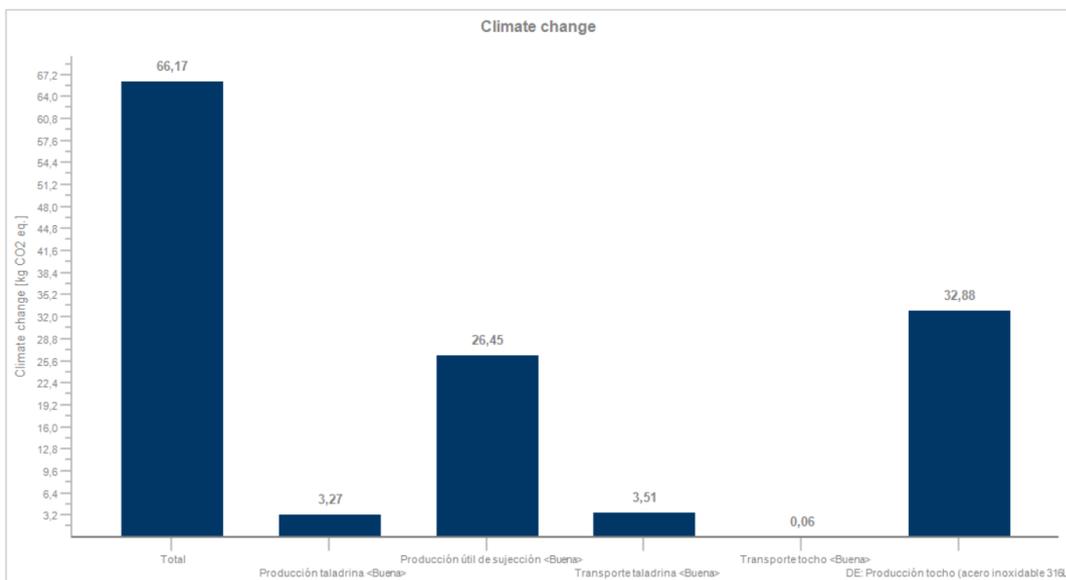


Figura 65. "Midpoint" del cambio climático de la producción de materias primas de la FS
(Elaboración propia)

El siguiente "midpoint" a comentar es el correspondiente al agotamiento fósil, recogido en la Figura 66. En este caso, el proceso que más contribuye al impacto ambiental es el fresado, ya que utiliza una gran cantidad de energía. Por esta misma razón si se indaga en el segundo plano con más impacto, es decir, el de la producción de materias primas (Figura 67), se observa como el plano de la producción del útil de sujeción es el peor para el medio ambiente, ya que también utiliza mucha energía para su fresado, aunque lo sigue muy de cerca el proceso de producción del tocho inicial para la pieza. En este caso, aunque la producción de taladrina obtiene menores valores de impacto, no existe una diferencia tan notoria con el resto.

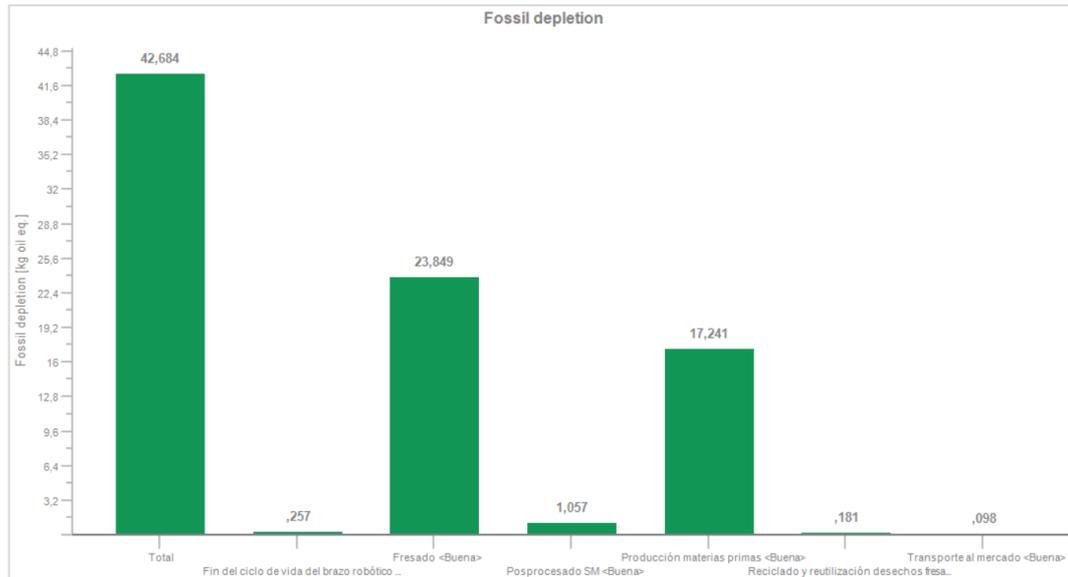


Figura 66. "Midpoint" del agotamiento fósil de la FS (Elaboración propia)

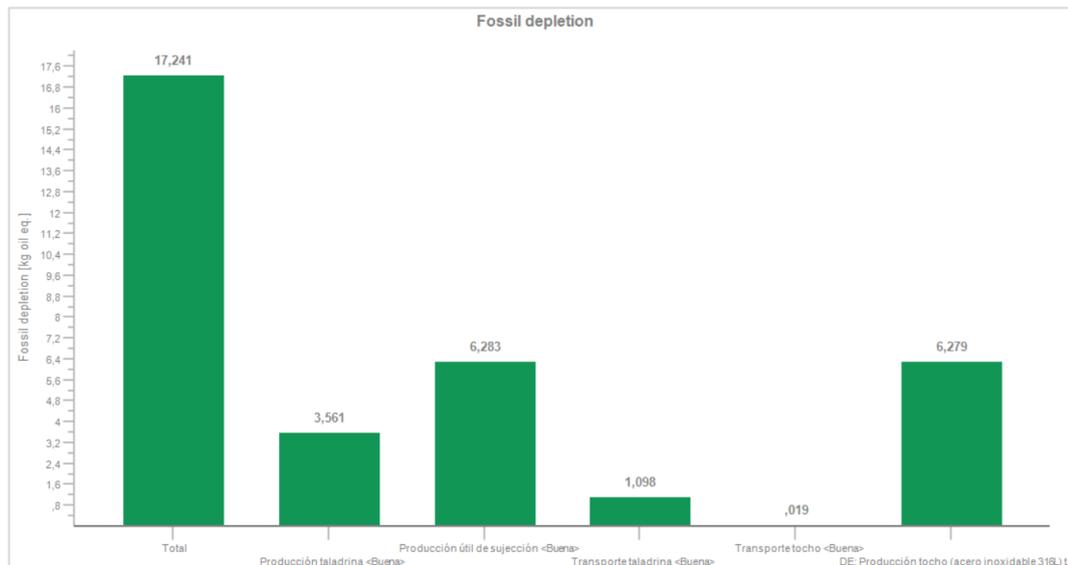


Figura 67. "Midpoint" del agotamiento fósil de la producción de materias primas de la FS (Elaboración propia)

Por otro lado, en el consumo de agua dulce se observa bastante diferencia en proporción entre la cantidad que consume el proceso de fresado y el resto de procesos. Por esa misma razón, en el plano de producción de materias primas también destaca el consumo del proceso de producción del útil, que incluye otro fresado.

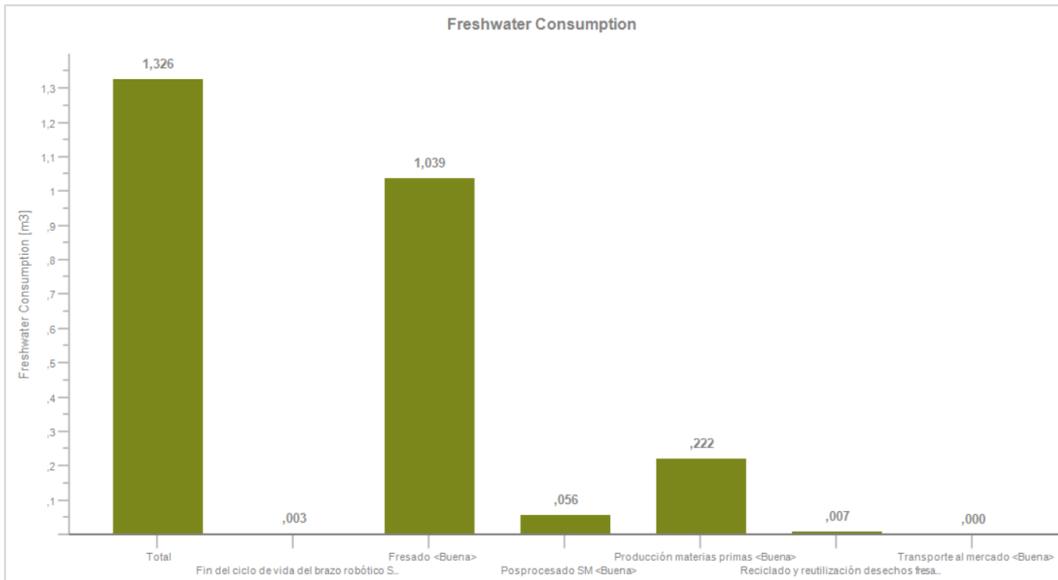


Figura 68. “Midpoint” del consumo de agua dulce de la FS (Elaboración propia)

En el siguiente “midpoint” relacionado con el agua se evalúa su ecotoxicidad. En el gráfico se ve como la producción de materias primas es el plano que más contribuye al total seguido del fresado. Como son valores pequeños, lo que no significa que no sean preocupantes en términos medioambientales, el resto de planos tienen impactos muy cercanos a cero.

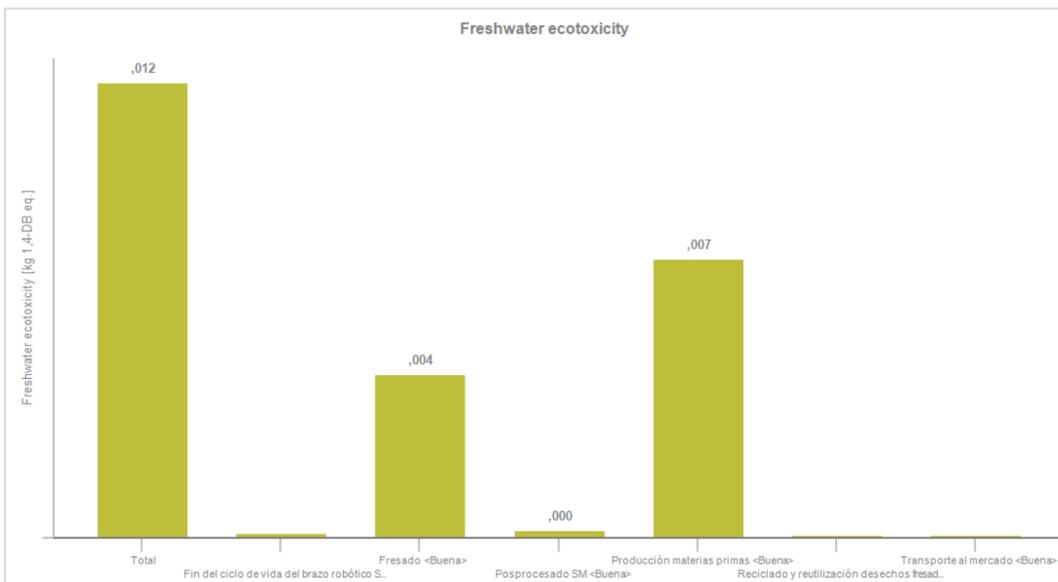


Figura 69. “Midpoint” de la ecotoxicidad del agua de la FS (Elaboración propia)

Dentro de la producción de materias primas, los impactos generados por los diferentes planos que lo constituyen, es decir, la fabricación del útil, de la taladrina y del tocho, son bastante similares.

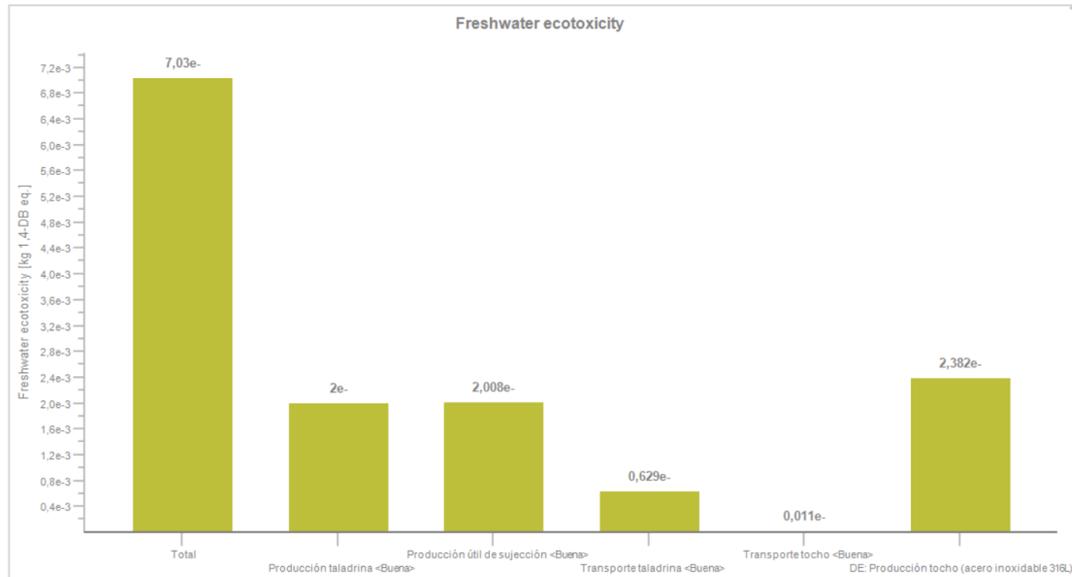


Figura 70. “Midpoint” de la ecotoxicidad del agua de la producción de materias primas de la FS (Elaboración propia)

En la categoría de toxicidad humana que puede generar cáncer, el fresado es el que más impacto ambiental ocasiona, más del doble por encima del de la producción de materias primas.

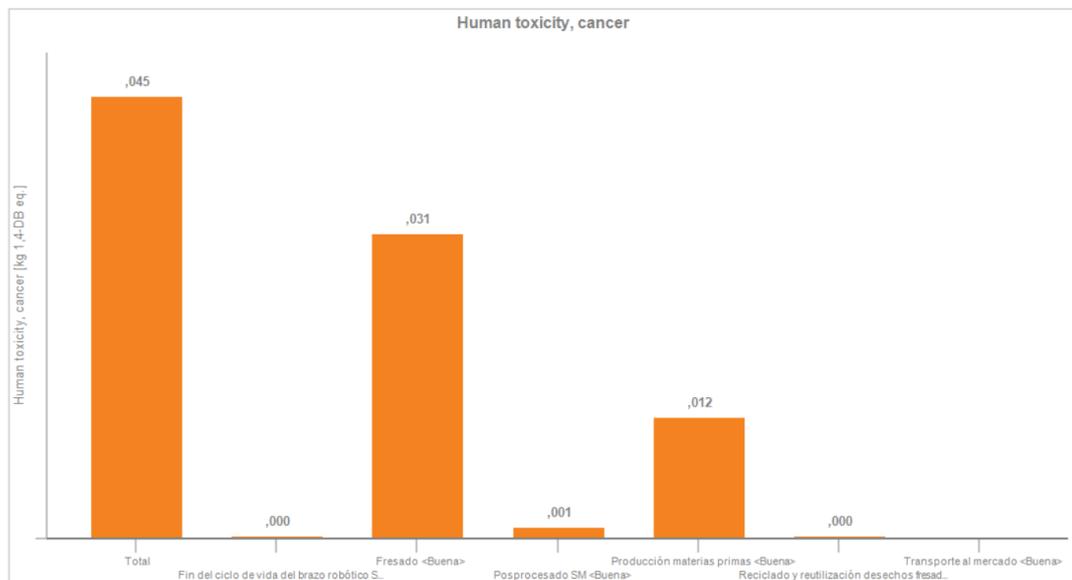


Figura 71. “Midpoint” de la toxicidad humana que causa cáncer de la FS (Elaboración propia)

Por último, en el agotamiento de metal, como es lógico, el plano que más contribuye es el de producción de materias primas, ya que aquí se fabrican tanto el tocho de la pieza como el tocho del útil, ambos formados de metal.

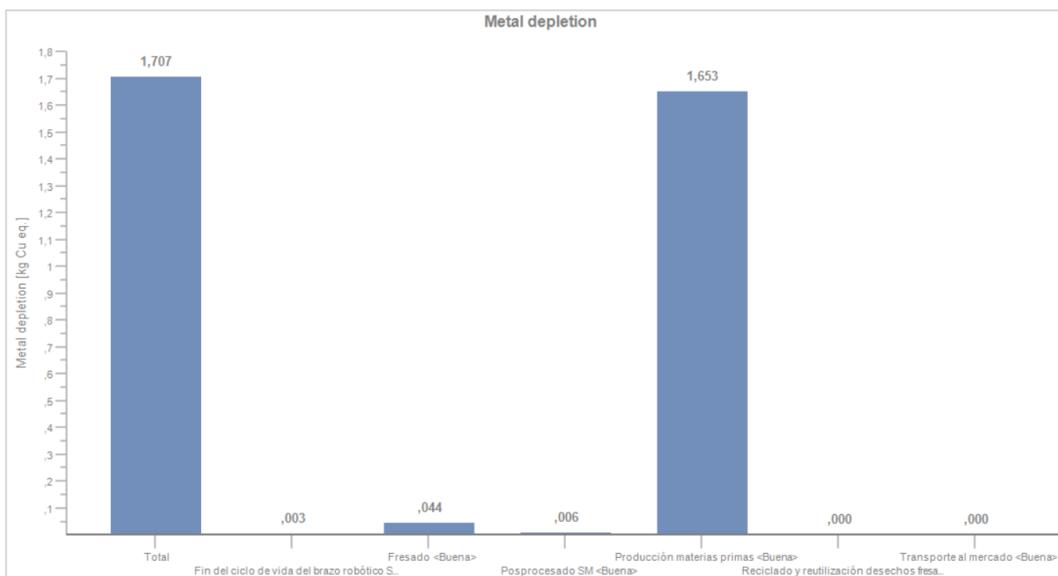


Figura 72. "Midpoint" del agotamiento de metal de la FS (Elaboración propia)

En estas gráficas se ve cómo el fresado y la producción de materias primas son las etapas que más impacto ocasionan en general, variando cuál es el peor en función de la categoría. En el resto de "midpoints" de la fabricación sustractiva hay la misma tendencia que en los anteriores, siendo la producción de materias primas y el proceso de fresado los que más contaminan.

El resto de conclusiones se indican en el siguiente apartado a modo de comparación con el ACV anterior.

CAPÍTULO 6. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

Para comprender la gravedad de los impactos de ambas formas de producción es necesario compararlas, ya que los valores por sí solos no tienen un gran significado para una persona que no es experta sobre el tema. En este apartado se va a realizar una comparación de los gráficos de impactos indicados en el capítulo anterior.

Para observar con más claridad la diferencia entre los “midpoints” de una forma de producción y los de la otra, se ha realizado la siguiente gráfica que muestra los valores totales del ciclo de vida en cada una de las categorías de impacto analizadas en GaBi. Como cada una utiliza sus propias unidades, se han incluido los valores en porcentajes relativos entre la fabricación aditiva y la sustractiva.

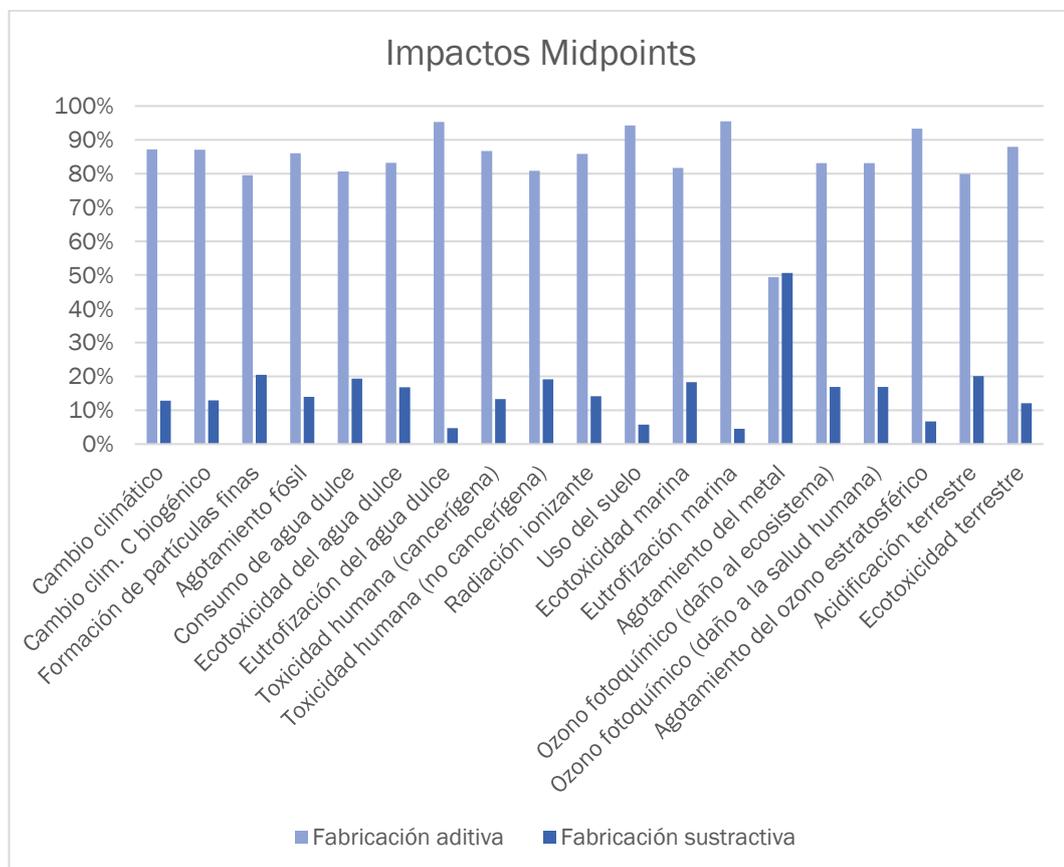


Figura 73. Comparación de los "endpoints" totales (Elaboración propia)

En esta gráfica se observa como la fabricación aditiva produce muchos más impactos ambientales que la fabricación sustractiva, siendo el agotamiento del metal el único de los 19 “midpoints” en el que se producen más impactos en los procesos de fabricación sustractiva. Además, las diferencias son abismales, ya que como se ha visto en las gráficas del apartado anterior, la orden de magnitud de los valores correspondientes a la fabricación aditiva es mucho mayor.

En el método ReCiPe 2016 es común realizar los “endpoints”; sin embargo, la utilidad de estos está casi centrada en la comparación entre diferentes ACV. Por ello, de igual modo que en la gráfica anterior, se ha realizado una gráfica comparativa de la fabricación aditiva y sustractiva para los valores totales de cada uno de los “endpoints”.

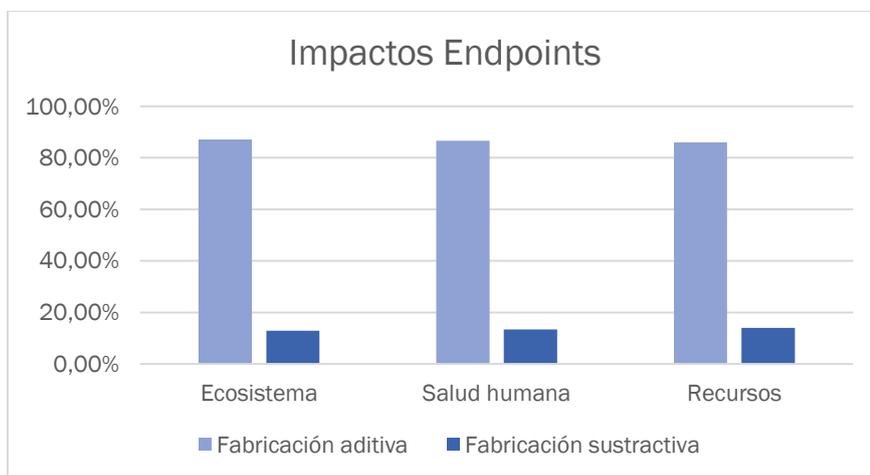


Figura 74. Comparación de los “endpoints” totales (Elaboración propia)

De nuevo, se observa como la fabricación aditiva es mucho más perjudicial que la fabricación sustractiva, tanto para el ecosistema, como para la salud humana y los recursos. La relación entre los impactos “endpoints” de ambos métodos de fabricación se encuentra entorno al 85% para la fabricación aditiva y al 15% para la fabricación sustractiva. Esto significa que la fabricación aditiva ocasiona más de 5 veces más de impactos que la sustractiva.

También es importante comentar las diferencias que existen concretamente en cada etapa del ciclo de vida. En las gráficas del Capítulo 5 se observa que los impactos en todas las etapas son mayores en la fabricación aditiva, por lo que esta tendencia se ve en las gráficas de los “midpoints” y los “endpoints” realizadas con los totales. El único punto en el que puede parecer beneficiosa la fabricación aditiva es en la producción de los tochos de metal, ya que el proceso de fresado requiere más material al necesitar también fabricar un útil de sujeción. Sin embargo, el plano de producción de materias primas tiene peores resultados para la fabricación aditiva a causa del proceso de producción de argón.

En conclusión, la fabricación aditiva es más perjudicial para el medioambiente en todas las etapas del ciclo de vida de la pieza del brazo robótico, lo que resulta coherente, ya que su producción por este método necesita más tiempo de procesado y posprocesado y más cantidad de materias primas.

CAPÍTULO 7. PRESUPUESTO

En el presente capítulo se realiza un análisis orientativo de los costes económicos que conlleva realizar este trabajo de fin de grado. Para su desarrollo se siguen los apartados que se detallan a continuación.

7.1. COSTES DIRECTOS

Incluyen los costes que están relacionados de forma directa con el proyecto final. Pueden dividirse en costes de material, de mano de obra y de amortización.

7.1.1. Costes de material

En este apartado se determinan los costes de material, que son los costes de software, de hardware y demás material necesario.

En primer lugar, se han calculado los costes de materiales tangibles.

Material	Coste (€)
Equipo informático	1.000
Material de escritorio	20
TOTAL	1.020

Tabla 1. Costes de materiales tangibles

Para la cuantificación de los costes de software se considera que la persona que realiza el proyecto es ajena a la universidad y, por tanto, carece de las licencias educativas gratuitas de los programas.

Cabe mencionar que los precios de los softwares en los cuales no se ha incluido referencia han sido proporcionados por Cidaut.

Licencias softwares	Coste (€)
Base de datos básica de GaBi (1 año)	9.000
Altair Inspire (1 año)	25.000
Catia V5 (1 año)	11.000 [45]
Autodesk Fusion + Netfabb (1 año)	6.111 [46]
Tebis (1 año)	20.000
Microsoft Office (1 año)	69 [47]
Windows 10 Home	149 [45]
TOTAL	71.329

Tabla 2. Costes de software

Con esto, se determina un coste de material total de **71.329€**.

7.1.2. Costes de mano de obra

Para calcular los costes de mano de obra es necesario conocer cuánto tiempo se ha tardado en realizar el proyecto.

Actividad	Tiempo (h)
Búsqueda de información	150
Definición de objetivos y alcance del ACV	2
Búsqueda de datos para el inventario	270
Modelado CAD de la pieza y el molde	13
Simulaciones	15
Inventario del ciclo de vida	100
Evaluación del impacto e interpretación	50
Comparación de los resultados de los ACV	50
Elaboración de los documentos	150
TOTAL	800

Tabla 3. Tiempo invertido en las actividades

La duración total del desarrollo de las actividades es ochocientas horas. Si se define que se trabajan 8 horas al día durante 5 días a la semana, la duración total del proyecto sería de unas 20 semanas.

Para calcular el coste de mano de obra se ha fijado que el encargado de realizar el proyecto es un ingeniero recién titulado que cobra 28.000€ brutos al año. Si se establece que un año tiene 52 semanas, el coste de mano de obra es el siguiente.

$$\text{Coste M. O. D.} = 28.000\text{€} \times 20 \text{ sem} / 52 \text{ sem} = 10.769,23\text{€}$$

Por lo tanto, el coste total de mano de obra es de **10.769,23€**.

7.1.3. Costes de amortización

Se ha considerado que para este proyecto se pueden amortizar el equipo informático y los softwares utilizados.

Para el cálculo de los costes adjuntos al proyecto se ha definido que los softwares solo se utilizan el tiempo correspondiente a la realización de las partes del proyecto en las que son necesarios. Estos tiempos y los costes que conllevan se indican en la Tabla 4.

Productos amortizables	Coste (€)	Tiempo útil	Tiempo para el proyecto	Coste adjunto al proyecto (€)
Equipo informático	1.000	10 años	20 sem	38,46
Base de datos básica de GaBi	9.000	1 año	200h	865,38
Altair Inspire	25.000	1 año	1h	12,02
Catia V5	11.000	1 año	12h	63,46
Autodesk Fusion + Netfabb	6.111	1 año	5h	14,69
Tebis	20.000	1 año	10h	96,15
Microsoft Office	69	1 año	20 sem	26,54
Windows 10 Home	149	10 años	20 sem	5,73
TOTAL				1.122,43

Tabla 4. Costes de amortización

En total, los costes de amortización son **1.122,43€**.

7.1.4. Costes directos totales

Con todo lo anterior, los costes directos totales son los recogidos en la Tabla 5, en la que se incluyen los costes de mano de obra y los costes materiales, teniendo en cuenta la amortización en los productos correspondientes.

Costes directos	Coste (€)
Costes de material de escritorio	20
Costes de mano de obra	10.769,23
Costes de amortización	1.122,43
TOTAL	11.911,66

Tabla 5. Costes directos

La suma de todos los costes directos asciende a **11.911,66€**.

7.2. COSTES INDIRECTOS

Incluyen los costes que no están relacionados de forma directa con el proyecto, pero que se necesitan para su realización. Se han incorporado en este apartado y recogido en la Tabla 6 los gastos de transporte hasta la empresa en la que se realiza el proyecto, los gastos operativos y los gastos de administración y dirección.

Dentro de los gastos de explotación se encuentran el coste de la electricidad, el teléfono y demás elementos necesarios para la correcta actividad de la empresa durante el proyecto. Por otro lado, los gastos de administración y dirección incluyen costes de trámites y demás costes administrativos.

Costes indirectos	Coste (€)
Transporte	150
Gastos de explotación u operativos	265 [45]
Gastos de administración y dirección	200 [45]
TOTAL	615

Tabla 6. Costes indirectos

El total de costes indirectos es **615€**.

7.3. COSTES TOTALES

La suma de los gastos directos y los indirectos resulta el valor de los costes totales, los cuales son **12.526,66€**, es decir, **DOCE MIL QUINIENTOS VEINTISÉIS EUROS CON SESENTA Y SEIS CÉNTIMOS**.

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES

7.1. CONCLUSIONES DEL ACV

En primer lugar, hay que comentar las conclusiones obtenidas del Análisis del Ciclo de Vida, ya que es el punto más importante de todo el trabajo.

Como se ha comentado en el capítulo de la comparación de los resultados entre el ACV de los procesos para producir la pieza por fabricación aditiva y los procesos para producirla por sustractiva, el primer método de fabricación ha obtenido resultados más desfavorables que el segundo. Hay que tener en cuenta que el estudio se ha realizado para un caso concreto, es decir, para una determinada pieza con unos procesos y parámetros concretos, por lo que, es destacable que el hecho de usar otro proceso de fabricación aditiva diferente o usar otra impresora podría variar drásticamente los resultados. Por ello, para comprender los impactos que tendría cierta pieza durante todo su ciclo de vida sería necesario realizar el análisis pertinente para ella. También hay que tener en cuenta que, si se realizase un lote en lugar de una única pieza, los procesos variarían y se podrían conseguir mejores resultados. Otro factor que afecta en gran medida es el tamaño de la pieza, ya que el consumo de ciertas materias primas como el argón aumenta exponencialmente a medida que aumenta el tiempo de procesado y, una pieza más pequeña permite usar impresoras de menor tamaño que consumen menos.

Es necesario destacar que para conseguir unos resultados más precisos convendría realizar una pieza de ambas formas y medir las entradas y salidas de los procesos, sin utilizar datos de bibliografía, o usar bases de datos para ese caso en concreto cuya fiabilidad sea conocida y elevada.

De los resultados que se han obtenido con este método se obtienen impactos en el ecosistema, en la salud humana y en los recursos; sin embargo, estos tres puntos están fuertemente relacionados, ya que de forma más o menos directa los cambios que se ocasionan en el medio acaban afectando a la salud humana. Por ejemplo, si se daña la capa de ozono del planeta, la radiación ultravioleta puede afectar más perjudicialmente a la piel de las personas, así como dañar cultivos agrícolas que posteriormente, perjudicarían también a la población.

Por esto, es necesario proteger el medioambiente para poder cuidarnos a nosotros mismos y al resto de organismos que nos rodean. Hay que controlar la cantidad de recursos no renovables que se consumen y orientar los procesos a una producción más sostenible, fomentando el uso de fuentes de energía renovables y procesos que emitan menos sustancias perjudiciales. Para ello, se debe concienciar a la población y promover los estudios de las diferentes opciones de fabricación que se utilizan hoy en día para escoger la menos perjudicial y continuar desarrollándola para que sea la más rentable en todos los aspectos. Así se destaca la importancia de realizar un Análisis del Ciclo de

Vida para mostrar los impactos ambientales que se ocasionan y poder tomar decisiones de acuerdo con ello.

7.2. CONCLUSIONES DE LOS PROCESOS Y LÍNEAS FUTURAS

La fabricación aditiva es un método de producción rentable en ciertos aspectos por las posibilidades que ofrece. Con esta forma de fabricación se pueden crear geometrías que no son fabricables por otros métodos, como el fresado, y satisfacer aplicaciones muy diversas. Al poder realizar todas las geometrías posibles, se pueden crear piezas con la misma función que las realizadas por otros métodos, pero optimizadas, lo que ocasiona una reducción del peso de la pieza con la misma función. También se pueden crear piezas compuestas de varios materiales sin necesidad de ensamblajes posteriores. Estas tecnologías no solo sirven para producir piezas finales, sino que se pueden usar para reparar, recubrir o añadir piezas personalizadas a otras ya existentes.

Medioambientalmente destaca por la ventaja del ahorro de material, ya que la fabricación aditiva, en general, por su metodología de ir añadiendo material, solo utiliza la cantidad necesaria, a diferencia de la fabricación sustractiva que se lleva a cabo retirando material. Aunque hay procesos, como la fusión láser de lecho de polvo, que requieren material extra que luego se reutiliza o, en el peor de los casos, se recicla. Sin embargo, como se ha observado antes, a pesar de esta ventaja, no es la mejor opción para el medioambiente por varias razones entre las que se encuentra su mayor consumo de energía que el proceso de sustractiva.

Sin embargo, la FA podría ser beneficiosa para ciertas piezas que se utilicen en vehículos o máquinas que requieran de combustible y que un ahorro de peso en el conjunto ocasione un ahorro de este combustible, o para piezas que sea demasiado complicado o incluso imposible realizar por otros métodos. También podría destacar como opción para hacer prototipos o moldes de una forma sencilla y rápida, ya que no requiere preparar toda una cadena de producción para realizar una única pieza. Además, es útil para realizar piezas muy pequeñas, por la posibilidad de hacerlas por capas muy finas, o para realizar piezas personalizadas, que serían mucho más costosas por otros métodos al necesitar, por ejemplo, cambiar todo el utillaje o moldes para una única pieza. Pero, al igual que es buena para realizar piezas pequeñas, tiene restricciones de tamaño por las dimensiones de cada impresora.

Otro de los grandes problemas de la fabricación aditiva para la industria es su incapacidad actual para producir grandes lotes de piezas, ya que requiere mucho tiempo de procesado y no es posible realizar demasiadas piezas a la vez, aunque esto depende también del tamaño de la pieza y de la impresora. Este es uno de los retos para el sector de la impresión 3D porque mejorar estos tiempos ampliaría radicalmente los campos de aplicación de estos procesos.

En lo referido a la rentabilidad económica, el proceso concreto de LPBF tiene mucho que mejorar. Tanto la impresora, por su tecnología, como la materia prima en polvo, por sus concretas propiedades y su complicada obtención, son costosas.

A pesar del resultado del Análisis del Ciclo de Vida, la fabricación aditiva aporta muchas ventajas ya comentadas. Por ello, es necesario continuar desarrollando estas técnicas de producción para conseguir un resultado óptimo en todos los aspectos, incluyendo el medioambiental. Con ese fin es preciso fijarse, en primer lugar, en los procesos que más influyen a los impactos, en este caso como se ha visto, el proceso de obtención del argón es el que más urge optimizar.

La fabricación aditiva integra un conjunto de procesos que se encuentran actualmente en desarrollo por la importancia que están adquiriendo. Añadiendo que el enfoque sostenible, actualmente, es un punto crucial en la sociedad, se prevé que en unos años se habrán mejorado ciertos aspectos ambientales de la fabricación aditiva, así como que aumente el número de ACV que se realizan para seguir aprendiendo acerca de los impactos ambientales y cómo mejorarlos. Además, las técnicas de FA están progresando en otros ámbitos, como en la investigación de nuevos materiales y formas de procesado.

7.3. CONCLUSIONES GENERALES

En este trabajo de fin de grado se han cumplido los objetivos que se han definido. Con este fin se ha desarrollado el estado de la técnica de la fabricación aditiva estableciendo el foco de atención en el proceso de fusión láser de lecho de polvo, se ha explicado el Análisis del Ciclo de Vida, y se han desarrollado sus etapas para los dos casos concretos que interesaban. Para ello, se ha realizado el modelo de la pieza en los softwares pertinentes para calcular los datos para el ACV y se han buscado el resto de datos necesarios, se ha investigado sobre los diferentes procesos de producción que involucra cada uno de los ciclos y se ha realizado el Inventario del Ciclo de Vida, con su correspondiente Evaluación del Ciclo de Vida y posterior comparación entre el ciclo de fabricación aditiva y el ciclo de fabricación sustractiva. Para finalizar, se ha realizado un presupuesto orientativo del proyecto para identificar los costes que tendría realizarlo en un ámbito profesional.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «El crecimiento de la demanda mundial de energía repuntará en 2024 tras ralentizar,» *La República*, 19 Jul. 2023.
- [2] Enerdata, «Estadísticas del consumo energético mundial,» 2023. [En línea]. Available: <https://datos.enerdata.net/energia-total/datos-consumo-internacional.html>. [Último acceso: 14 Mar. 2024].
- [3] Enerdata, «Consumo energético mundial,» 2023. [En línea]. Available: <https://datos.enerdata.net/electricidad/datos-consumo-electricidad-hogar.html>. [Último acceso: 14 Mar. 2024].
- [4] Enerdata, «Emisiones de CO2 procedentes de la combustión de combustibles,» 2023. [En línea]. Available: <https://datos.enerdata.net/co2/emisiones-CO2-procedentes-quema-combustible.html>. [Último acceso: 14 Mar. 2024].
- [5] Instituto Superior del Medio ambiente, «Unidad Didáctica Introducción a la metodología del ACV y a la normativa de aplicación,» de *Metodología de Análisis de Ciclo de Vida. Herramienta de Software para ACV*.
- [6] P. M. Hernández Castellano, A. Gutierrez Barcenilla, M. D. Martínez Rivero, M. D. Marrero Alemán, R. Paz Hernández, L. Suárez García y F. Ortega García, *Tecnologías de fabricación aditiva*, España: Universidad de las Palmas de Gran Canaria, 2018.
- [7] Mecalux, «Fabricación aditiva: la impresión 3D digitaliza la manufactura,» 2 Oct. 2020. [En línea]. Available: <https://www.mecalux.es/blog/fabricacion-aditiva>. [Último acceso: 2 Mar. 2024].
- [8] A. Lamikiz Mentxaka, A. M. Camacho López, S. Ferrándiz Bou y M. Batista Ponce, *Fabricación Aditiva*, Madrid: Universidad Nacional de Educación a Distancia, 2023.
- [9] *Fabricación aditiva. Principios generales. Fundamentos y vocabulario*, UNE-EN ISO/ASTM 52900, CTN 324 Fabricación aditiva, Madrid, 2022.
- [10] B. Mena Barreto dos Santos, G. Littlefair y S. Singamneni, «From 3D to 4D printing: A review,» *Materials Today: Proceedings*.
- [11] H. D. Sondagar, S. Kumar y V. S. Sharma, «A state-of-the-art review of 4D printing techniques, stimuli activated materials and future perspectives,» *Materials Today: Proceedings*, 2023.

- [12] R. Sajjad, S. T. Chauhdary, M. T. Anwar, A. Zahid, A. A. Khosa, M. Imran y M. H. Sajjad, «A review of 4D printing e Technologies, shape shifting, smart polymerbased materials, and biomedical applications,» *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 7, pp. 20-26, 2023.
- [13] E. Souza, «¿Impresión 4D? Uniendo la fabricación aditiva y los materiales inteligentes,» Archdaily, 25 Nov. 2021. [En línea]. Available: <https://www.archdaily.cl/cl/966602/impresion-4d-uniendo-la-fabricacion-aditiva-y-los-materiales-inteligentes>. [Último acceso: 25 Mar. 2024].
- [14] S. Nida, J. A. Moses y C. Anandharamakrishnan, «Emerging applications of 5D and 6D printing in the food industry,» *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 10, nº 100392.
- [15] *Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 2: Visión general de categorías de procesos y de materias primas*, UNE-EN ISO 17296-2, CTN 116 Sistemas industriales automatizados, Madrid, 2017.
- [16] A. Gutierrez Barcenilla, «Tecnologías - Readi 3D platform,» [En línea]. Available: <https://readi3dplatform.com/tecnologias/>. [Último acceso: 9 May 2024].
- [17] A. K. Kushwaha, M. H. Rahman, E. Slater, R. Patel, C. Evangelista, E. Austin, E. Tompkins, A. McCarrol, D. K. Rajak y P. L. Menezes, «Powder bed fusion - based asdditive manufacturing: SLS, SLM, SHS and DMLS,» *Tribology of Additively Manufactured Materials*, pp. 1-37, 2022.
- [18] Fundación COTEC para la innovación tecnológica, 30 Fabricación aditiva, Madrid, 2021.
- [19] Instituto Roche, «Bioimpresión en la medicina del futuro,» Madrid, 2019.
- [20] V. Tejada-Ortigoza, «Impresión 3D de alimentos, ¿qué es y con qué se come?,» TecScience, 9 Aug. 2022. [En línea]. Available: <https://tecscience.tec.mx/es/divulgacion-ciencia/impresion-3d-de-alimentos-que-es-y-con-que-se-come/>. [Último acceso: 10 May 2024].
- [21] 3Dnatives, «Guía completa: Fusión láser por lecho de polvo (L-PBF), ¡te explicamos todo!,» 9 Sep. 2023. [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-directo-de-metal-por-laser-les-explicamos-todo/>. [Último acceso: 16 Feb. 2024].
- [22] Leizi, «Fusión láser en lecho de polvo: La revolución de la fabricación 3D de piezas metálicas,» KDM FABRICATION, 12 Jan. 2024. [En línea]. Available: <https://es.kdmfab.com/fusion-laser-en-lecho-de-polvo-la>

- revolucion-de-la-fabricacion-3d-de-piezas-metalicas/. [Último acceso: 10 May 2024].
- [23] K. Ishfaq, M. Abdullah y M. A. Mahmood, «A state-of-the-art direct metal laser sintering of Ti6Al4V and AlSi10Mg alloys: Surface roughness, tensile strength, fatigue strength and microstructure,» *Optics and Laser Technology*, vol. 143, nº 107366, 2021.
- [24] TRUMPF, «Polvo metálico para la fabricación aditiva,» [En línea]. Available: https://www.trumpf.com/es_ES/productos/maquinas-y-sistemas/sistema-de-fabricacion-de-aditivos/polvo-y-parametros/. [Último acceso: 29 Apr. 2024].
- [25] K. Kassym y A. Perveen, «Atomization processes of metal powders for 3D printing,» *Materials Today: Proceedings*, vol. 26, pp. 1727-1733, 2020.
- [26] ITALIMPIANTI ORAFI, «Polvo de metal atomizado: la revolución del mercado de metales preciosos,» 20 May 2021. [En línea]. Available: <https://www.italimpianti.it/es/noticias/polvo-de-metal-atomizado-la-revoluci%C3%B3n-del-mercado-de-metales-preciosos>. [Último acceso: 6 May 2024].
- [27] AirLiquide, «De la producción de polvo metálico a su reciclaje en la fabricación aditiva,» [En línea]. Available: <https://es.airliquide.com/soluciones/fabricacion-aditiva/de-la-produccion-de-polvo-metalico-su-reciclaje-en-la-fabricacion-aditiva>. [Último acceso: 6 May 2024].
- [28] Y. Wanga, T. Peng, Y. Zhu, Y. Yang y R. Tang, «A comparative life cycle assessment of a selective-laser-melting-produced hydraulic valve body using design for Property,» *Procedia CIRP*, vol. 90, pp. 220-225.
- [29] S. Sendino, P. Fernández y Í. Blanco, «Caracterización y reutilización del polvo metálico en procesos de fabricación aditiva sobre lecho de polvo,» *Interempresas*, 8 Mar. 2023. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Aeronautica/Articulos/469287-Characterizacion-reutilizacion-polvo-metalico-procesos-fabricacion-aditiva-lecho-polvo.html>. [Último acceso: 13 May 2024].
- [30] S. Sendino, S. Martinez y A. Lamikiz, «Characterization of IN718 recycling powder and its effect on LPBF manufactured parts,» *Procedia CIRP*, vol. 94, pp. 227-232, 2020.
- [31] *Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia*, UNE-EN ISO 14040, Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid, 2006.

- [32] Eurofins Enviroment Testing, «Análisis de Ciclo de Vida (ACV): qué es y para qué sirve,» 22 Mar. 2024. [En línea]. Available: <https://www.eurofins-environment.es/es/analisis-de-ciclo-de-vida-que-es/>. [Último acceso: 17 May 2024].
- [33] Instituto Superior del Medio Ambiente, «Unidad didáctica Definición y exposición de las distintas fases de un ACV,» de *Metodología de Análisis de Ciclo de Vida. Herramienta de Software para ACV*.
- [34] B. I. Romero Rodríguez, «El Análisis del Ciclo de Vida y la Gestión Ambiental,» *Boletín IEE*, pp. 91-97, Jul.-Sep. 2003.
- [35] M. A. J. Huijbregts, Z. J. N. Steinmann, P. M. F. Elshout, G. Stam, F. Verones, M. Vieira, M. Zijp, A. Hollander y R. van Zelm, «ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level,» *The International Journal of Life Cycle Assessment*, vol. 22, pp. 138-147, 2016.
- [36] RENISHAW, «Data sheet SS 316L-0407 powder for additive,» 2018.
- [37] Ordenadores y portátiles, «¿Cómo funciona un brazo robótico?,» [En línea]. Available: <https://ordenadores-y-portatiles.com/brazo-robotico/>. [Último acceso: 31 May 2024].
- [38] Instituto Superior del Medio Ambiente, «Conceptos básicos de GaBi. Herramienta de software para ACV,» de *Metodología de Análisis del Ciclo de Vida. Software para ACV*.
- [39] Forta, «Ficha técnica pintura en aerosol Forta,» 2020.
- [40] Naciones Unidas, «¿Qué es el cambio climático?,» [En línea]. Available: <https://www.un.org/es/climatechange/what-is-climate-change>. [Último acceso: 25 Jun. 2024].
- [41] The Planet App, «¿Qué son las emisiones de CO2 y CO2 equivalente?,» 2 Jul. 2020. [En línea]. Available: <https://theplanetapp.com/que-son-las-emisiones-de-co2/>. [Último acceso: 25 Jun. 2024].
- [42] C. Nunez, «Explicación de qué son los combustibles fósiles,» National Geographic, 21 Mar. 2022. [En línea]. Available: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/explicacion-que-son-combustibles-fosiles>. [Último acceso: 25 Jun. 2024].
- [43] BRE Group, «Human Toxicity,» [En línea]. Available: <https://tools.bregroup.com/greenguide/page.jsp?id=2098>. [Último acceso: 26 Jun. 2024].

- [44] LUFILSUR, «¿Por qué se emplea taladrina en las operaciones de mecanizado?,» [En línea]. Available: <https://www.lufilsur.es/tipos-de-taladrina/>. [Último acceso: 19 Jun. 2024].
- [45] A. Blanco Rodríguez, *Estudio de los principales parámetros de influencia en la rotura de AAAs y planteamiento de un método de localización de las tensiones generadas en la pared arterial*, Valladolid, 2020.
- [46] Autodesk, «Autodesk Fusion con Netfabb: software para procesos de fabricación, diseño y simulación aditivos,» [En línea]. Available: https://www.autodesk.com/es/products/netfabb/overview?panel=buy&us_oa=dotcom-us&us_si=53e33d22-cdf0-467f-a582-3cccd11a26c0&us_st=netfabb&us_pt=NETF&plc=F360NFP&term=1-YEAR&tab=subscription. [Último acceso: 20 Jun. 2024].
- [47] Microsoft, «Compra todos los planes de Microsoft 365,» [En línea]. Available: <https://www.microsoft.com/es-es/microsoft-365/buy/compare-all-microsoft-365-products>. [Último acceso: 20 Jun. 2024].
- [48] METAL 3DP, «Polvo de acero inoxidable 316L,» [En línea]. Available: <https://met3dp.es/producto/316l-stainless-steel-powder/>. [Último acceso: 27 May 2024].
- [49] Shanghai Truer Technology Co., Ltd., «Polvo de Acero Inoxidable AISI 316L. Material de fabricación aditiva,» 27 Sep. 2023. [En línea]. Available: <https://am-material.com/es/news/stainless-steel-aisi-316l-powder/>. [Último acceso: 27 May 2024].
- [50] Universal Industrial Gases, Inc., «Unit Conversion Data for Argon,» [En línea]. Available: https://www.ugi.com/ar_conv.html. [Último acceso: 4 May 2024].
- [51] SLM Solutions, «Production Ready Selective Laser Melting. SLM 500 Selective Laser Melting Machine».
- [52] S. Kokare, J. P. Oliveira y R. Godina, «A LCA and LCC analysis of pure subtractive manufacturing, wire arc additive manufacturing, and selective laser melting approaches,» *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 101, pp. 67-85, 2023.
- [53] Bosch, «GGS 28 C Amoladora recta Bosch Professional,» 17 Jun. 2024. [En línea]. Available: <https://www.bosch-professional.com/es/es/products/ggs-28-c-0601220000>.

- [54] ACEROA, «Densidad del acero: qué es, tipos y para qué sirve,» [En línea]. Available: <https://www.aceroa.com/densidad-del-acero-que-es-tipos-y-para-que-sirve/> . [Último acceso: 3 Jun. 2024].
- [55] Deckel, «Ficha técnica DECKEL MAHO DMC 63 V».
- [56] Interempresas, «'Briquetar' para aprovechar - Mantenimiento industrial,» 24 Oct. 2011. [En línea]. Available: <https://www.interempresas.net/Mantenimiento/Articulos/57083-Briquetar-para-aprovechar.html>. [Último acceso: 10 Jun. 2024].
- [57] Instituto Superior del Medio Ambiente, «Metodologías de evaluación de impactos en un ACV,» de *Metodología de Análisis de Ciclo de Vida. Herramienta de Software para ACV*.
- [58] ITV ICE makers, «Limpieza y Mantenimiento del Acero Inoxidable».
- [59] S. Prochaska y O. Hildreth, «Effect of chemically accelerated vibratory finishing on the corrosion behavior of Laser Powder Bed Fusion 316L stainless steel,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 305, nº 117596, 2022.
- [60] Mareva, «Qué es la taladrina y para qué sirve,» [En línea]. Available: <https://mareva.es/que-es-la-taladrina-y-para-que-sirve/>. [Último acceso: 19 Jun. 2024].
- [61] M. H. e. al., «A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization,» National Institute for Public Health and the Environment RIVM, 2016.

ANEXO 1

FABRICACIÓN ADITIVA

Para obtener los datos necesarios y corroborar el correcto funcionamiento de los parámetros establecidos para el proceso de impresión de la pieza, se ha realizado una simulación rápida del proceso de LPBF con la máquina SLM Solutions 500, cuyas dimensiones son válidas para fabricar la pieza del brazo robótico.

Para esto se han utilizado varios softwares. En primer lugar, de Autodesk Fusion se han obtenido los datos del área, volumen y masa de la pieza con el correspondiente material, cuya densidad también viene definida en el programa. Estos datos se pueden observar en la siguiente figura.

Área	81588.788 mm ²
Densidad	0.008 g / mm ³
Masa	1744.235 g
Volumen	2.183E+05 mm ³
Material físico	Acero inoxidable 316L

Figura 75. Datos de la pieza de Autodesk Fusion (Elaboración propia)

Por otro lado, en Autodesk Netfabb se ha simulado la impresión LPBF con parámetros aptos para la máquina y el material utilizado y los correspondientes soportes para obtener el tiempo que tarda la pieza en realizarse. Se muestra la pieza con su correspondiente impresora en la Figura 76.

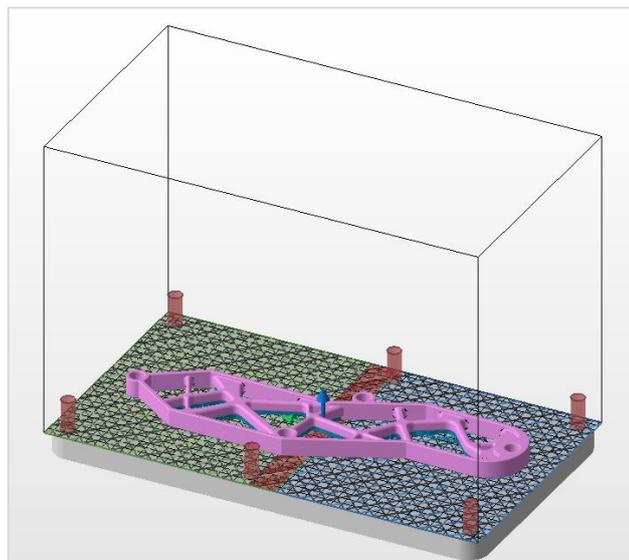


Figura 76. Simulación en el programa Autodesk Netfabb (Elaboración propia)

El tiempo recogido en la Figura 77 determina la fase de impresión.

Build time: 30h 6m 23s

Figura 77. Tiempo de impresión (Elaboración propia)

Además, de este software se ha obtenido el volumen de los soportes de impresión, que se utiliza para calcular la masa de los mismos para el ACV.

Support: 12.87 cm³

Figura 78. Volumen de los soportes (Elaboración propia)

FABRICACIÓN SUSTRACTIVA

En este apartado se indican los softwares utilizados para obtener los datos necesarios del proceso de fresado.

Diseño y propiedades del utillaje

En primer lugar, es necesario realizar un útil para sujetar el brazo robótico durante su mecanizado. El útil consta de un tocho de acero para herramientas con 4 taladros que corresponden con los del brazo robótico.

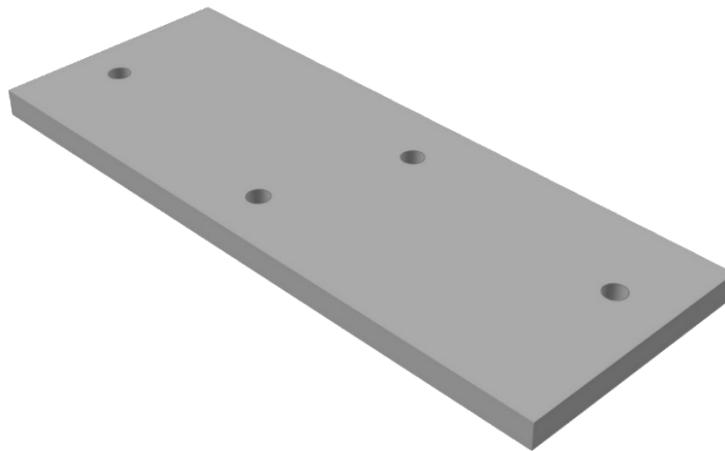


Figura 79. Geometría del útil de sujeción (Elaboración propia)

Para incluir esta pieza en el ACV, se necesita conocer sus datos, en concreto su masa. Esta se ha obtenido del software Catia V5.

Characteristics		Center Of Gravity (G)	
Volume	0,001m3	Gx	-74,999mm
Area	0,161m2	Gy	225,004mm
Mass	10,471kg	Gz	-10mm
Density	7850kg_m3		

Figura 80. Datos del útil (Elaboración propia)

Para incluirlo en GaBi, se ha estimado por un profesional que la duración del fresado del útil es aproximadamente 1 hora.

Simulación del fresado

Para el propio proceso de fresado se utiliza el software CAM llamado Tebis. Se puede observar la situación de la pieza en la fresadora en este programa en la Figura 81.

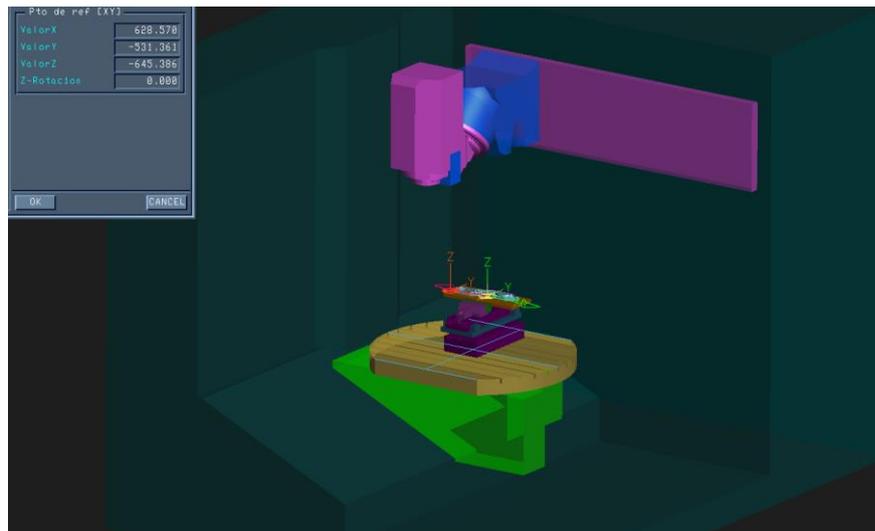


Figura 81. Simulación de la pieza en la fresadora (Elaboración propia)

Para realizar la simulación se ha trabajado con diferentes fresas, comenzando con una de 40 mm de diámetro. Para las zonas más pequeñas se ha utilizado una fresa de 4 mm por las dimensiones de los radios de la pieza. También hay que tener en cuenta que no se podría utilizar una de menor tamaño por la dureza del material.

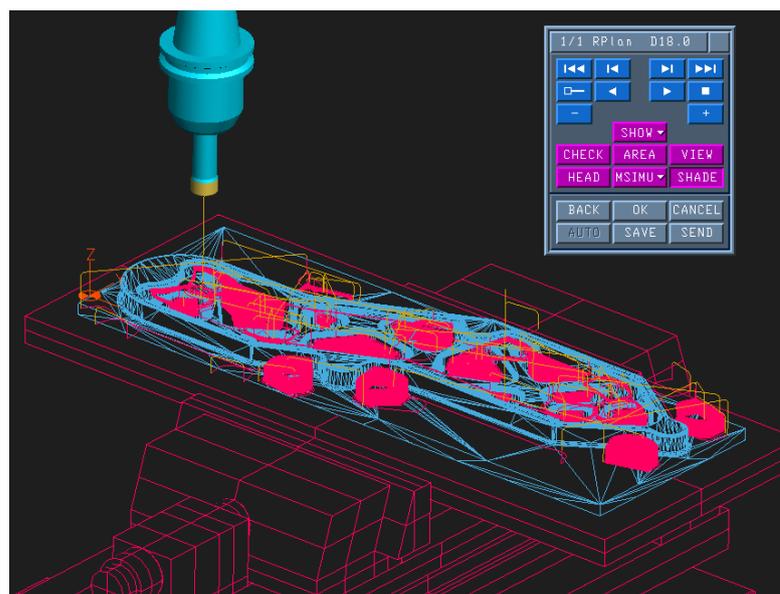


Figura 82. Zonas de fresado (Elaboración propia)

En la siguiente figura se muestra la pieza durante el proceso de fresado, colocada encima del útil. Durante la primera etapa del fresado se elimina el material excedente de los bordes y se realiza un primer mecanizado de las zonas huecas. Después se realizan el resto de los detalles por una cara y, posteriormente, se da la vuelta a la pieza para hacerlo por la otra.

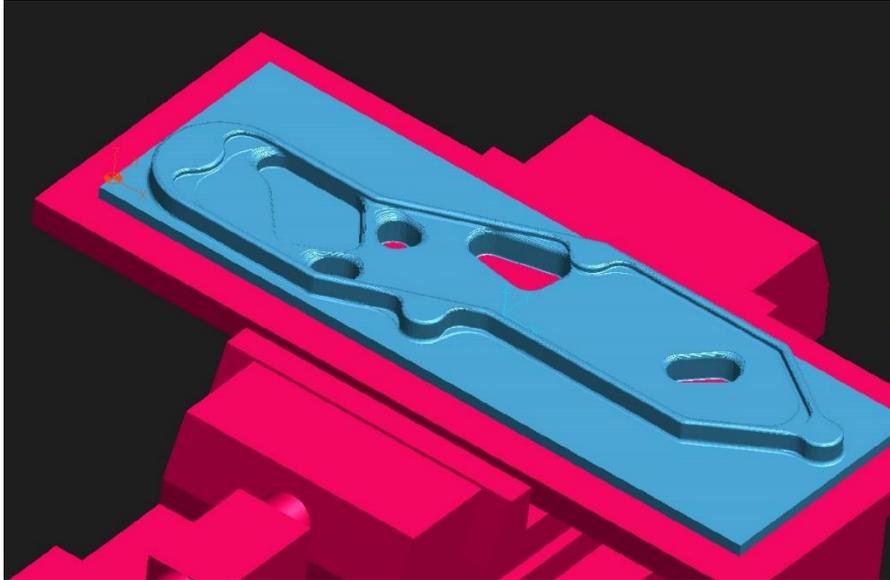


Figura 83. Pieza durante el proceso de fresado (Elaboración propia)

Mediante la simulación en este programa y su conversión a tiempo real por un profesional, se ha estimado que la duración del fresado de esta pieza es de 12 horas.

ANEXO 2

En este anexo se exponen los datos calculados para introducir las entradas y salidas necesarias de los procesos que intervienen en el ACV y que se han definido en el software. Para realizar estos cálculos hay que tener en cuenta que el sistema de producto tiene que ser estable, es decir, no se realizan los cálculos para una iteración de procesado, sino que se tienen en cuenta también los reciclados y reutilizaciones que intervienen en medio del ciclo y que aportan material de nuevo. GaBi se encarga de adaptar las cantidades requeridas de recursos por los procesos en caso de que al unirlos mediante los flujos cambien las cantidades de masa de materia prima que utilizan a causa del reciclado o reutilización de algún material. Cabe comentar también que, si algún proceso se encuentra repetido en diferentes planos, no se calculan sus valores varias veces, sino que se edita uno de ellos y GaBi cambia el resto en proporción.

FABRICACIÓN ADITIVA

Cálculo de las cantidades de acero inoxidable 316L en cada proceso

Se parte del proceso principal del que se obtiene la pieza para calcular las cantidades del resto, es decir, del LPBF. De este proceso se obtiene la pieza sin posprocesar con los soportes y el polvo sobrante. Por ello, es necesario conocer en primer lugar la masa de la pieza final, que se encuentra en la Figura 75, obtenida del software Autodesk Fusion.

$$m_{\text{pieza acabada}} = 1,744 \text{ kg}$$

Después, se calcula la masa de los soportes mediante el volumen de estos, obtenido de la Figura 78, de Autodesk Netfabb.

$$m_{\text{soportes}} = V_{\text{soportes}} \times \rho_{\text{pieza}} = 12870 \times 0,008 = 102,96 \text{ g} \\ \approx 0,103 \text{ kg}$$

Para continuar con los cálculos de las salidas del LPBF se necesita calcular la masa que se pierde durante el acabado superficial y así obtener la cantidad añadida que necesita la pieza que se imprime. Se ha definido una pérdida de material en el proceso de pulido de 0,1mm en toda la superficie de la pieza. Esto se ha calculado multiplicando el área superficial de la pieza (Figura 75) por 0,1mm, obteniendo 8158,8788 mm³ de volumen añadido a la pieza que posteriormente se eliminará.

$$m_{\text{sobrante acabado superficial}} = A_{\text{pieza}} \times 0,1 \text{ mm} \times \rho_{\text{pieza}} \\ = 8158,8788 \text{ mm}^3 \times \frac{0,008 \text{ g}}{\text{mm}^3} = 65,271 \text{ g} \approx 0,065 \text{ kg}$$

Por lo tanto, se obtienen los siguientes resultados de la pieza sin posprocesar (pieza SP), necesarios para las salidas del LPBF.

$$\begin{aligned} m \text{ pieza SP} &= m \text{ pieza acabada} + m \text{ sobrante acabado superficial} \\ &= 1,744 + 0,065 = 1,809 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} m \text{ pieza SP con soportes} &= m \text{ pieza SP} + m \text{ soportes} = 1,809 + 0,103 \\ &= 1,912 \text{ kg} \end{aligned}$$

Por otro lado, es necesario conocer la cantidad de polvo que se va a utilizar durante la impresión. El volumen del polvo sobrante se ha obtenido mediante el volumen del conjunto final que sale del LPBF, multiplicando las dimensiones útiles de la cama de polvo de la máquina de impresión 3D escogida por la altura de la pieza. Dentro de este volumen se encuentran la pieza sin posprocesar (pieza SP), los soportes y el polvo que queremos calcular.

$$\begin{aligned} V \text{ polvo sobrante} &= \text{dimensiones cama de impresión} \times \text{altura pieza} \\ &\quad - V \text{ pieza SP} - V \text{ soportes} \\ &= 500 \times 280 \times 20,32 - (218300 + 8158,8788) - 12870 \\ &= 2605471,121 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Con el volumen del polvo sobrante es posible calcular su masa mediante la densidad aparente. La densidad aparente del polvo debe de ser mayor de 4 g/cm³ [48]; sin embargo, al ser polvo compactado para impresión 3D, esta es mayor del 90% de la densidad teórica (0,008 g/mm³, Figura 75) [49]. Se ha considerado una densidad aparente del material en polvo de 0,0072 g/mm³.

$$\begin{aligned} m \text{ polvo sobrante} &= V \text{ polvo sobrante} \times \rho \text{ aparente} \\ &= 2605471,121 \times 0,0072 = 18759,392 \text{ g} \approx 18,759 \text{ kg} \end{aligned}$$

Como se ha indicado anteriormente, es necesario tener en cuenta los procesos de los que se obtiene material que se va a reutilizar para calcular el resto de las cantidades.

El tamizado es el proceso mediante el cual se recupera parte del polvo sobrante de la Fusión Láser de Lecho de Polvo. Se ha estimado que el porcentaje de polvo sobrante que se recupera después del tamizado es del 95%, teniendo en cuenta la cantidad perdida por partículas aglomeradas o impurezas. Así, se ha calculado que la cantidad de polvo que se recupera del tamizado y la cantidad que no son las siguientes.

$$m \text{ polvo recuperado} = 18,759 \times 0,95 = 17,821 \text{ kg}$$

$$m \text{ polvo desperdicio} = 18,759 - 17,821 = 0,938 \text{ kg}$$

Por otro lado, hay que calcular la cantidad de polvo total que necesita la cama de impresión para poder realizar la pieza por LPBF y, por ello, la cantidad de polvo que se tiene que conseguir por atomización de gas.

La masa total de material que se necesita para conseguir la pieza y, por tanto, la cantidad de polvo de salida de este proceso es la siguiente.

$$m_{\text{polvo}} = m_{\text{pieza SP con soportes}} + m_{\text{polvo sobrante}} = 1,912 + 18,759 \\ = 20,671 \text{ kg}$$

Sin embargo, de esta masa, una gran cantidad se obtiene del polvo recuperado del tamizado, por lo tanto, la cantidad de polvo que tiene que salir de la atomización de gas es la siguiente.

$$m_{\text{polvo atomización}} = 20,671 - 17,821 = 2,850 \text{ kg}$$

En la atomización de gas solo el 85% del polvo que se produce es apto para fabricación por LPBF [28], así, la cantidad de masa del tocho que tiene que entrar en el proceso para conseguir la cantidad necesaria de polvo tras la atomización se indica a continuación.

$$m_{\text{tocho}} = \frac{m_{\text{polvo atomización}}}{0,85} = 3,353 \text{ kg}$$

La diferencia de este polvo que no se puede utilizar para la atomización será reciclada.

$$m_{\text{polvo reciclado}} = m_{\text{tocho}} - m_{\text{polvo atomización}} = 0,503 \text{ kg}$$

Otros cálculos

Para las entradas y salidas de algunos de los procesos utilizados en el sistema que no vienen en la base de datos y se han creado para este estudio, se necesita también introducir cantidades de energía o de otros recursos o emisiones.

Atomización de gas

Los datos para el cálculo de las entradas y salidas de este proceso se han obtenido de la tabla de la siguiente figura.

Data of gas atomization from a powder supplier.

Parameter	Value in use
Yield of fine powder	85%
Productivity	0.5 kg/min
Medium frequency power	60 kW
Water consumption	140 L/min
Argon density	1.784 kg/m ³
Argon consumption	0.75–5 Nm ³ /min
Argon consumption (Bockin and Tillman, 2019)	3.5 Nm ³ /kg

Figura 84. Datos del proceso de atomización de gas [28]

Para la productividad de la máquina definida, la cantidad de acero 316L que sale de este proceso tarda 6,706 minutos en producirse, es decir, 0,112 horas aproximadamente. Con esto, se obtiene la energía, el agua y el argón necesarios para realizar el proceso. En GaBi es necesario añadir el argón en unidades de masa, por lo que se ha multiplicado la cantidad de este en Nm³ por 1,784 para obtener los kilogramos [50].

$$E \text{ consumida} = P \times t = 60 \times 0,112 = 6,720 \text{ kWh}$$

$$\text{Agua} = 140 \times 6,706 = 938,840 \text{ l}$$

$$\text{Argón} = 3,5 \times 3,353 = 11,7355 \text{ Nm}^3 \approx 20,936 \text{ kg}$$

Fusión Láser de Lecho de Polvo

Se ha realizado la siguiente tabla con las estimaciones del consumo energético y de argón en las diferentes etapas de LPBF en base al cálculo del tiempo realizado con Autodesk Netfabb (Figura 77); la ficha técnica de la impresora escogida [51], de la que se ha cogido el consumo de argón en l/min; y datos de bibliografía [52], mediante la cual se han estimado el tiempo de las etapas que no indica el software utilizado para la simulación del proceso. En GaBi se introducen los valores totales.

ETAPA	Tiempo (h)	Potencia (kW)	Energía (kWh)	Argón (l/min)	Argón (l totales)
Preparación	0,5	1	0,5		
Precalentamiento	0,5	8	4	250	7500
Impresión	30,106	9	270,954	16	28901,76
Enfriamiento	20	1	20		
TOTAL	51,106		295,454		36401,76

Tabla 7. Consumo en cada fase del LPBF

En GaBi es necesario añadir el argón en unidades de masa, por lo que se ha multiplicado la cantidad de este en litros por 1.3936 para obtener los kilogramos [50]. El total de argón en kilogramos aproximados es 50729,5 kg. De esta cantidad se considera que la máquina es capaz de reciclar el 95% con su sistema integrado de filtrado y el resto sale en forma de emisiones.

$$m \text{ argón reciclado} = 48193,025 \text{ kg}$$

Pulido eléctrico

Para el cálculo del consumo energético de este proceso se ha utilizado la potencia obtenida de una amoladora eléctrica [53]. Por otro lado, el tiempo se ha estimado con relación a procesos reales de pulido.

$$E = P \times t = 0,6 \times 16 = 9,600 \text{ kWh}$$

Pintado

La cantidad de pintura que se ha definido para pintar la pieza son 0,3 kg que equivalen a un bote de este tipo de pintura. El cálculo de las cantidades de cada componente lo ha realizado GaBi según las cantidades que se le han introducido por kilogramo de pintura en función de lo obtenido de una ficha técnica de una pintura apta para acero inoxidable [39].

Uso

Para la fase de uso se ha supuesto un desgaste final de la pieza durante toda esta etapa de un 10%.

$$m_{\text{pieza desgastada}} = m_{\text{pieza}} \times 0,9 = 1,570 \text{ kg}$$

FABRICACIÓN SUSTRACTIVA

Cálculo de las cantidades de acero inoxidable 316L en cada proceso

En este caso, para calcular la cantidad en kilogramos del tocho que será mecanizado, necesito conocer las dimensiones de este, que se calcularán según las máximas de la pieza dejando unos márgenes recomendados. El volumen del tocho y, con ello, su masa, están indicados en las siguientes ecuaciones.

$$V_{\text{tocho}} = 450 \times 150 \times 30 = 2025000 \text{ mm}^3$$

$$m_{\text{tocho}} = 2025000 \times \rho = 16200 \text{ g} = 16,200 \text{ kg}$$

Para el proceso de mecanizado se ha estimado una pérdida de material en el pulido de 0,05 mm en toda la superficie de la pieza.

$$\begin{aligned} m_{\text{sobrante acabado superficial}} &= A_{\text{pieza}} \times 0,05 \text{ mm} \times \rho_{\text{pieza}} \\ &= 81588,788 \text{ mm}^2 \times 0,05 \text{ mm} \times \frac{0,008 \text{ g}}{\text{mm}^3} = 32,636 \text{ g} \\ &\approx 0,033 \text{ kg} \end{aligned}$$

Por lo tanto, la masa de la pieza antes de realizarse el acabado superficial es la siguiente.

$$\begin{aligned} m_{\text{pieza SP}} &= m_{\text{pieza acabada}} + m_{\text{sobrante acabado superficial}} \\ &= 1,744 + 0,033 = 1,777 \text{ kg} \end{aligned}$$

En el proceso de fresado la materia prima del tocho se separa en dos masas diferentes: la pieza final y la viruta resultante del mecanizado.

$$m_{\text{viruta}} = m_{\text{tocho}} - m_{\text{pieza}} = 16,2 - 1,777 = 14,423 \text{ kg}$$

Cálculo de las cantidades de acero para herramientas en cada proceso

Por otro lado, para calcular la masa del tocho del útil de sujeción se utilizan sus dimensiones y su densidad [54].

$$m = 450 \times 150 \times 20 \times 0,00785 = 10,598 \text{ kg}$$

La masa final de esta pieza, que es el tocho con unos taladros roscados, está calculada por el software Catia y es 10,471 kg (Figura 80). Entonces, la pérdida de material, es decir, la viruta ocasionada durante este proceso tiene una masa de 0,127kg.

Otros cálculos

Fresado

Para calcular la energía consumida durante el proceso de fresado de forma aproximada, se ha calculado el tiempo total de duración del proceso mediante un software CAM y se ha obtenido una aproximación de 12 horas. La potencia media de la máquina se ha obtenido de su ficha técnica [55], por lo tanto, la estimación de su consumo energético se encuentra a continuación.

$$E_{consumida} = P \times t = 13 \times 12 = 156 \text{ kWh}$$

La cantidad de taladrina que se necesita se ha calculado con relación a la obtenida de la base de datos Ecoinvent [52]. Se ha realizado una proporción para calcular las cantidades en función de las obtenidas de la bibliografía (pieza B, taladrina B y tocho B).

$$m_{\text{taladrina}} = \frac{m_{\text{pieza}} \times m_{\text{taladrina B}}}{m_{\text{pieza B}}} = \frac{1,744 \times 30,25}{0,204} \approx 258,608 \text{ kg}$$

$$m_{\text{taladrina}} = \frac{m_{\text{tocho}} \times m_{\text{taladrina B}}}{m_{\text{tocho B}}} = \frac{16,2 \times 30,25}{2,02} = 242,599 \text{ kg}$$

A partir de estas dos ecuaciones se ha estimado una masa de la taladrina de 250 kg.

El propio programa GaBi se encarga de calcular cuanta cantidad de taladrina necesita producir inicialmente en función de la cantidad que se puede reutilizar.

Fresado útil de sujeción

Para calcular la cantidad de taladrina utilizada en este mecanizado se ha realizado una proporción con respecto a la utilizada en el fresado anterior, teniendo en cuenta la relación entre la cantidad de material eliminado del tocho inicial y la taladrina utilizada para ese proceso. Se ha obtenido una masa estimada de taladrina de 2,201 kg.

La electricidad necesaria para realizar este proceso se ha calculado de igual forma que para el otro proceso, pero estimando una duración del fresado de 1 hora.

$$E_{consumida} = P \times t = 13 \times 1 = 13 \text{ kWh}$$

Limpieza con aire comprimido

Para calcular la cantidad de aire comprimido que se necesita para limpiar la pieza, primero, se han obtenido los litros por minuto que salen de la pistola en base a la fórmula del tubo de Pitot. Se calcula la velocidad para calcular posteriormente la cantidad. La presión a la que se encuentra el aire son 6 bares, es decir 600000 pascales. También se considera que la boquilla por la que sale el aire es de 5mm de diámetro.

$$V = \sqrt{\frac{2 \times p}{\rho \text{ aire}}} = \sqrt{\frac{2 \times 600000}{1,2}} = 1000 \text{ m/s}$$

$$Q \text{ aire} = V \times A \text{ boquilla} = 1000 \times 0,0025^2 \times \pi = 0,0196 \text{ m}^3/\text{s}$$

Se ha considerado que la pieza está limpia en un minuto, por lo que se utilizarían los litros de la siguiente ecuación.

$$Q \text{ aire} = 0,0196 \text{ m}^3/\text{s} \times 60 = 1,176 \text{ m}^3$$

Para introducir este valor en GaBi es necesario convertirlo a Nm³. Eso es posible realizarlo mediante la siguiente fórmula, basada en la ecuación de los gases ideales. Se ha definido una temperatura del aire comprimido de 20°C (293,15 K) y, para las condiciones normales, 0°C (273,15K) y 1 atmósfera de presión (101325 Pa).

$$Nm^3 = \frac{m^3 \times P \times T_0}{P_0 \times T} = \frac{1,176 \times 600000 \times 273,15}{101325 \times 293,15} = 6,489 Nm^3$$

Pulido eléctrico

En este caso se ha considerado un pulido eléctrico de 0,05 mm en toda la superficie de la pieza y una duración del proceso de 8 horas. El consumo energético de este proceso según la potencia de la máquina utilizada [53] es el siguiente.

$$E = P \times t = 0,6 \times 8 = 4,800 \text{ kWh}$$

Reciclado de viruta: briquetado

Es necesario conocer las cantidades de acero y taladrina que se obtienen del proceso de briquetado. Se ha estimado que el 80% de las virutas es material que puede briquetarse y el 20% taladrina.

$$m \text{ briqueta} = m \text{ viruta} \times 0,8 = 11,538 \text{ kg}$$

$$m \text{ taladrina viruta} = m \text{ viruta} \times 0,2 = 2,885 \text{ kg}$$

De esa taladrina, el 5% se evapora y el 95% se pretende reciclar.

$$m \text{ taladrina viruta reciclable} = m \text{ taladrina viruta} \times 0,95 = 2,741 \text{ kg}$$

$$m \text{ taladrina viruta evaporada} = m \text{ taladrina viruta} \times 0,05 = 0,144 \text{ kg}$$

Por otro lado, el consumo de energía de este proceso se ha definido en 15 kW y su productividad en 200 kg/h [56]. Así, el consumo de electricidad durante el briquetado es el siguiente.

$$E \text{ consumida} = \frac{m \text{ viruta}}{200} \times 15 = 1,082 \text{ kWh}$$

Reciclado de viruta del útil: briquetado

Se repiten los cálculos anteriores con la masa de la viruta obtenida del útil.

$$m \text{ briqueta} = m \text{ viruta útil} \times 0,8 = 0,102 \text{ kg}$$

$$m \text{ taladrina viruta útil} = m \text{ viruta útil} \times 0,2 = 0,025 \text{ kg}$$

$$m \text{ taladrina viruta útil reciclable} = m \text{ taladrina viruta útil} \times 0,95 \\ = 0,024 \text{ kg}$$

$$m \text{ taladrina viruta útil evaporada} = m \text{ viruta útil} \times 0,2 \times 0,05 \\ = 0,001 \text{ kg}$$

$$E \text{ consumida} = \frac{m \text{ viruta}}{200} \times 15 = 0,010 \text{ kWh}$$

Reciclado de taladrina

La cantidad de taladrina que se va a recolectar para poder filtrarla es la taladrina que no se ha evaporado durante el fresado de la pieza, el fresado del útil y ambos reciclados de viruta.

Para ello, hay que calcular la cantidad de taladrina que sale del fresado en cada estado, quitándole la que se encuentra unida a la viruta, y, estimando que el 5% de la restante que salga se evapora.

$$m \text{ taladrina reciclable fresado} = (250 - 2,885) \times 0,95 = 234,759 \text{ kg}$$

$$m \text{ taladrina evaporada fresado} = (250 - 2,885) \times 0,05 = 12,356 \text{ kg}$$

Se han utilizado los mismos porcentajes para obtener la taladrina resultante del fresado del útil.

$$m \text{ taladrina reciclable fresado útil} = (2,201 - 0,025) \times 0,95 = 2,067 \text{ kg}$$

$$m \text{ taladrina evaporada fresado útil} = (2,201 - 0,025) \times 0,05 = 0,109 \text{ kg}$$

Entonces, la masa que se puede reciclar es la reciclable del fresado de la pieza, la del fresado del útil y la obtenida de ambos reciclados de viruta.

$$m \text{ taladrina} = 234,759 + 2,067 + 2,741 + 0,024 \\ = (m \text{ taladrina fresado} + m \text{ taladrina fresado útil}) \times 0,95 \\ = 239,591 \text{ kg}$$

De esta cantidad, se determina que el 80% se puede reutilizar tras su filtrado.

$$m \text{ taladrina reciclada} = m \text{ taladrina} \times 0,8 = 191,673 \text{ kg}$$

$$m \text{ taladrina desechada} = m \text{ taladrina} - m \text{ taladrina reciclada} \\ = 47,918 \text{ kg}$$