

Mario Enrique Hernández Korner

Estudio y caracterización de
factores que determinen los costes
y la sostenibilidad ambiental del
proceso de fabricación aditiva por
deposición fundida

Director/es

Albajez García, José Antonio
Lambán Castillo, María Pilar

<http://zaguan.unizar.es/collection/Tesis>



Universidad de Zaragoza
Servicio de Publicaciones

ISSN 2254-7606



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE FACTORES
QUE DETERMINEN LOS COSTES Y LA
SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL DEL PROCESO DE
FABRICACIÓN ADITIVA POR DEPOSICIÓN
FUNDIDA

Autor

Mario Enrique Hernández Korner

Director/es

Albajez García, José Antonio
Lambán Castillo, María Pilar

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Escuela de Doctorado

Programa de Doctorado en Ingeniería de Diseño y Fabricación

2023



Universidad
Zaragoza

Tesis Doctoral

ESTUDIO Y CARACTERIZACIÓN DE FACTORES QUE
DETERMINEN LOS COSTES Y LA SOSTENIBILIDAD
AMBIENTAL DEL PROCESO DE FABRICACIÓN ADITIVA
POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Autor

Mario Enrique Hernandez Korner

Director/es

Lambán Castillo, María Pilar
Albajez García, José Antonio

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA
Ingeniería de Diseño y Fabricación

2023



Universidad
Zaragoza

**Estudio y caracterización de factores que determinen los
costes y la sostenibilidad ambiental del proceso de
fabricación aditiva por deposición fundida**

Mario Enrique Hernandez Korner

TESIS DOCTORAL

Zaragoza 2023



Universidad
Zaragoza

**Estudio y caracterización de factores que determinen los
costes y la sostenibilidad ambiental del proceso de
fabricación aditiva por deposición fundida**

Mario Enrique Hernandez Korner

Dirigida por

Dra. María Pilar Lambán
Dr. José Antonio Albajez García

Para la obtención del Título de Doctor
por la Universidad de Zaragoza

Zaragoza, septiembre 2023.

Esta tesis está dedicada a las personas que con su amor incondicional y paciencia estuvieron a mi lado en los buenos y malos momentos durante su desarrollo y del doctorado en general.

Dedico esta tesis a Lis mi pilar y amiga incondicional, a mi hijo Aarón quien siempre supo sacar una sonrisa en los momentos más oscuros y a mis familias; la de sangre por su amor y la aragonesa que me recibió y trató como a un igual.

AGRADECIMIENTOS

Al culminar la tesis tengo una clara visión de que sin Dios y la fortaleza que encontré en él en los momentos más oscuros fue la clave para no desfallecer. Agradezco a mi compañera de jornada, amiga y esposa por escuchar y ser la voz de la razón, a ti Lis agradezco tu apoyo incondicional.

Agradezco a mi madre por apoyarme física y espiritualmente en los momentos que lo necesité. Además, a la familia lejos de casa, la familia que con jocosidad llamo panamaña, por estar pendientes de mi hijo, por los consejos, paño de lágrimas y compañía.

Doy gracias a los compañeros del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación, quienes siempre se mostraron dispuestos para ofrecer su ayuda en temas logísticos y de sistemas.

Un agradecimiento especial a los directores de la tesis quienes con sus consejos y dirección este trabajo logró ser perfeccionado.

Un agradecimiento especial al Banco Santander y los miembros de la oficina de relaciones internacionales de la Universidad de Zaragoza por confiar en mis capacidades como investigador y el seguimiento a las actividades que realicé durante mi estancia doctoral.

Según hebreos 11:1, "...fe es la garantía de lo que se espera, la certeza de lo que no se ve." Esta es la fuerza que me mueve que se manifiesta en las personas que me motivaron a culminar, GRACIAS.

RESUMEN

“Estudio y caracterización de factores que determinen los costes y la sostenibilidad ambiental del proceso de fabricación aditiva por deposición fundida”

Autor:

Mario Enrique Hernandez Korner

Directores:

Dra. María Pilar Lambán

Dr. José Antonio Albajez García

La fabricación aditiva se ha desarrollado en los últimos 30 años de una forma vertiginosa aunado al vencimiento de algunas de las primeras patentes realizadas para algunas tecnologías, ha ayudado a que cada vez más empresas consideren la implementación de esta tecnología en un entorno de fabricación.

La fabricación aditiva se puede realizar de distintas formas y con distintos tipos de materiales analizados en esta tesis. A través de la caracterización y definición de los parámetros que puedan afectar el coste, el tiempo y la sostenibilidad, permitirán a las empresas, directivos y profesionales, tomar decisiones conscientes sobre el tipo de tecnología, material y dimensiones necesarias para una fabricación lo más eficiente posible, consistente con la política de cada organización.

Entre las tecnologías más destacables se encuentra la fabricación aditiva a través de la extrusión de filamentos, cuyo nombre es modelado por deposición fundida o FDM por sus siglas en inglés. Esta tecnología es de bajo coste y ofrece una solución efectiva para el prototipado rápido, fabricación de utillajes y piezas para ensamble.

El objetivo de esta tesis es la identificación y caracterización de los parámetros relacionados con el cálculo del coste y sostenibilidad del proceso de modelado por deposición fundida. Además, estudiar y analizar el impacto sobre el rendimiento del proceso y de las emisiones mediante el cálculo de la huella de carbono emitida en la fabricación de piezas con esta tecnología.

Primero, se caracterizó el proceso de fabricación utilizando la tecnología FDM con ello se identificaron los bloques de coste y se identificó la forma del cálculo del coste unitario de cada bloque. Segundo, se propuso un modelo para calcular la huella de carbono del proceso de fabricación utilizando la tecnología FDM. Tercero, para facilitar la validación teórica de los

modelos propuestos se propuso un escenario ideal de implementación de la tecnología. Por último, se validaron tanto el modelo de coste como el del cálculo de la huella de carbono en varias simulaciones.

En la simulación del modelo de coste fue posible identificar que con una ocupación del área de la bandeja de impresión de aproximadamente el 65%, no hay mucha reducción en el coste por pieza lo que podría justificar que se utilice la fabricación aditiva para escenario de lotes pequeños de producción. Por otro lado, al simular el modelo de la huella de carbono y comparando con otros modelos similares, el modelo propuesto es el primero en ofrecer un análisis profundo de las conexiones entre tres principales parámetros de impresión (velocidad, porcentaje de relleno y altura de capa).

Es posible ahora conocer a través de los modelos propuestos el lote óptimo a producir desde el punto de vista económico y de sostenibilidad ambiental. Permitiendo hacer una comparativa más justa con una cadena tradicional, los modelos propuestos podrían integrar un análisis más profundo desde las dimensiones medioambientales y económicas.

ABSTRACT

"Study and characterization of cost drivers and environmental sustainability of the fused deposition additive manufacturing process."

Author:

Mario Enrique Hernandez Korner

Directors:

Dra. María Pilar Lambán

Dr. José Antonio Albajez García

Additive manufacturing has evolved at a dizzying pace over the last 30 years. The expiration of some of the first patents for some of the technologies has helped more and more companies consider implementing this technology in a manufacturing environment.

Additive manufacturing can be performed in different ways and with different types of materials analyzed in this thesis. By characterizing and defining the parameters that can affect cost, time, and sustainability, they will allow companies, managers, and professionals to make conscious decisions about the type of technology, material, and dimensions needed for the most efficient manufacturing possible, consistent with the policies of each organization.

One of the most notable technologies is filament extrusion additive manufacturing, known as fused deposition modeling, or FDM. This technology is low cost and provides an effective solution for rapid prototyping, tooling, and customized assembly parts.

The objective of this thesis is to identify and characterize the parameters related to the cost calculation and sustainability of the FDM process. In addition, to study and analyze the impact on the performance of the process and environmental emissions by calculating the carbon footprint emitted in the manufacture of parts using this technology.

First, the manufacturing process using FDM technology was characterized by identifying the cost blocks and determining how to calculate the unit cost of each block. Second, a model was proposed to calculate the carbon footprint of the printing process using FDM technology. Third, an ideal technology implementation scenario was proposed to facilitate the theoretical validation of the proposed models. Finally, both the cost model and the carbon footprint calculation model were validated in several simulations.

In the simulation of the cost model, it was possible to identify that with a build plate occupancy of approximately 65%, there is not much reduction in the cost per part that could justify the use of additive manufacturing for a low-volume production scenario. On the other hand, by simulating the carbon footprint model and comparing it with other similar models, the proposed model is the first to provide an in-depth analysis of the relationships between the three main printing parameters (speed, infill percentage, and layer height).

Through the proposed models, it is now possible to know the optimal batch to be produce from the point of view of economic and environmental sustainability. By allowing a fairer comparison with a traditional chain, the proposed models could integrate a deeper analysis from the environmental and economic dimensions.

ÍNDICE

RESUMEN	ix
ABSTRACT	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABLAS	xix
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	xxiii
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	27
1.1. ÁMBITO DE APLICACIÓN	27
1.2. OBJETIVO Y ALCANCE DE LA TESIS	27
1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS	28
CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES.....	33
2.1. INDUSTRIA 4.0.....	33
2.2. FABRICACIÓN ADITIVA.....	35
2.3. CLASIFICACIÓN / TECNOLOGÍAS / MATERIALES	36
2.4. REVISIÓN DE LITERATURA EN MODELOS DE COSTE Y PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD DE LA FA	39
2.4.1. MODELOS DE COSTE EN FABRICACIÓN ADITIVA	44
2.4.2. PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD DE LA FABRICACIÓN ADITIVA	46
2.5. CONSIDERACIONES FINALES.....	49
CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DE COSTES EN LA FABRICACIÓN ADITIVA Y PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DEL PROCESO	53
3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	53
3.1.1. ESTRUCTURA GENERAL DE COSTES	55
3.1.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS BLOQUES DE COSTE	56
3.2. PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA	61
3.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA61	

3.2.2. BLOQUES PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA.....	63
VALIDACIÓN TEÓRICA DE LOS MODELOS PROPUESTOS.....	69
CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN TEÓRICA DE LOS MODELOS PROPUESTOS	71
4.1. MARCO METODOLÓGICO PARA LA VALIDACIÓN DE LOS MODELOS.....	71
4.1.1. GEOMETRÍA DE IMPRESIÓN.....	72
4.1.2. MATERIAL DE IMPRESIÓN	76
4.1.3. EQUIPOS DE IMPRESIÓN	79
4.1.4. SOFTWARE DE IMPRESIÓN	83
4.1.5. PARÁMETROS DE IMPRESIÓN	85
4.1.6. COSTES DE IMPRESIÓN.....	85
4.2. CASO 1: VALIDACIÓN TEÓRICA DEL MODELO DE COSTE.....	87
4.2.1. ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO	92
4.3. CASO 2: VALIDACIÓN TEÓRICA DEL MODELO PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO.....	93
4.3.1. SIMULACIÓN SEGÚN MATERIAL DE IMPRESIÓN	94
4.3.2. SIMULACIÓN SEGÚN TIPOLOGÍA DE PIEZA	99
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	107
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	109
5.1. CONCLUSIONES	109
5.2. TRABAJOS FUTUROS	112
5.3. DIFUSIÓN DE RESULTADOS	112
REFERENCIAS.....	115
ANEXOS	131
PARÁMETROS DE IMPRESIÓN (SIMULACIÓN CÁLCULO DE LA HUELLA)	131
SIMULACIÓN DE LOTE DE ESPECÍMENES EN LA POSICIÓN A	151
SIMULACIÓN DE LOTE DE ESPECÍMENES EN LA POSICIÓN B	158

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Crecimiento del conocimiento tecnológico alrededor de las revoluciones industriales (Korner et al. 2020)	33
Figura 2. Facilitadores de la cuarta revolución industrial (Korner et al. 2020)	34
Figura 3. Clasificación de la FA por conformación de la materia prima.....	36
Figura 4. Pirámide de materiales utilizados en la FA según sus características, desempeño y resistencia.....	37
Figura 5. Componentes generales de las máquinas FDM	38
Figura 6. Términos de búsqueda en modelos de negocios / coste y sostenibilidad	39
Figura 7. Prisma Chart	40
Figura 8. Publicaciones por año	41
Figura 9. Top 20 revistas en modelos de negocio / coste y sostenibilidad	41
Figura 10. Top 20 palabras clave relacionadas con modelos de negocio / coste (a) y sostenibilidad (b)	43
Figura 11. Mapa mundial sobre las relaciones entre países y publicaciones en ambas temáticas.....	43
Figura 12. Descripción gráfica del proceso de impresión con tecnología FDM	53
Figura 13. Sistema de empuje directo (a) y Bowden (b) para impresión utilizando filamentos.	54
Figura 14. Estructura de desglose de costes.....	56
Figura 15. Descripción gráfica del primer bloque de costes, $C_{material}$	57
Figura 16. Descripción gráfica del segundo bloque de costes, $C_{mano\ de\ obra}$	58
Figura 17. Descripción gráfica del tercer bloque de costes, C_{equipo}	59
Figura 18. Energías consideradas para el cálculo la huella de carbono.	63
Figura 19. Piezas utilizadas en el estudio de (Baumers et al. 2016)(a) y piezas utilizadas sen el estudio de (Huang et al. 2016)(b)	72
Figura 20. Dimensiones del espécimen para ensayos de tensión de acuerdo con la norma ASTM D638-14	73
Figura 21. Dimensiones de la pieza CEs (a) y de la pieza Ses (b)	74
Figura 22. Especimen de ensayo con rellenos de 20% (a), 60% (b) y 100% (c).....	75
Figura 23. Pieza CEs sin estructura de soporte (a) y con estructura de soporte (b)	76
Figura 24. Impresora tipo delta (Anycubic 2023)	80
Figura 25. Dirección de movimiento de impresora polar	80
Figura 26. Ejemplo de brazo robótico con extrusor de filamento	81

Figura 27. Imagen representativa de la impresora Ultimaker S5 (a) y de la impresora CreatBot PEEK-300 (b).....	82
Figura 28. Ejemplo de previsualización del tiempo y gramos de material simulados en Cura	84
Figura 29. Bloque de coste de material	85
Figura 30. Bloque de coste de mano de obra	86
Figura 31. Bloque de coste de maquinaria	86
Figura 32. Fuente de costes y peso porcentual (a) y gráfico de Pareto para 8 piezas por lote (b) para los ensayos con PEEK.....	90
Figura 33. Coste unitario y fuente de coste por tamaño de lote para ensayos con PEEK.....	90
Figura 34. Fuente de costes y peso porcentual (a) y gráfico de Pareto para 8 piezas por lote (b) para los ensayos con ABS	91
Figura 35. Coste unitario y fuente de coste por tamaño de lote para ensayos con ABS	91
Figura 36. Porcentaje de ahorro por material y tamaño del lote con respecto a un lote unitario	92
Figura 37. Comportamiento de los pesos ante variación de precios en ensayo con PEEK (a) y en ensayos con ABS (b).....	93
Figura 38. Espécimen con orientación A (a). Espécimen con orientación B (b). Espécimen con orientación C (c).....	95
Figura 39. Comparación entre material y desempeño energético (a). Máxima E_{FDM} por material y orientación de la pieza (b)	97
Figura 40. Gramos de CO_2 equivalente por velocidad y orientación del espécimen con ABS(a), PP(b), PLA(c), PETG(d) y TPU€	99
Figura 41. Promedio de tiempo de impresión por orientación del espécimen.	99
Figura 42. Piezas utilizadas en la 2da simulación, a) esfera cortada a 45° de su tangente, b) media esfera, c) espécimen para ensayos de tensión en la posición A, B, C y D.	101
Figura 43. Promedio de emisiones de CO_2 equivalente de los especímenes por cada material.	102
Figura 44. Promedio de emisiones de CO_2 equivalente de la pieza CEs por cada material.	102
Figura 45. Promedio de emisiones de CO_2 equivalente de la pieza Ses por cada material.	103
Figura 46. Emisiones de CO_2 equivalente por volumen geométrico por altura de capa.	104
Figura 47. Emisiones de CO_2 equivalente por volumen geométrico por porcentaje de relleno.	105
Figura 48. Emisiones de CO_2 equivalente por volumen geométrico por velocidad de impresión.	105

Figura 49. Distribución del lote en la posición A en la bandeja de impresión (2da simulación)	151
Figura 50. Emisiones de CO ₂ equivalente del lote del espécimen en la posición A fabricado con PLA por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.	152
Figura 51. Emisiones de CO ₂ equivalente del lote del espécimen en la posición A fabricado con ABS por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.	154
Figura 52 Comparativa de las energías calculadas entre el PLA y el ABS en la fabricación de los especímenes en la posición A	155
Figura 53. Emisiones de CO ₂ equivalente del lote del espécimen en la posición A fabricado con PEEK por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.	156
Figura 54. Distribución del lote en la posición B en la bandeja de impresión (2da simulación)	158
Figura 55. Emisiones de CO ₂ equivalente del lote del espécimen en la posición B fabricado con PLA por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.	159
Figura 56. Emisiones de CO ₂ equivalente del lote del espécimen en la posición B fabricado con ABS por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.	161
Figura 57. Comparativa de las energías calculadas entre el PLA y el ABS en la fabricación de los especímenes en la posición B	163
Figura 58. Emisiones de CO ₂ equivalente del lote del espécimen en la posición B fabricado con PEEK por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.	164
Figura 59. Distribución del lote en la posición C en la bandeja de impresión (2da simulación)	166
Figura 60. Emisiones de CO ₂ equivalente del lote del espécimen en la posición C fabricado con PLA por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.	167
Figura 61. Emisiones de CO ₂ equivalente del lote del espécimen en la posición C fabricado con ABS por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.	169
Figura 62. Comparativa de las energías calculadas entre el PLA y el ABS en la fabricación de los especímenes en la posición C	171
Figura 63. Emisiones de CO ₂ equivalente del lote del espécimen en la posición C fabricado con PEEK por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.	171
Figura 64. Distribución del lote en la posición D en la bandeja de impresión (2da simulación)	173
Figura 65. Emisiones de CO ₂ equivalente del lote del espécimen en la posición D fabricado con PLA por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.	174
Figura 66. Emisiones de CO ₂ equivalente del lote del espécimen en la posición D fabricado con ABS por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.	176

Figura 67. Comparativa de las energías calculadas entre el PLA y el ABS en la fabricación de los especímenes en la posición D	178
Figura 68. Emisiones de CO2 equivalente del lote del espécimen en la posición D fabricado con PEEK por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.....	178
Figura 69. Distribución del lote de piezas CEs (2da simulación).....	180
Figura 70. Emisiones de CO2 equivalente del lote de piezas CEs fabricado con PLA por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.....	181
Figura 71. Emisiones de CO2 equivalente del lote de piezas CEs fabricado con ABS por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.....	183
Figura 72. Comparativa de las energías calculadas entre el PLA y el ABS en la fabricación de las piezas CEs	185
Figura 73. Emisiones de CO2 equivalente del lote de piezas CEs fabricado con PEEK por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.....	185
Figura 74. Distribución del lote de piezas Ses (2da simulación)	187
Figura 75. Emisiones de CO2 equivalente del lote de piezas Ses fabricado con PLA por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.....	188
Figura 76. Emisiones de CO2 equivalente del lote de piezas Ses fabricado con ABS por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.....	190
Figura 77. Comparativa de las energías calculadas entre el PLA y el ABS en la fabricación de las piezas Ses.....	192
Figura 78. Emisiones de CO2 equivalente del lote de piezas Ses fabricado con PEEK por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.....	192

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Materiales utilizados en FDM y sus características.....	37
Tabla 2. Top 9 revistas más citadas por categoría	42
Tabla 3. Modelos de costes propuestos por año, tecnología y conformación de la materia prima	44
Tabla 4. Modelos de coste más relevantes, sus contribuciones y tecnologías.....	46
Tabla 5. Materiales reciclados utilizados para FA.....	47
Tabla 6. Principales hallazgos en la literatura sobre sostenibilidad ambiental y tecnologías FA	48
Tabla 7. Parámetros de la simulación.....	88
Tabla 8. Resultados de las simulaciones de especímenes para ensayos con PEEK y distintos tamaños de lote.....	88
Tabla 9. Resultado de las simulaciones con ABS.....	89
Tabla 10. Materiales seleccionados por dificultad y características de impresión	94
Tabla 11. Velocidades de impresión escogidas por material	97
Tabla 12. E_{FDM} calculado por velocidad de impresión y orientación del espécimen	98
Tabla 13. Materiales escogidos y sus parámetros de impresión para la simulación según tipología de pieza	100
Tabla 14. Parámetros de impresión utilizados para la simulación según tipología de pieza	100
Tabla 15. Propiedades de impresión utilizadas en el espécimen en la posición A (2da simulación).....	151
Tabla 16. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PLA en la posición A del espécimen.....	152
Tabla 17. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PLA en la posición A del espécimen.....	153
Tabla 18. Comparación porcentual de la energía promedio (kWh) por cada % de relleno con PLA en la posición A del espécimen.....	153
Tabla 19. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con ABS en la posición A del espécimen.	154
Tabla 20. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con ABS en la posición A del espécimen.....	155
Tabla 21. Comparación porcentual de la energía promedio (kWh) por cada % de relleno con ABS en la posición A del espécimen	155
Tabla 22. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PEEK en la posición A del espécimen.....	156

Tabla 23. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PEEK en la posición A del espécimen	157
Tabla 24 Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PEEK en la posición A del espécimen.....	157
Tabla 25. Propiedades de impresión utilizadas en el espécimen en la posición B (2da simulación).....	158
Tabla 26. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PLA en la posición B del espécimen.....	159
Tabla 27. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PLA en la posición B del espécimen.....	160
Tabla 28. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PLA en la posición B del espécimen.....	160
Tabla 29. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con ABS en la posición B del espécimen	161
Tabla 30. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con ABS en la posición B del espécimen	162
Tabla 31. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con ABS en la posición B del espécimen	162
Tabla 32. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PEEK en la posición B del espécimen.....	164
Tabla 33. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PEEK en la posición B del espécimen	165
Tabla 34. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PEEK en la posición B del espécimen.....	165
Tabla 35. Propiedades de impresión utilizadas en el espécimen en la posición C (2da simulación).....	166
Tabla 36. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PLA en la posición C del espécimen	167
Tabla 37. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PLA en la posición C del espécimen.....	168
Tabla 38. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PLA en la posición C del espécimen	168
Tabla 39. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con ABS en la posición C del espécimen	169
Tabla 40. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con ABS en la posición C del espécimen	170

Tabla 41. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con ABS en la posición C del espécimen	170
Tabla 42. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PEEK en la posición C del espécimen.....	172
Tabla 43. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PEEK en la posición C del espécimen	172
Tabla 44. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PEEK en la posición C del espécimen.....	172
Tabla 45. Propiedades de impresión utilizadas en el espécimen en la posición D (2da simulación).....	173
Tabla 46. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PLA en la posición D del espécimen	174
Tabla 47. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PLA en la posición D del espécimen.....	175
Tabla 48. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PLA en la posición D del espécimen	175
Tabla 49. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con ABS en la posición D del espécimen	176
Tabla 50. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con ABS en la posición D del espécimen	177
Tabla 51. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con ABS en la posición D del espécimen	177
Tabla 52. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PEEK en la posición D del espécimen.....	179
Tabla 53. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PEEK en la posición D del espécimen	179
Tabla 54. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PEEK en la posición D del espécimen.....	180
Tabla 55. Propiedades de impresión utilizadas en la pieza CEs (2da simulación).....	180
Tabla 56. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PLA para la pieza CEs	181
Tabla 57. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PLA para la pieza CEs.....	182
Tabla 58. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PLA para la pieza CEs	182
Tabla 59. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con ABS para la pieza CEs	183

Tabla 60. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con ABS para la pieza CEs	184
Tabla 61. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con ABS para la pieza CEs	184
Tabla 62. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PEEK en la pieza CEs.....	186
Tabla 63. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PEEK de la pieza CEs	186
Tabla 64. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PEEK para la pieza CEs.....	187
Tabla 65. Propiedades de impresión utilizadas en la pieza Ses (2da simulación).....	187
Tabla 66. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PLA para la pieza Ses	189
Tabla 67. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PLA para la pieza Ses	189
Tabla 68. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PLA para la pieza Ses	189
Tabla 69. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con ABS para la pieza Ses.....	190
Tabla 70. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con ABS para la pieza Ses.....	191
Tabla 71. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con ABS para la pieza SEs	191
Tabla 72. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PEEK en la pieza Ses	193
Tabla 73. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PEEK de la pieza Ses.....	193
Tabla 74. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PEEK para la pieza Ses	193

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Siglas	Inglés	Castellano
FA		Fabricación aditiva
FDM	Fused deposition modeling	Modelado por deposición fundida
CO2		Dióxido de carbono
ASTM	American Society for testing and materials	Sociedad estadounidense para pruebas y materiales
PLA	Polylactic acid	Ácido poliláctico
PP	Polypropylene	Polipropileno
PC	Polycarbonates	Policarbonato
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene	Acrilonitrilo butadieno estireno
PEEK	Polyetheretherketone	Poliéter éter cetona
PRISMA	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses	
SLA	Stereolithography	Estereolitografía
SLS	Selective laser sintering	Sinterizado selectivo por láser
SLM	Selective laser melting	Fusión laser selectiva
EBM	Electron beam melting	Fusión por haz de electrones
DMLS	Direct metal laser sintering	Sinterizado directo de metal por láser
STL	Standard triangle language	Lenguaje estándar de triángulos
I_D		Índice de dedicación
I_{uso}		Índice de uso
C_f		Calor específico del filamento
C_h		Calor específico del material de la bandeja de impresión
X		Calor latente

Siglas	Inglés	Castellano
V		Volumen total de la pieza
v		Caudal volumétrico de filamento
m		Masa del material o bandeja
CEs		Casi esfera
Ses		Semiesfera
PETG	Polyethylene terephthalate glycol	Tereftalato de polietileno glycol
TPU	Thermoplastic polyurethane	Poliuretano termoplástico

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. ÁMBITO DE APLICACIÓN

La presencia de la fabricación aditiva en adelante FA en entornos productivos y/o logísticos está relacionada con distintas necesidades de la industria. Por un lado, en el sector de la automoción y aeroespacial, con la necesidad de productos terminados con características muy particulares y baja serie de producción, como utillajes, componentes o piezas de recambio. Por otro lado, en el sector logístico, surge como una respuesta a la necesidad de descentralizar los sistemas productivos y personalización de productos.

Las decisiones empresariales se basan en la conveniencia o no de una actuación, es igual para la incorporación de la FA en un entorno productivo y/o logístico. Las características de los procesos analizados, en los cuales influyen coste, tiempo y sostenibilidad, son factores por analizar para tomar una decisión empresarial.

La FA se puede realizar de distintas formas que, durante el desarrollo de esta tesis, se irán analizando. La FA comprende múltiples tecnologías que tienen sus propias características técnicas, en contraste con los sistemas tradicionales de fabricación. La caracterización y definición de parámetros que puedan afectar el coste, el tiempo y la sostenibilidad, permitirán una toma de decisión consciente sobre el tipo de tecnología, material y dimensiones necesarias.

Por los motivos antes mencionados y a la falta de trabajos previos, específicos en el ámbito de las tecnologías basadas en deposición fundida de filamentos, el trabajo de esta tesis pretende aportar la caracterización de costes y emisiones de la tecnología. Con el fin de obtener los costes de fabricación en distintos escenarios de producción, además de las emisiones y sostenibilidad del proceso en el tiempo.

1.2. OBJETIVO Y ALCANCE DE LA TESIS

Esta tesis tiene como objetivo general identificar y caracterizar los parámetros relacionados con el cálculo del coste y sostenibilidad del proceso de modelado por deposición fundida en adelante FDM. Además, estudiar y analizar el impacto sobre el rendimiento del proceso y de las emisiones mediante el cálculo de la huella de carbono emitida en la fabricación de piezas con esta tecnología.

Los objetivos específicos por alcanzar son los siguientes:

- Identificar los factores de coste de la fabricación aditiva en distintos entornos de fabricación.
- Caracterizar y parametrizar los bloques de costes identificados con el fin de establecer procedimientos de recolección de datos.
- Desarrollar un modelo con los factores de coste de la fabricación aditiva y validar teóricamente la conveniencia de su implementación en un entorno real.
- Identificar en el proceso de fabricación, fuentes de emisión de CO₂ equivalente para el cálculo de la huella de carbono por pieza.

Se espera caracterizar los costes de fabricación utilizando la FA en un entorno de fabricación tradicional y así aprovechar la personalización que ofrece la tecnología. Además, encontrar la combinación de parámetros y ajustes de impresión para disminuir las emisiones de CO₂ equivalente. Identificando estos parámetros será posible hacer una comparativa, no sólo de los costes de fabricación, sino también de la sostenibilidad del proceso para escoger la mejor alternativa de fabricación.

A continuación, se describe cómo está estructurada la tesis y los distintos capítulos que la componen.

1.3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

Esta tesis que plantea la caracterización de los costes y parámetros sostenibles de la FA se estructura de la siguiente manera.

En el capítulo 1 se presenta una introducción a la temática de la tesis, donde se explica el ámbito de aplicación, el objetivo, alcance y estructura del documento. En el ámbito de aplicación se introduce al concepto de FA y sus aplicaciones industriales para describir la brecha identificada que se tratará de cerrar en este trabajo. En los objetivos y alcance se definen los objetivos generales y específicos por alcanzar y hasta donde se pretende llegar con este trabajo.

Por otro lado, en el capítulo 2 de antecedentes, se presenta una revisión de la literatura de los principales conceptos ligados con la tesis entre los que resaltan: la industria 4.0, la fabricación aditiva, la clasificación de la FA y, por último, una revisión sistemática y exhaustiva de los modelos de coste existentes y los parámetros de sostenibilidad de la FA. Al finalizar el capítulo, se presentan unas consideraciones finales tomando en cuenta la revisión de literatura y la motivación de adoptar esta línea de investigación.

Seguidamente, en el capítulo 3, se presentan los modelos generales para el cálculo del coste y para el cálculo de las emisiones de CO₂ equivalente en la FA. Además, se introducen las características generales del proceso de FA escogido para el cálculo, la estructura general de costes presentada, la definición de los bloques de coste y la caracterización de los parámetros y bloques para el cálculo de la huella de carbono.

En el capítulo 4 se presentan las validaciones teóricas, tanto para el modelo de coste como para el modelo para el cálculo de la huella de carbono. La validación de ambos modelos se lleva a cabo con simulaciones con parámetros definidos y controlados utilizando un software.

Por último, en el capítulo 5, se presentan las conclusiones, los hallazgos a los que se han podido llegar a través de este trabajo y los trabajos futuros que podrían presentarse a partir de los resultados finales.

A continuación, el capítulo 2, donde se presentan los antecedentes y la revisión sistemática y exhaustiva de literatura concernientes a modelos de coste y parámetros de sostenibilidad, además de los conceptos relacionados con la FA.

CAPÍTULO 2:

ANTECEDENTES

CAPÍTULO 2: ANTECEDENTES

2.1. INDUSTRIA 4.0

Hace pocos años, la industria 4.0 ha tenido avances significativos que ha incluido a los procesos de fabricación, la administración de los datos, ciberseguridad y competitividad, basada en la personalización de los productos y relación con los clientes (Amir Sasson 2016; Ghobakhloo 2018; Mattos Nascimento et al. 2019; Santos, Murmura, and Bravi 2018). La industria 4.0, mejor conocida como la cuarta revolución industrial, nació en Alemania como una propuesta para el desarrollo económico alemán en 2011 (Mosconi 2015; Roblek, Meško, and Krapež 2016). En la Figura 1 se pueden identificar las revoluciones industriales hasta llegar al actual conocimiento tecnológico.

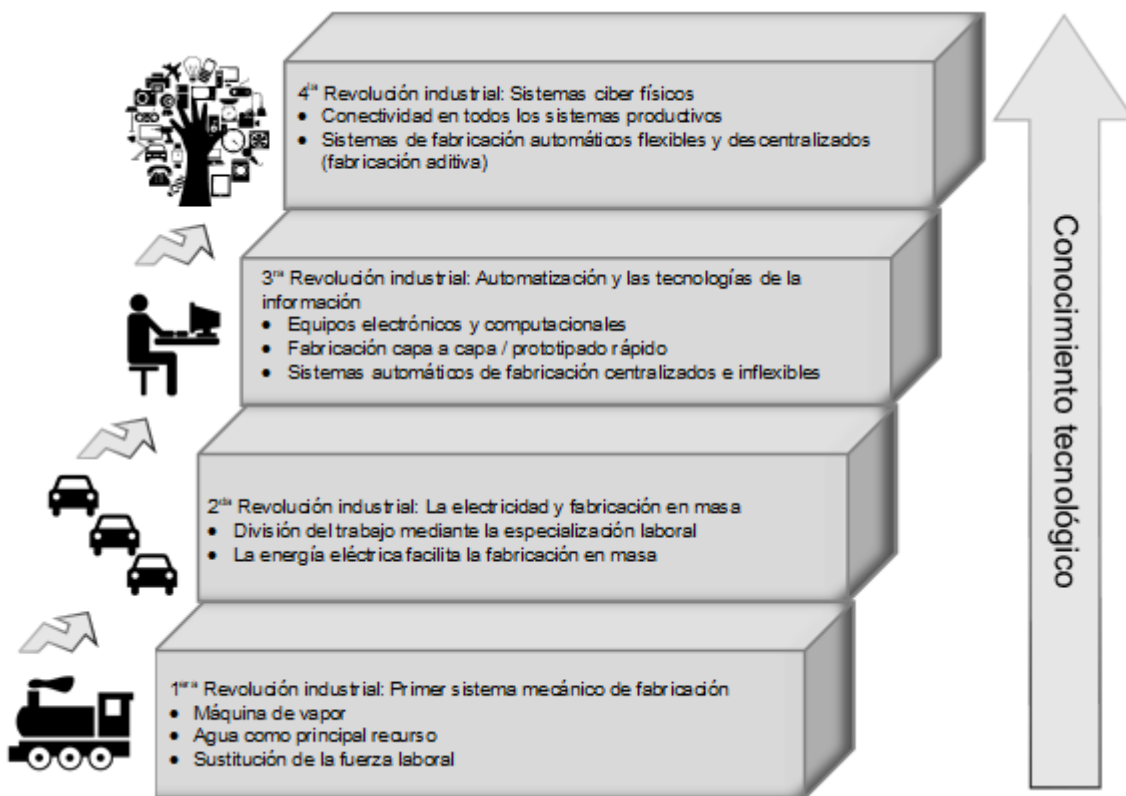


Figura 1. Crecimiento del conocimiento tecnológico alrededor de las revoluciones industriales (Korner et al. 2020)

La industria 4.0 se ha caracterizado por la integración y comunicación de equipos industriales y sistemas ciber físicos para la gestión de las operaciones en tiempo real y para la toma de decisiones oportunas. Entre los facilitadores de esta revolución industrial están los sistemas ciber físicos, el internet de las cosas, la inteligencia artificial, la robótica, la ciberseguridad y la fabricación aditiva (Baheti, Radhakisan; Gill 2011; Manyika, J; Chui, M; Bughin, J; Dobbs, R; Bisson, P; and Marrs 2013). (ver Figura 2)

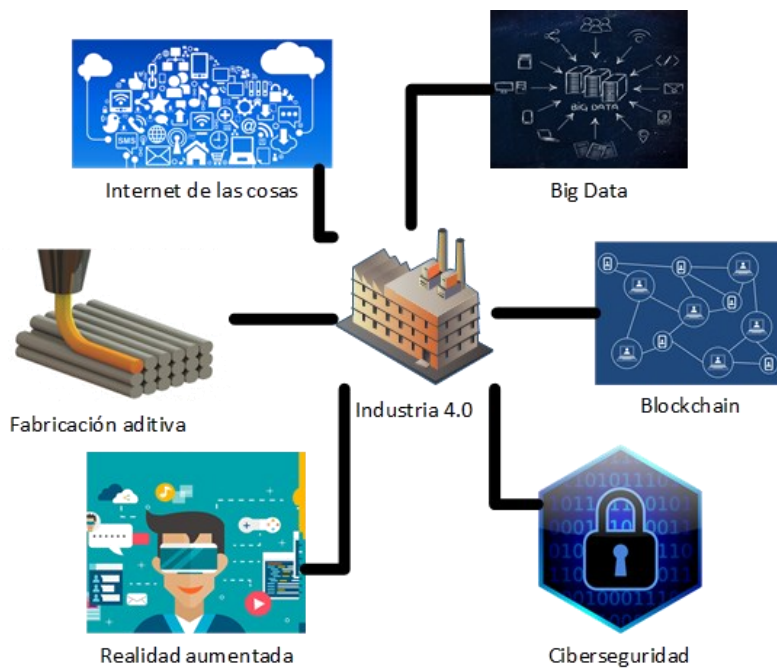


Figura 2. *Facilitadores de la cuarta revolución industrial* (Komer et al. 2020)

Investigaciones recientes establecen que la industria 4.0 ha facilitado avances en temas concernientes a la sostenibilidad, innovaciones empresariales en los sistemas de fabricación, nuevos modelos de negocio y la configuración de las cadenas de suministro y modelos de coste. En lo concerniente a la sostenibilidad, algunos autores aseguran que los facilitadores de la industria 4.0 posibilitan la economía circular (Beatriz et al. 2018; Dev, Shankar, and Hasan 2020; Kamble, Gunasekaran, and Gawankar 2018; Murmura and Bravi 2018). Por medio de la industria 4.0, las empresas pueden utilizar sistemas autónomos de fabricación, tomar decisiones descentralizadas y facilitar la interacción entre colaboradores, máquinas, órdenes, proveedores y clientes (Lasi et al. 2014; Shrouf, Ordieres, and Miragliotta 2014). Nuevos modelos de negocio han surgido gracias a la facilidad en la manipulación de los datos, análisis en tiempo real y toma de decisiones efectiva (Ibarra, Ganzarain, and Igartua 2018; Ren et al. 2016). Por otro lado, adaptaciones a los modelos de coste y a la tradicional cadena de suministro, han sido necesarias debido a los desarrollos tecnológicos que han implicado esta revolución industrial (Ivanov, Dolgui, and Sokolov 2019).

Persiguiendo la competitividad, en esta cuarta revolución industrial, ha llevado a investigadores a profundizar sobre la eficiencia energética de los equipos, la redistribución de los recursos y los equipos inteligentes (Heck, Rogers, and Carroll 2014). El crecimiento de la industria 4.0 está relacionado a la implementación, cada vez más frecuente, de fábricas inteligentes, productos inteligentes, sistemas ciber físicos, ciudades inteligentes y a la sostenibilidad digital (Roblek et al. 2016).

La fabricación aditiva como uno de los facilitadores de esta cuarta revolución industrial, incentiva la personalización, fabricación de piezas con estructuras complejas y otra serie de implicaciones que se desarrollarán a lo largo del trabajo.

2.2. FABRICACIÓN ADITIVA

La FA juega un importante rol en la industria 4.0, tanto en el contexto industrial / empresarial como en la sostenibilidad e innovación. En los últimos 30 años la FA ha evolucionado de prototipado rápido a ser tendencia en fabricación avanzada, durante la tercera revolución industrial (Attaran 2017). En 1987 la Estereolitografía en adelante SLA, fue la primera tecnología en ser comercializada. Luego de la comercialización de varios modelos de SLA en 1991, tres nuevas tecnologías entraron al mercado: FDM, curado del suelo sólido y fabricación de objetos por laminado. Seguido a esto hay varios años de desarrollo de las distintas tecnologías que han pasado desde utilizar resina como materia prima a polvos metálicos; y desde modelos no funcionales a implantes artificiales utilizados en medicina (Wohlers 2014). Hoy en día el foco, sobre la FA, se centra en la implementación en entornos de fabricación (Bogers, Hadar, and Bilberg 2016), la viabilidad económica y financiera de la implementación (Attaran 2017; Rayna and Striukova 2016; Thomas 2016; Urbanic and Saqib 2019; Westerweel, Basten, and van Houtum 2018), el diseño para fabricación aditiva (Thompson et al. 2016) y el desarrollo sostenible de esta tecnología; considerando las implicaciones medioambientales, el ciclo de vida de los productos, la economía circular y la reutilización y reciclaje de material (Chen et al. 2015; Chitrao 2016; Gwamuri et al. 2016).

La FA forma parte del grupo de tecnologías que ha impulsado la 4ta revolución industrial, la industria 4.0. Estas tecnologías facilitan la toma de decisiones y la recopilación de datos en tiempo real (Lu 2017; Shrouf et al. 2014). Algunos autores le dan más importancia a que tan eficaz es la información y como ésta puede utilizarse en la sostenibilidad ambiental (Qin et al. 2020; Turner et al. 2019).

Recientes investigaciones apuntan hacia avances significativos en las tecnologías de FA en términos de las aplicaciones (Blaya et al. 2018; Dias et al. 2014; Santolaria et al. 2013; Sutradhar et al. 2014; Zadpoor 2017), impacto económico (Bogers et al. 2016; Holzmann et al. 2017; Laplume, Anzalone, and Pearce 2016; Rong, Patton, and Chen 2018) y diseño (Miao et al. 2018; Pelanconi et al. 2019; Wu, Clausen, and Sigmund 2017). La necesidad de productos personalizados y de bajo volumen de producción hacen de la FA una alternativa a la producción en masa y economías de escala. Por esta razón y otras se hace imperativo analizar los costes de su implementación en entornos de fabricación tradicional, uno de los pilares tratados en este trabajo.

En comité internacional F42 de la ASTM, y bajo la norma ASTM 52900, se define la FA como el proceso de conectar material a partir de datos de modelos 3D, normalmente capa a capa (ASTM 2022). Totalmente lo opuesto a la fabricación sustractiva, en la FA se deposita material para que capa a capa conformen en su conjunto el modelo 3D solicitado por ordenador.

Esta norma además de definir el término que ha ido variando a lo largo de los años, establece los requisitos, pautas y recomendaciones para utilizar este tipo de tecnologías de impresión, incluido parámetros de diseño.

En la norma se listan los componentes, equipos y procesos para la FA que a continuación se clasificará para los propósitos de esta tesis.

2.3. CLASIFICACIÓN / TECNOLOGÍAS / MATERIALES

Existen un sinnúmero de materiales, algunos orientados específicamente a cada tipo de tecnología FA. Desde materiales termoplásticos con diverso desempeño mecánico, hasta aleaciones que contemplan desde madera, metales, entre otros. En esta sección abordaremos la clasificación de las tecnologías existentes de FA y los diversos materiales y sus características.

La FA se puede clasificar de distintas formas (Yakout, Elbestawi, and Veldhuis 2018):

- por el material base
- por procesos tecnológicos directos o indirectos
- por la conformación física de la materia prima, siendo esta la más utilizada

En la Figura 3 se presenta un resumen de las tecnologías agrupadas por conformación de la materia prima.

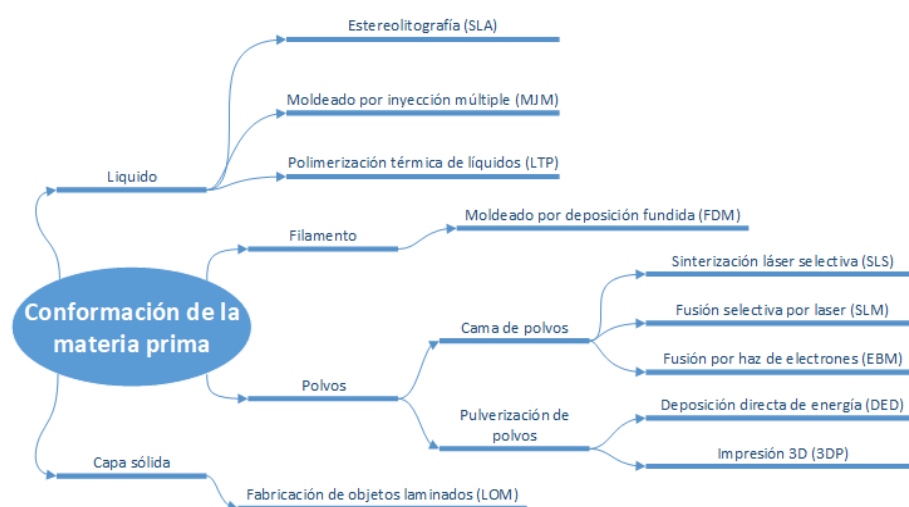


Figura 3. Clasificación de la FA por conformación de la materia prima

Independientemente del estado de la materia prima, la selección de material estará basada en la funcionalidad de la pieza final y en base a los esfuerzos a los que se vé sometida. El rendimiento térmico y el desempeño mecánico juegan un papel fundamental en la selección. A continuación, materiales según su desempeño térmico y mecánico (ver Figura 4).

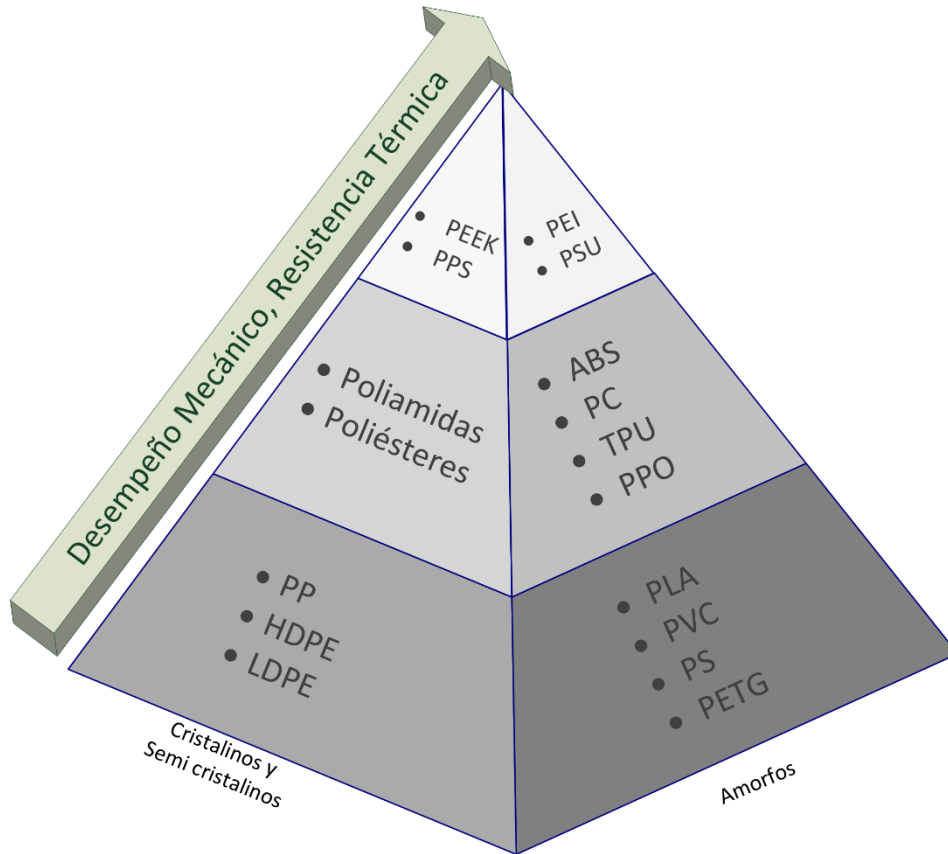


Figura 4. Pirámide de materiales utilizados en la FA según sus características, desempeño y resistencia.

Cada tecnología, bajo el mismo principio, es capaz de generar modelos 3D. Esta investigación se centra en la tecnología FDM.

Existe una gama limitada de materiales termoplásticos que pueden ser utilizados para fabricación con la tecnología FDM. Cada material tiene necesidades térmicas específicas para su deposición, relacionadas con sus propiedades mecánicas. En la Tabla 1 la lista de materiales normalmente utilizados en FDM.

Tabla 1. Materiales utilizados en FDM y sus características

Material	Abreviatura	Prestaciones	Tipo	Control de temperatura	
				Cama	Cámara
Ácido poliláctico	PLA	Commodity	Amorfo		
Polipropileno	PP	Commodity	Semi Cristalino	x	
Policarbonato	PC	Engineering	Amorfo	x	

Material	Abreviatura	Prestaciones	Tipo	Control de temperatura	
				Cama	Cámara
Acrilonitrilo butadieno estireno	ABS	Engineering	Amorfo	x	
Poliésteres	PHA	Engineering	Semi Cristalino	x	
Polieterimida	PEI	High	Amorfo	x	x
Poliéter éter cetona	PEEK	High	Semi Cristalino	x	x

El FDM fue creado por Scott Crump en 1988 y comercializado por Stratasys¹ en 1990 (Graham 2014). El proceso consiste en la extrusión de resina, en forma de filamento, que ha sido calentada a una temperatura justo por encima de su punto de fusión, depositándola capa a capa. El material, una vez extruido, inmediatamente se solidifica. En la Figura 5 los componentes de la tecnología FDM.

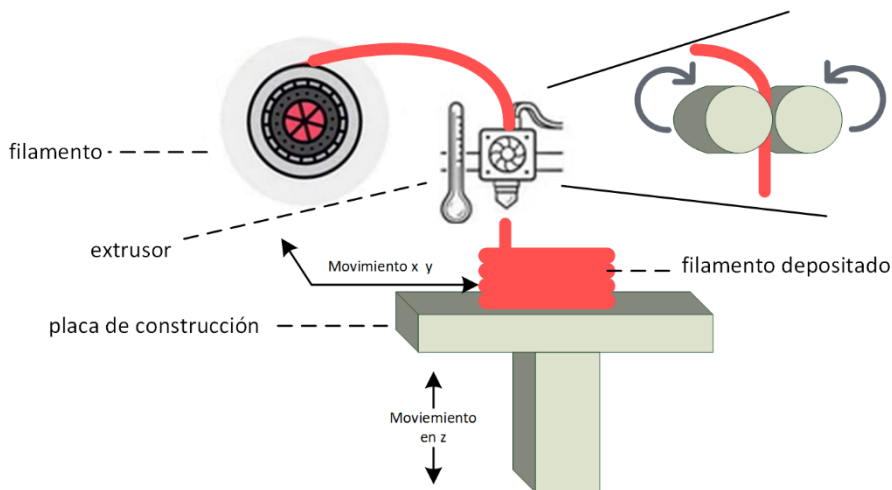


Figura 5. Componentes generales de las máquinas FDM

Los principales componentes de la tecnología FDM son:

- la placa de construcción o cama de impresión donde se deposita el material extruido
- la bobina de filamento que contiene la materia prima que posteriormente será calentada a su punto fusión para ser extruida;
- el cabezal de extrusión, que viene provisto por unos rodillos concéntricos que halan el filamento

¹ Stratasys Ltd., Minneapolis, MN; www.stratasys.com

- un sistema de guías para manipular el movimiento de la cama o del extrusor en los ejes x, y y z.

La tecnología FDM ha avanzado después de la liberación de la patente en los años noventa, además con la investigación y desarrollo, ahora existen máquinas con dos boquillas, con la cama y cámara de impresión calefactadas, entre otras actualizaciones.

2.4. REVISIÓN DE LITERATURA EN MODELOS DE COSTE Y PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD DE LA FA

Para la organización y desarrollo de la revisión sistemática de la literatura y posterior análisis bibliométrico de la presente investigación, la metodología utilizada fue PRISMA (Moher et al. 2009). Los pasos seguidos son:

- 1) Definir las temáticas objetivo de la revisión, en este caso modelos de negocio / coste y sostenibilidad en el contexto de la integración con la industria 4.0.
- 2) Definir las bases de datos bibliométricas a utilizar. Por disponibilidad, acceso e importancia se escogió Web of Science (WOS) y Scopus (Aghaei Chadegani et al. 2013).
- 3) Determinar los términos de búsqueda que más se adecuen a los objetivos de la revisión, en la Figura 6 los términos de búsqueda utilizados en ambas bases de datos.

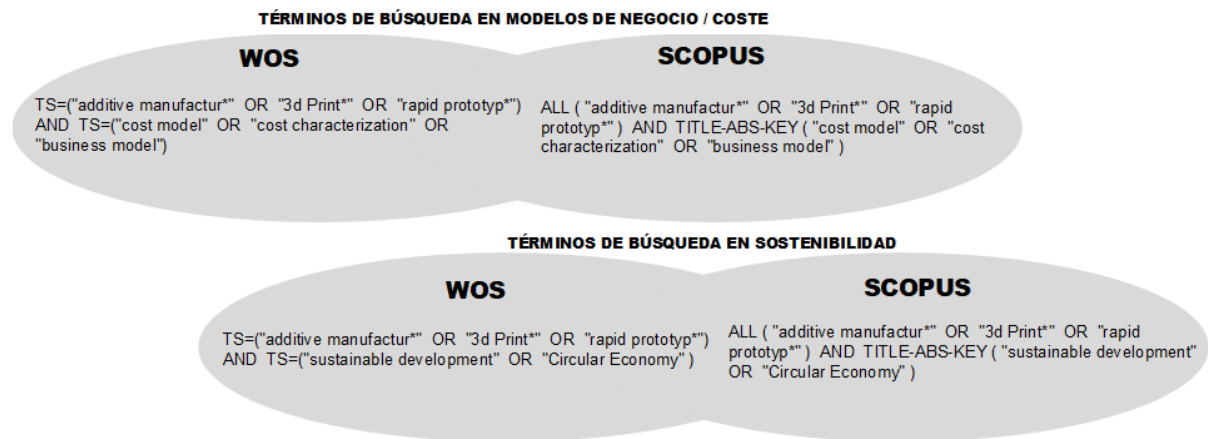


Figura 6. Términos de búsqueda en modelos de negocios / coste y sostenibilidad

- 4) Clasificar los resultados, definir criterios de inclusión.

Los criterios de inclusión (I) definidos a continuación:

- I1. Artículos de revisiones, originales o conferencias
- I2. Artículos sólo en inglés
- I3. Artículos de revistas que estén en el índice Journal Citation Report 2021.

Los artículos resultantes son procesados utilizando el paquete Bibliometrix (Aria and Cuccurullo 2017) de R Studio, para el análisis de los datos bibliométricos y encontrar tendencias entre los resultados.

Después de establecidos los parámetros iniciales de la revisión sistemática, se colocaron los términos de búsqueda en cada base de datos. A continuación, un resumen de los resultados utilizando el PRISMA CHART en la Figura 7.

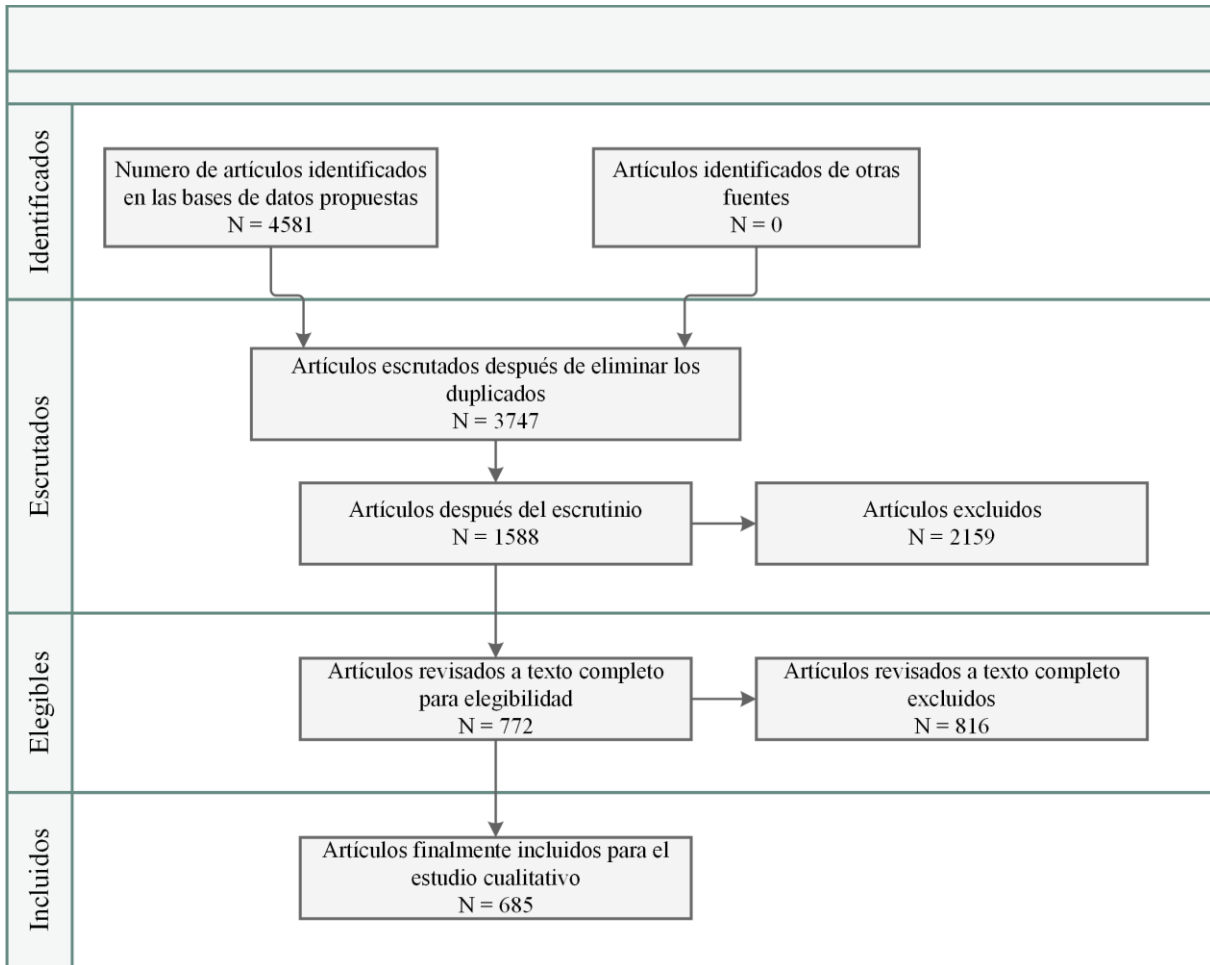


Figura 7. Prisma Chart

Como resultados generales se halló un creciente interés en esta temática de estudio. En las publicaciones por año se identifican, hasta septiembre 2022, una tendencia creciente en los modelos de negocio / coste y sostenibilidad relacionados con la FA. (ver Figura 8)

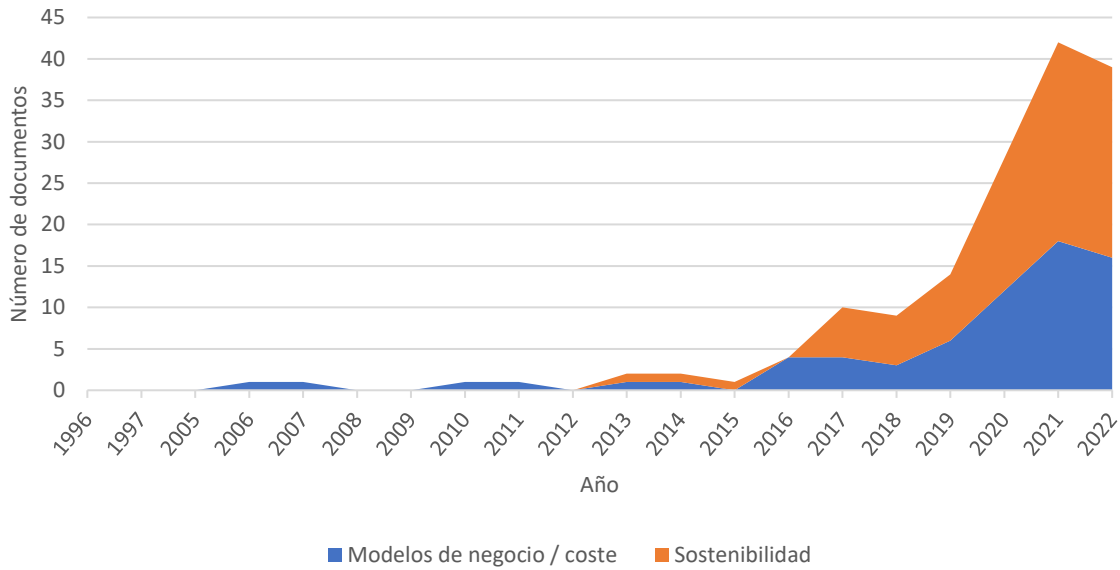


Figura 8. Publicaciones por año

Importante resaltar que la tendencia creciente en ambas temáticas inició en 2015. Sin embargo, en sostenibilidad las publicaciones se detectan a partir de 2013, además muestra un crecimiento mayor en producción científica por año que en modelos de negocio / coste. En 2013 entre algunos de los estudios publicados que están relacionados con sostenibilidad, se puede mencionar el análisis del ciclo de vida de impresoras tipo “open-source” (Wittbrodt et al. 2013) como uno de los más relevantes por cantidad de citas. A continuación, las primeras 20 revistas con más publicaciones relacionadas con los términos de búsqueda en ambas bases de datos. (ver Figura 9)

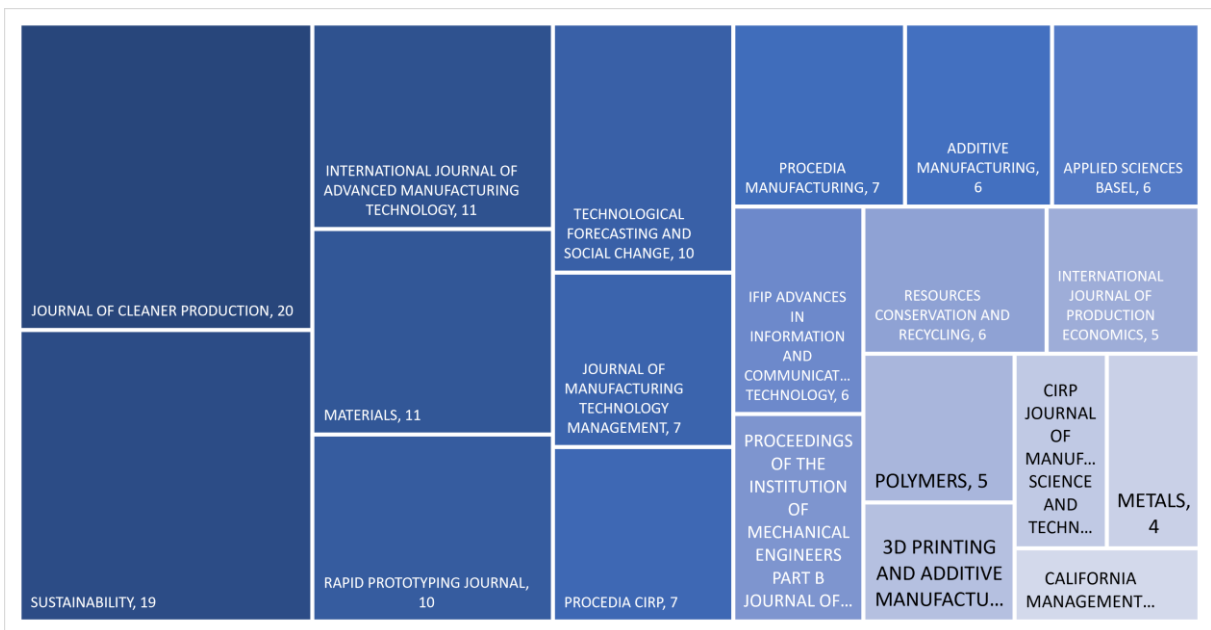


Figura 9. Top 20 revistas en modelos de negocio / coste y sostenibilidad

En temas relacionados a sostenibilidad de la FA las primeras revistas que se ubican en el ranking son Journal of Cleaner Production y Sustainability con 20 y 19 publicaciones respectivamente. Sin embargo, en temas de modelos de negocio / coste están las revistas: International Journal of Advance Manufacturing Technology, Rapid Prototyping y Technological Forecasting and Social Change con 11 publicaciones para la primera, y 10 publicaciones para las dos últimas. A continuación, la lista de las 9 primeras revistas con mayor número de citas por tema (ver Tabla 2).

Tabla 2. Top 9 revistas más citadas por categoría

REVISTAS	MODELO DE NEGOCIO / COSTE	SOSTENIBILIDAD
JOURNAL OF MANUFACTURING TECHNOLOGY MANAGEMENT	✓	✓
PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART B-JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE	✓	
JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION		✓
RAPID PROTOTYPING JOURNAL	✓	
TECHNOLOGICAL FORECASTING AND SOCIAL CHANGE	✓	✓
CALIFORNIA MANAGEMENT REVIEW		✓
INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY	✓	
JOURNAL OF THERMAL SPRAY TECHNOLOGY	✓	
MATERIALS		✓

Las principales palabras clave utilizadas en publicaciones relacionadas con la FA y los modelos de negocio / coste y sostenibilidad están: additive manufacturing como la más utilizada en ambas categorías, seguido por rapid prototyping para modelos de negocio / coste y circular economy para sostenibilidad, y otro a destacar, 3D printing que coincide para ambas categorías. En la Figura 10, el top 20 palabras clave utilizadas en publicaciones relacionadas con el modelo de negocio / coste y sostenibilidad.

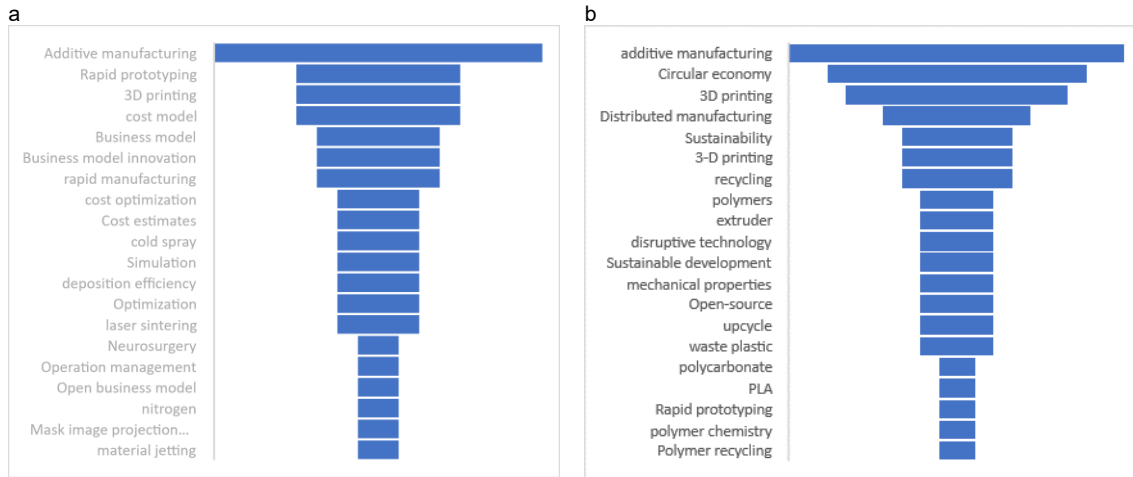


Figura 10. Top 20 palabras clave relacionadas con modelos de negocio / coste (a) y sostenibilidad (b)

Por otro lado, la colaboración entre países es frecuente, como mayor colaborador Estados Unidos, ejecutando investigaciones junto con Canadá, Brasil, Colombia, Francia, Alemania, Irlanda, Italia, entre otros. En la Figura 11 mapa mundial y la colaboración entre países para el desarrollo de investigación en las dos categorías.

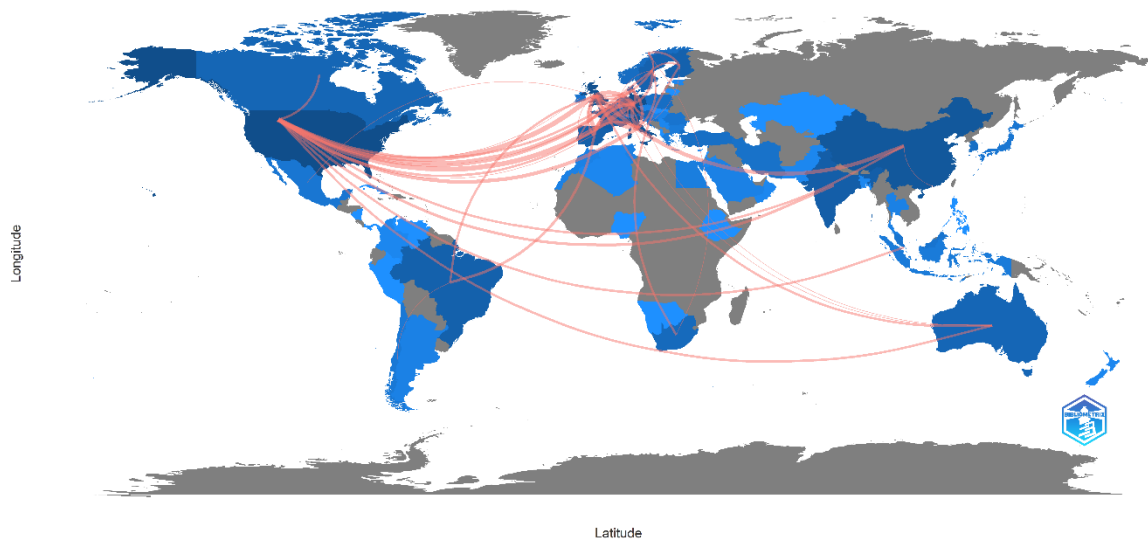


Figura 11. Mapa mundial sobre las relaciones entre países y publicaciones en ambas temáticas.

Después de desarrollar la revisión de la literatura y revisión bibliométrica, además de las tendencias en ambas temáticas, se puede decir que la FA, en el contexto de la industria 4.0, ha sido incluida como una plataforma tecnológica para el desarrollo en diversos ámbitos. Al clasificar los artículos de la revisión de literatura se han podido identificar los ámbitos de aplicación. En esta clasificación de los artículos se ha podido identificar la relación que existe entre la industria 4.0 y la FA; primero, apuntando como un facilitador para la redistribución de la fabricación (Turner et al. 2019); segundo, debido a la libertad en el diseño, fabricación a demanda y personalizada (Ruffo, Tuck, and Hague 2006b, 2007), fabricación a demanda y

personalización de herramientas (Yi et al. 2019); por último, reparación y renovación de piezas metálicas (Knofius, van der Heijden, and Zijm 2019; Rahito, Wahab, and Azman 2019).

Al revisar los artículos relacionados con la sostenibilidad ambiental del proceso y los modelos de negocio / coste de la FA, se observa una relación entre ambas categorías. Algunos modelos de negocio propuestos proponen a la FA como un facilitador del desarrollo sostenible y difusor de la economía circular. Este rol dentro de la industria 4.0 está relacionado con la facilidad de la FA para la creación de productos personalizados, reduciendo costes de fabricación para lotes pequeños o medianos y la facilidad de la tecnología para la reutilización de material reciclado.

2.4.1. MODELOS DE COSTE EN FABRICACIÓN ADITIVA

Un número considerable de modelos de coste han sido desarrollados para distintos tipos de tecnologías de FA. La mayoría relacionada con la tecnología SLS (Atzeni et al. 2010; Fera et al. 2017; Hopkinson and Dickens 2003; Ruffo, Tuck, and Hague 2006a) para materiales termoplásticos, seguido por SLA (Hopkinson and Dickens 2003; Ruffo et al. 2006a; Yang and Li 2018). Además, en cuanto a procesos que involucran la FA de piezas metálicas, han sido considerados modelos de coste para distintas tecnologías. Con respecto a sinterizado laser de metal (DMLS) por sus siglas en inglés y fusión láser de lecho de polvos (LPBF) (Baumers et al. 2016; Colosimo, Cavalli, and Grasso 2019; Di and Yang 2020; Fera et al. 2017; Rickenbacher, Spierings, and Wegener 2013). Finalmente, para FDM se han propuesto modelos de coste utilizando el ABS como material de construcción (Hopkinson and Dickens 2003) y otro propuesto por (Yi et al. 2021). En la Tabla 3 se presenta una lista completa de todos los modelos de coste propuestos con las distintas tecnologías y conformación de la materia prima.

Tabla 3. Modelos de costes propuestos por año, tecnología y conformación de la materia prima

MODELOS DE COSTE CARACTERIZADOS PARA									
AUTORES	AÑO	FDM	SLA	SLS	SLM	EBM	DMLS	LPBF	MATERIA PRIMA
Neil Hopkinson and Phill Dickens	2003	X	X	X					ABS, Epoxi, y Nylon
Massimiliano Ruffo et al.	2006			X					Duraform PA
Ian Campbell	2008		X						No especificado
Eleonora Atzeni et al.	2010			X					PA
Lukas Rickenbacher et al.	2013				X				No especificado
Martin Baumers et al.	2016					X	X		Ti-6Al-4V y 17-4 PH
Marcello Fera	2017		X	X		X			Ti-6Al-4V y 17-4 PH
Yiran Yang and Lin Li	2018		X						LS600 Resina
Bianca Colosimo et al.	2019							X	Cobalt chrome, Stainless steel, y Ti-6Al-4V
Di Lei and Yiran Yang	2020						X		316L, AISI10Mg, y Ti-6Al-4V
Li Yi et al.	2021	X	X						No especificado

A continuación, un resumen de los hallazgos de los principales modelos de coste. La caracterización de costes en el modelo propuesto por Massimiliano Ruffo, uno de los más

relevantes, considera el cálculo de los costes indirectos asociados a la tecnología SLS, como los tiempos de fabricación y los costes directos asociados al material utilizado (Ruffo et al. 2006a). Este modelo es de los primeros en considerar la FA como parte de un entorno de fabricación para la producción de lotes pequeños y medianos. Posteriormente, los autores ajustaron el modelo para varios escenarios de producción de una misma pieza (Ruffo and Hague 2007).

La mayoría de los modelos de coste propuestos se han basado en la caracterización propuesta por Hopkinson y Dickens (2003). El modelo de coste propuesto por Hopkinson y Dickens fue diseñado principalmente para comparar los costes de fabricación en serie de la misma pieza utilizando SLA, FDM, SLS y moldeo por inyección.

El modelo de coste propuesto por Atzeni et al. (2010), al igual que el estudio de Hopkinson, compara la FA con el moldeo por inyección e introduce el concepto de diseño para fabricación aditiva. Ingole et al. (2011) continuó en los mismos pasos de los anteriores autores, sólo que además consideró otras limitaciones del proceso como los costes totales de preparación. Costes relacionados a la preparación del equipo y del tratamiento a los materiales que se utilizarán en el proceso de impresión. En una primera aproximación, Dilip Ingole determinó los parámetros particulares y orientación óptima de las piezas, para la determinación del coste de producir utilizando la tecnología FDM.

En cuanto a FA de metales, Baumers et al. (2013) desarrolla un modelo de coste basado en el consumo energético y en previo estudio de Alexander, Allen, and Dutta (1998). Estos modelos están caracterizados para la tecnología SLM e incluyen todos los pasos requeridos en el pre o post proceso, además de considerar la orientación de la pieza.

Por otro lado y entre los más recientes, Yang and Li (2018) propone un modelo de costes tomando en cuenta piezas complejas y fabricación simultánea utilizando SLA. Además, establece un problema de optimización del coste tomando en cuenta variables como la altura de capa, el ángulo de voladizo y acabado superficial.

La mayoría de los autores han establecido los modelos de coste utilizando polímeros posiblemente por la facilidad de comparar con otros métodos tradicionales de fabricación como el moldeo por inyección. En la Tabla 4 los principales trabajos en caracterización de coste por tecnología y contribución.

Tabla 4. Modelos de coste más relevantes, sus contribuciones y tecnologías

AUTORES	CONTRIBUCIÓN / SUPUESTOS	TECNOLOGÍA FA
Neil Hopkinson and Phill Dickens	Modelo de coste para comparar FA con moldeo por inyección. Costes incluidos: maquinaria, laboral y material. Se asume un año de producción continua de la misma pieza.	SLA FDM SLS
Massimiliano Ruffo et al.	Costes basados en el coste de ciclo de vida, coste objetivo y full costing. Los autores asumen 100 horas por semana de Trabajo de la máquina y 50 semanas por año.	SLS
Ian Campbell	Estimador de tiempo de fabricación basado en esquema 2D antes de la creación del archivo STL. Estimador para generar cotización y tiempos de una sola pieza.	SLA
Eleonora Atzeni et al.	Caracterización de costes de FA basada en los elementos de coste del moldeo por inyección. Se utiliza un diseño de una pieza que pueda ser fabricada por moldeo por inyección y FA.	SLS
Lukas Rickenbacher et al.	Modelo de coste para estimar el coste de diversas formas de pieza al mismo tiempo. Este modelo considera el pre y el post proceso de la FA.	SLM
Martin Baumers et al.	Modelo de medición de la estructura de costes adaptado del modelo de coste propuesto por Ruffo and Hague, (2007). La materia prima y el consume energético son considerados costes directos para su evaluación en dos tecnologías de FA.	EBM Sinterizado laser directo en metal (DMLS)
Marcello Fera et al.	Evaluación de costes de tecnologías FA integradas en un proceso genérico de fabricación. Los cinco pasos establecidos en este proceso genérico son: preparación, trabajo de diseño, preparación, construcción y remoción.	SLA SLS EBM
Yiran Yang and Lin Li	Modelo de coste para evaluar el desempeño de la fabricación simultánea de piezas de geometrías mixtas y no mixtas. Se asume para varias geometrías la distribución no uniforme del coste energético y establecimiento de algunas constantes para la formulación de un problema de optimización.	Proyección en máscara de imagen SLA

Los modelos de coste propuestos por Hopkinson, Ruffo, Rickenbacher y Baumers no consideraron los costes operacionales en un entorno de fabricación. Por otro lado, Atzeni, Fera y Yang sí consideran algunos costes operacionales de la implementación de la tecnología en el entorno de fabricación.

La caracterización de los bloques de coste necesarios es importante para hacer una valoración objetiva de los costes de la FA en entornos de fabricación tradicional.

2.4.2. PARÁMETROS DE SOSTENIBILIDAD DE LA FABRICACIÓN ADITIVA

Sobre los hallazgos de la revisión de literatura, en cuanto al desarrollo de la sostenibilidad de la FA, es posible clasificarlos en: sostenibilidad del proceso, creación y/o uso de materias primas a partir de material reciclado y creación de tecnologías sostenibles. Después de analizar los documentos seleccionados se halló que al menos el 52% están relacionados a la categoría sostenibilidad del proceso, el 29% a la creación de tecnologías sostenibles y el 19% restante al uso de materias primas a partir de material reciclado.

La FA como una tecnología relativamente nueva o en desarrollo, tiene un gran potencial en la reducción de los costes de producción debido a la personalización de productos y podría llegar a reducir las emisiones de CO₂ relacionadas a la actividad industrial (Gebler, Uiterkamp, and Visser 2014).

Con respecto a la sostenibilidad ambiental de la FA, en los últimos años las investigaciones se han centrado en reutilizar o reciclado de material como materia prima del proceso FA. Además, en la implementación de modelos sostenibles como la economía circular, entre otros movimientos sociales para la reducción de las emisiones industriales de CO₂.

La economía circular, en adelante EC, se basa en un concepto filosófico de la creación de un esquema que incluye la regeneración de los sistemas naturales, el mantenimiento de los materiales en uso y el diseño de producto minimizando los residuos y la contaminación (The Ellen MacArthur Foundation 2022). Algunos autores aseguran que la FA es un facilitador de la EC y ven su potencial relacionado con:

- diseño de productos (Sauerwein et al. 2019)
- en el desarrollo de modelos de negocios que faciliten la incorporación de la EC en el contexto de la industria 4.0 (Nascimento et al. 2019)
- utilización de plástico reciclado en la FA para potenciar la EC (Byard et al. 2019; Zhong y Pearce 2018)
- reparación y rehabilitación de piezas metálicas (Leino, Pekkarinen, and Soukka 2016)

En la Tabla 5 una sinopsis de los materiales considerados para reciclaje y reutilización de materia prima en FA por autor.

Tabla 5. Materiales reciclados utilizados para FA

AUTOR (ES)	MATERIAL	UTILIZADO EN	APLICACIÓN
Kuchеров et al. (2017)	Polietileno-2,5-furandicarboxilato rojo derivado de la biomasa (PEF)	Materia prima para tecnología FDM	Mejores propiedades que los materiales disponibles para FDM. Alta estabilidad térmica y menor temperatura necesaria para la extrusión.
(Woern et al. (2018)	Ácido poliláctico (PLA) virgen, acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), tereftalato de polietileno (PET) y polipropileno (PP)	Fabricación de partículas fusionadas Gigabot X	Comprobar el uso de una amplia gama de materiales poliméricos reciclados con un mínimo de post proceso.
Paciorek-Sadowska, Borowicz, and Isbrandt (2019)	Ecopolímero a base de poliláctida (PLA)	Reciclaje de los residuos de la FA	Los autores proponen este método para la gestión rápida, barata y ecológica de los residuos poliláctidos con posible reutilización.
Reich et al. (2019)	Policarbonato reciclado	Comprobar rigidez y propiedades mecánicas	Material extruido para FDM

Las investigaciones relacionadas a la sostenibilidad del proceso se han centrado en:

- el análisis del ciclo de vida de las piezas fabricadas con tecnologías de FA y consideraciones del consumo energético (Kamps et al. 2018; Qin et al. 2020; Tang, Mak, and Zhao 2016b; Xu et al. 2020; Yang et al. 2017, 2019)
- impacto ambiental y económico (Bours et al. 2017; Priarone et al. 2019)
- rehabilitación de piezas metálicas (Rahito et al. 2019; Saboori et al. 2019; Turner et al. 2019)

En la Tabla 6 se muestra un compendio de los principales aportes en la literatura relacionados a la sostenibilidad del proceso de FA y las tecnologías en las que ha sido aplicada.

Tabla 6. Principales hallazgos en la literatura sobre sostenibilidad ambiental y tecnologías FA

AUTOR (ES)	CONTRIBUCIÓN	TECNOLOGÍA	APLICACIÓN
Qin et al. (2020)	Predictor del consumo energético	SLS	Deep learning-driven particle swarm optimization (DLD-PSO) utilizado para optimizar el consumo energético.
Xu et al. (2020)	Optimización de la eficiencia energética	FDM	Optimización energética de la FA basada en Adaptive Multi-layer Customization (AMC) teniendo en cuenta el material y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).
Priarone et al. (2019)	Marco para los casos en los que la FA puede sustituir el mecanizado	Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM)	Marco que considera el coste, tiempos de fabricación, la demanda de energía y la huella de carbono para los casos en que el mecanizado puede ser sustituido por la FA.
Saboori et al. (2019)	Reparación y restauración de piezas metálicas	Direct Energy Deposition	En la industria aeroespacial y automoción.
Turner et al. (2019)	Implementación de la FA en la cadena de suministros	En general	Redistribución de la fabricación para cerrar el bucle entre el cliente y las fábricas.
Yang and Zhao (2018)	Diseño orientado al montaje y consolidación de piezas	SLM	Análisis del ciclo de vida para el análisis del rendimiento medioambiental de las operaciones de ensamblaje y consolidación de piezas utilizando FA.
Kamps et al. (2018)	Fabricación de engranajes	LBM	Evaluación del ciclo de vida de la implementación de la FA en las empresas de fabricación de engranajes, teniendo en cuenta el coste y la eficiencia energética.
Bours et al. (2017)	Evaluación de la materia prima	FDM PBF	Evaluación del ciclo de vida de la selección de materiales e impacto medioambiental.
Yang and Li (2018)	Predictor del consumo energético	SLA	Modelo matemático para el cálculo del consumo energético, considerando diferentes parámetros y su potencial interacción.

AUTOR (ES)	CONTRIBUCIÓN	TECNOLOGÍA	APPLICACIÓN
Verma and Rai (2017)	Consumo energético y material de desperdicio	SLS	Análisis de sostenibilidad y optimización de los parámetros de impresión
Priarone and Ingarao (2017)	Consumo energético y emisiones de CO ₂	SLM EBM	Analizar si la combinación de los procesos de mecanizado y FA disminuye la demanda de energía y las emisiones de CO ₂ .
Tang, Mak, and Zhao (2016a)	Diseño, energía y material utilizado	Binder Jetting	Comparación del impacto medioambiental entre el mecanizado y la tecnología FA seleccionada.
Junior, Oliveira Sant'Anna, and Machado (2014)	Priorización de las tecnologías de FA sostenibles	SLS FDM	Matriz propuesta para considerar las características medioambientales y sostenibles en el diseño de una pieza.

Para la industria 4.0, los estudios en la sostenibilidad de la FA proporcionan una oportunidad para adaptarse a un modelo de fabricación ambientalmente más sostenible, a pesar de los costes de implementación de esta tecnología en un entorno de fabricación tradicional.

2.5. CONSIDERACIONES FINALES

La FA forma parte del desarrollo tecnológico que enmarcan las tecnologías de la industria 4.0. Tecnología que marca un hito no sólo en la industria de fabricación, sino también en varios eslabones de la cadena de suministro.

Una vez revisados los documentos seleccionados después de una selección minuciosa y sistemática de la literatura, fue posible identificar la brecha que existe en la caracterización de costes y parámetros de sostenibilidad que existe en la FA y se puede concluir:

La fortaleza de la FA, dentro de la industria 4.0, es la orientación de esta tecnología a crear sistemas de fabricación flexibles y descentralizados y que además permita estar conectada con los demás sistemas productivos. Esta conectividad permite el control y seguimiento de los parámetros de fabricación para hacer un proceso de fabricación sostenible desde la dimensión productiva y ambiental.

En la literatura ha sido posible identificar distintas tecnologías de fabricación aditiva y clasificaciones, sin embargo, de todas las tecnologías la FDM resalta como una de las más fáciles de implementar en un entorno de fabricación tradicional y en la que se identifican algunos tipos de materiales, tanto de bajo desempeño mecánico, como de altas prestaciones.

Se han detectado diversos modelos buscando establecer el coste de este proceso para distintos tipos de tecnología de FA, de los cuales sólo dos han sido desarrollados para FDM en particular. Sin embargo, ninguno ha tomado en consideración algunos factores como la

energía invertida en el proceso o el desperdicio producido en el proceso de impresión considerando los defectos de fabricación.

En lo que respecta a la sostenibilidad del proceso se han identificado tres líneas de actuación particulares: una orientada hacia la sostenibilidad del proceso de fabricación, otra orientada a la creación de tecnologías sostenibles y compatibles con sistemas tradicionales de producción y, por último, la reutilización de material o utilización de material reciclado.

En cuanto a la sostenibilidad ambiental del proceso de FA, se han realizado análisis comparativos del consumo energético entre las distintas tecnologías e incluso algunos autores proponen la comparativa de las diversas tecnologías de la FA con eco indicadores. Sin embargo, hasta el momento no se ha llegado a proponer un método de cálculo teórico de las emisiones de una pieza a partir de su modelo digital.

Es importante resaltar el papel de la FA en la cadena de suministro y su efecto en algunos eslabones clave como lo son la fabricación, la distribución y el aprovisionamiento. Al obtener el coste y las emisiones de la FA es posible comparar su efecto con una cadena tradicional y ayudar a los tomadores de decisiones sobre la factibilidad de su implementación.

CAPÍTULO 3:

CARACTERIZACIÓN DE COSTES EN LA FABRICACIÓN ADITIVA Y PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DEL PROCESO

CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DE COSTES EN LA FABRICACIÓN ADITIVA Y PARAMETROS DE SOSTENIBILIDAD PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DEL PROCESO

3.1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

El proceso genérico de cualquier tecnología FA, empieza en el diseño o adaptación de una figura para ser impresa en la tecnología seleccionada. Seguidamente, se genera un archivo OBJ o STL adaptado al equipo que materializará el modelo 3D. Por último, una vez se selecciona el material a utilizar y/o las necesidades de la pieza final se programa el equipo para imprimir de acuerdo con estas necesidades para luego extraerlo de la bandeja de impresión. En algunos casos, y dependiendo de las necesidades de la pieza final, la pieza pasa por un post proceso donde se le da el acabado final. Para este estudio se ha seleccionado la tecnología FDM y el flujograma del proceso particular se detalla a continuación. (Figura 12)

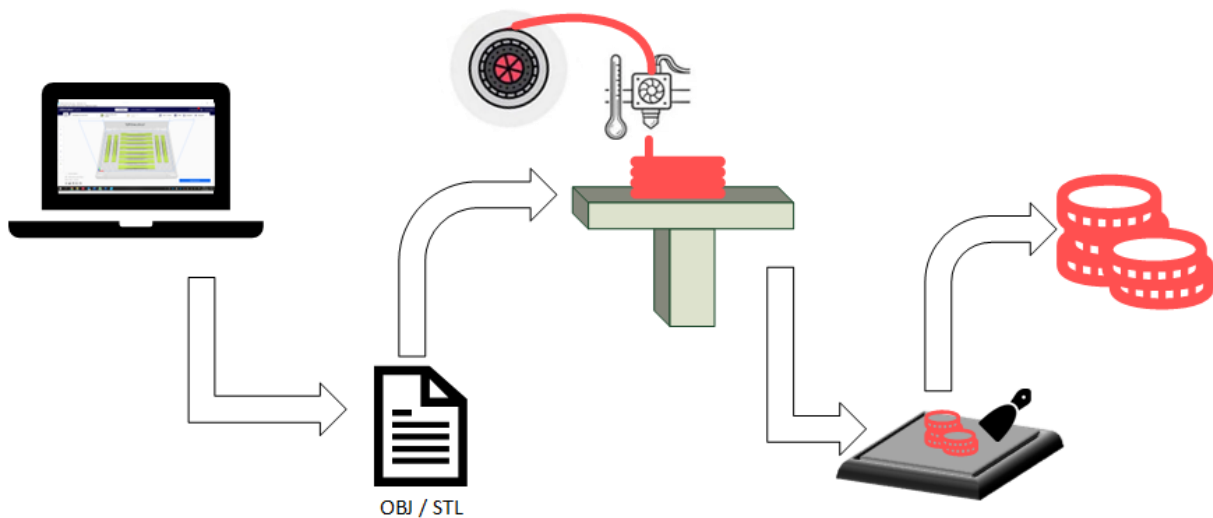


Figura 12. Descripción gráfica del proceso de impresión con tecnología FDM

A continuación, una descripción detallada del proceso de impresión de la tecnología FDM.

La materia prima para esta tecnología son filamentos termoplásticos, aunque en los últimos años se han realizado combinaciones de material como, por ejemplo, madera y algunos metales, que al combinarse con los termoplásticos permiten la adhesión capa a capa y ofrecen otras características que por sí solas no tienen los materiales termoplásticos.

Una vez conocida la materia prima y definida la temperatura a utilizar se programa el equipo FDM para que la boquilla se caliente a esta temperatura y permita fluir el material. El sistema de extrusión está conformado por un sistema de empuje y una boquilla. El sistema de empuje puede ser directo o tipo Bowden (ver Figura 13)

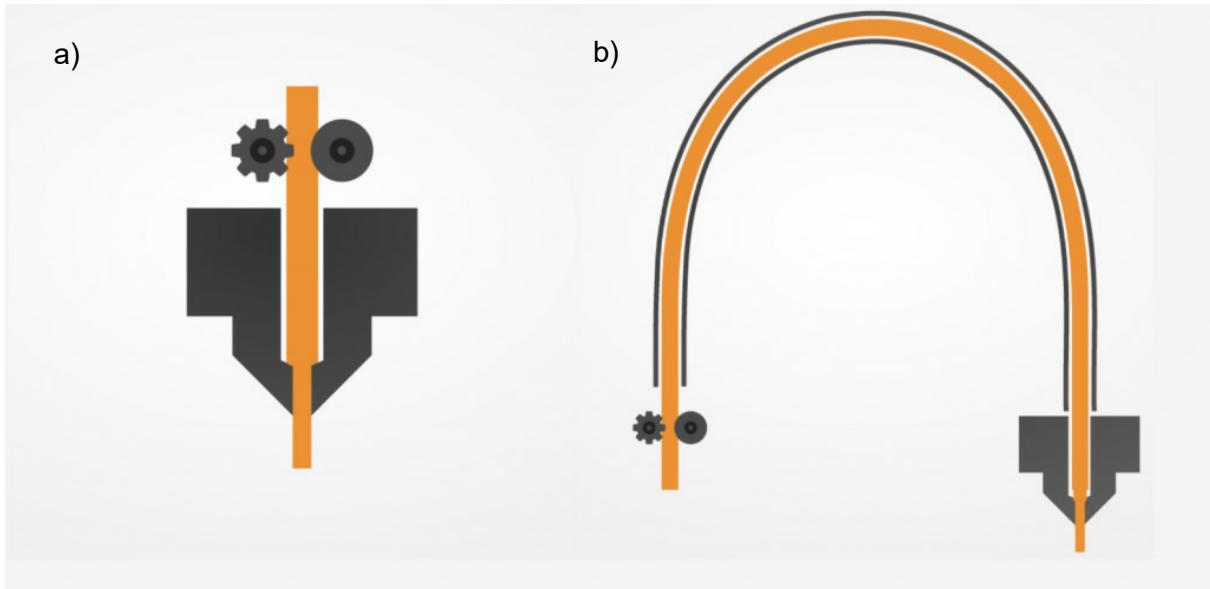


Figura 13. Sistema de empuje directo (a) y Bowden (b) para impresión utilizando filamentos.

El sistema de extrusión directa incluye un sistema de rodillos cerca de la boquilla justo en la parte móvil que empuja el filamento, luego de ser calentado en la boquilla, para ser extruido (Figura 13a). Mientras que el sistema de extrusión Bowden mantiene el sistema de dos rodillos, que empujan el filamento, fijo en alguna de las paredes o columna de la impresora, lejos de las partes móviles. Un tubo normalmente de PTFE (teflón) es el que guía el filamento hacia la boquilla que calienta el filamento a una temperatura para ser extruido (Figura 13b).

El material extruido es depositado siguiendo un patrón capa a capa, este patrón se forma con el movimiento de servomotores que provocan movimientos exactos en los ejes X, Y y Z. Este patrón ha sido configurado anteriormente utilizando un lenguaje de programación conocido como G-code que proporciona instrucciones a los servomotores para programar su trayectoria en las tres dimensiones.

El material se deposita en una bandeja de impresión de un material que permita desprender la pieza fabricada con facilidad. La bandeja de impresión puede estar cubierta por una capa rígida o flexible que facilita la separación de la pieza y la bandeja para pasar al post proceso.

Para el modelo de coste propuesto y de cálculo de huella de carbono, se ha seleccionado sólo el proceso de fabricación de la pieza. En otras palabras, tanto la fase de diseño, creación del

archivo OBJ o STL y postproceso, no se han considerado para estos modelos propuestos y sus respectivas validaciones.

A continuación, la estructura general y bloques de coste de la FA utilizando la tecnología FDM.

3.1.1. ESTRUCTURA GENERAL DE COSTES

El modelo de coste propuesto está particularizado en la tecnología FDM. Sin embargo, es posible extrapolar las bases de la investigación en la que se ha generado para otras tecnologías de FA después de algunas adaptaciones, pero para una mejor comprensión y validación del modelo se ha escogido la tecnología FDM. Además, la tecnología FDM ofrece una variedad de materiales y tecnologías para la deposición de filamento muy diversa.

A continuación, se indican los métodos de estimación de coste que se han utilizado (Hansen, Mowen, and Heitger 2021; Roy and Harrington 2003):

- Método de estimación basado en parámetros
- Definición de costes basado en las características del proceso
- Costes por actividad

El modelo que se propone en esta investigación diferencia dos tipos de coste: costes directos y costes indirectos. En base a la revisión de literatura, ya expuesto en el capítulo II, y el profundo estudio que se ha realizado de todas las actividades que se incluyen en la fabricación de un producto utilizando la tecnología FDM, se proponen los siguientes bloques de coste en el ámbito de costes directos:

- Material
- Mano de obra directa
- Costes relacionados con la operativa de la impresora

Por otro lado, y considerando un sistema de producción donde sólo intervenga una sola impresora, los costes indirectos son los relacionados con la infraestructura y los gastos administrativos a nivel de producción. A continuación, se muestra una estructura de descomposición de tres niveles (ver Figura 14)

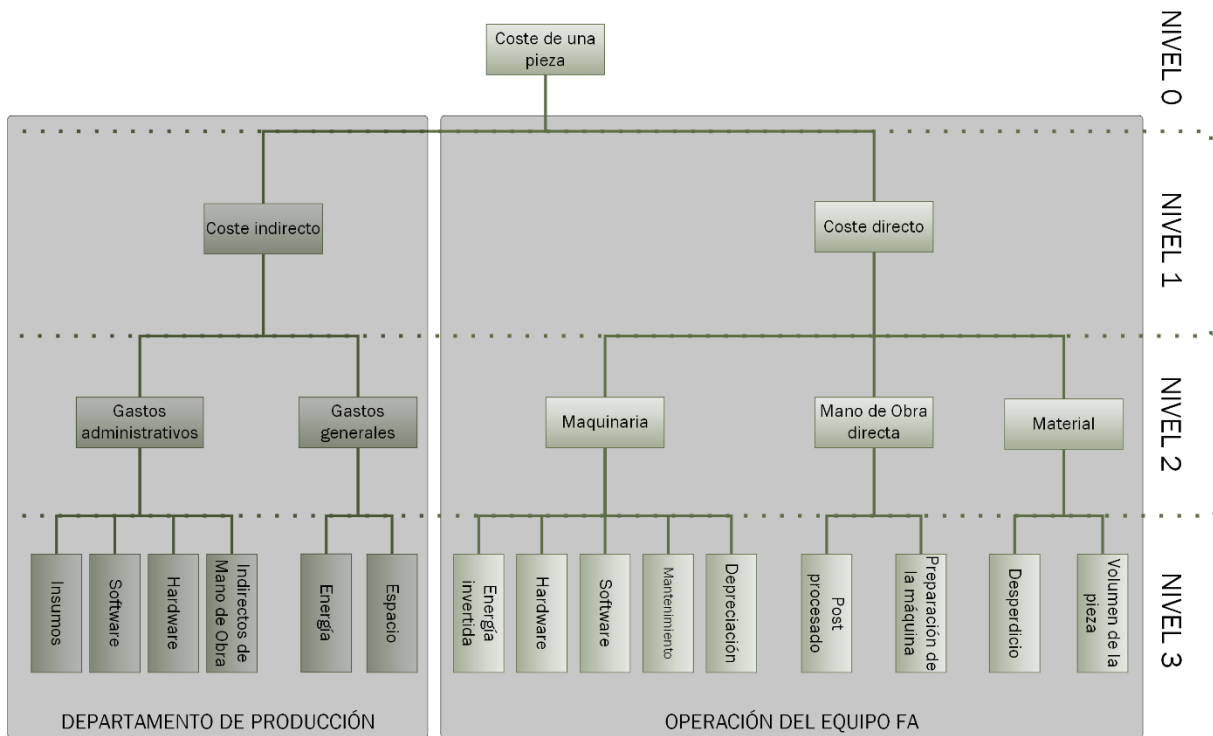


Figura 14. Estructura de desglose de costes

En esta tesis doctoral se ha caracterizado el modelo centrado en la parte directa del coste de fabricación. Los costes directos son los que tienen mayor influencia en el proceso de fabricación.

3.1.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS BLOQUES DE COSTE

Los costes han sido articulados siguiendo la estructura de desglose de costes presentado en la sección 3.1.1. de la siguiente forma. Además, el modelo de coste ha sido diseñado para series cortas de una o varias referencias impresas simultáneamente, considerando el área y volumen disponibles, utilizando la tecnología FDM.

El coste total (C_T) de fabricar una pieza utilizando FDM (Ecuación 1)

$$C_T = C_{directo}(\text{€}) + C_{indirecto}(\text{€}) \quad \text{Ecuación 1}$$

$C_{indirecto}$ es igual a la suma de los gastos administrativos generales y de producción no contemplados en este estudio, habitualmente considerado un porcentaje de los costes directos (Rogozhin et al. 2010).

Los costes directos considerados para este modelo son el coste de material ($C_{material}$), el coste de mano de obra ($C_{mano\ de\ obra}$) y el coste del equipo de impresión (C_{equipo}). $C_{directo}$ es igual al sumatorio de los costes directos (Ecuación 2).

$$C_{directo} = C_{material} \left(\frac{\text{€}}{\text{pieza}} \right) + C_{mano\ de\ obra} \left(\frac{\text{€}}{\text{pieza}} \right) + C_{equipo} \left(\frac{\text{€}}{\text{pieza}} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

El alcance del coste de material va desde el coste del filamento por kilogramo empacado normalmente en un carrete, como usualmente es comercializado; hasta el probable coste de fallos por volumen de material impreso.

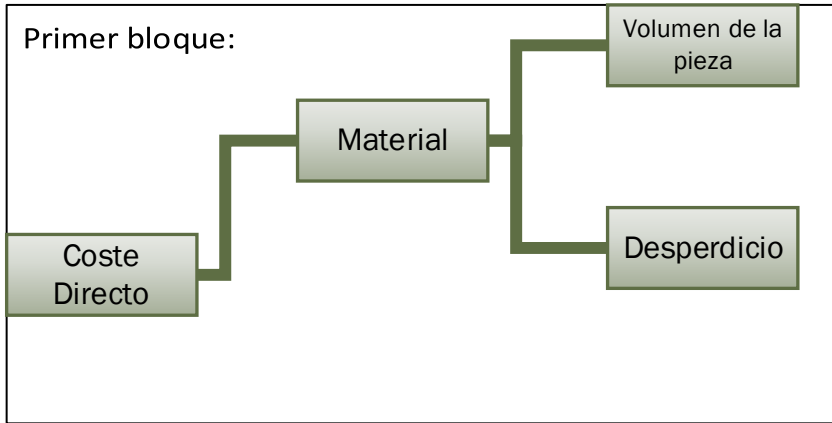


Figura 15. Descripción gráfica del primer bloque de costes, $C_{material}$.

El primer bloque del $C_{directo}$, es $C_{material}$ que incluye el coste del material utilizado (C_{vol_mat}) en el proceso de extrusión y la suma de las probabilidades de las ocurrencias de fallos durante la fabricación ($C_{P(fallos)}$) por volumen del fallo. (ver Figura 15). La Ecuación 3 describe la forma de cálculo del $C_{material}$.

$$C_{material} = C_{vol_mat} \left(\frac{\text{€}}{\text{pieza}} \right) + C_{P(fallos)} \left(\frac{\text{€}}{\text{pieza}} \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

El coste por volumen de material (C_{vol_mat}) contempla los costes de aprovisionamiento del material, que incluye el coste de adquisición y todo lo necesario para que esté disponible para la impresora. La Ecuación 4 describe la forma de cálculo y las unidades utilizadas.

$$C_{vol_mat} = \frac{\text{Kg}}{\text{pieza}} * \frac{\text{€}}{\text{Kg}} = \left(\frac{\text{€}}{\text{pieza}} \right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Los costes por desperdicios ($C_{P(fallos)}$) se han calculado en función de la probabilidad de las ocurrencias de fallos relacionadas al ángulo de voladizo (*overhang*) y/o al levantamiento o deformación de la pieza (*warping*). Para la probabilidad de ocurrencia de fallos relacionados con el ángulo de voladizo, se ha tomado como referencia el estudio de Wang, Gao, and Kang (2018). Y para el levantamiento de la pieza o *warping* se ha tomado como referencia el estudio de Saluja, Xie, and Fayazbakhsh (2020). Ambos eventos en una impresión se han considerado mutuamente excluyentes por esta razón se suma la probabilidad de ocurrencia de ambos eventos. Esta probabilidad se multiplica por el impacto, en otras palabras, por los Kg de material perdido por el fallo. En la Ecuación 5 el cálculo de este componente del coste de material.

$$C_{P(fallos)} = P(fallos) * Kg/pieza * \text{€}/Kg = (\text{€}/pieza) \quad \text{Ecuación 5}$$

El coste por desperdicios se podría interpretar como la exposición al riesgo de imprimir con esta tecnología y si es un coste de oportunidad asumible.

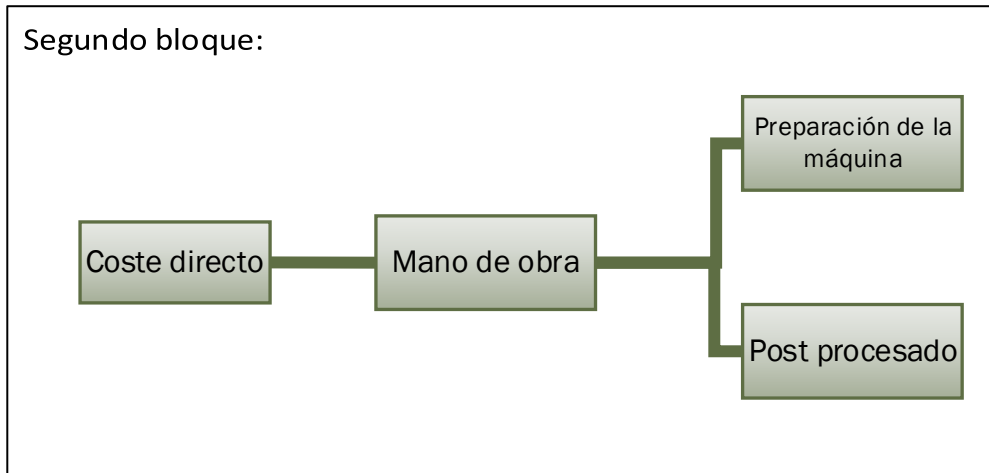


Figura 16. Descripción gráfica del segundo bloque de costes, $C_{\text{mano de obra}}$.

El segundo elemento del C_{directo} es el $C_{\text{mano de obra}}$ que incluye los costes de mano de obra del personal implicado en el proceso de fabricación, la preparación de la máquina y la extracción de la pieza de la bandeja de impresión (ver Figura 16). Tomando en consideración el tiempo de dedicación a la preparación de la máquina, del archivo STL² y la extracción de la pieza de la bandeja, el coste por hora del colaborador y el tamaño del lote. En la Ecuación 6 se describe la forma de cálculo del $C_{\text{mano de obra}}$.

$$C_{\text{mano de obra}} = \frac{\text{coste / hora} * t_{\text{dedicación}}}{\text{tamaño de lote}} (\text{€}/\text{pieza}) \quad \text{Ecuación 6}$$

El $t_{\text{dedicación}}$ es el tiempo que dedica el operario en horas para la preparación de la máquina, el archivo para la impresión y la extracción de la pieza, multiplicado por el coste por hora.

En el postproceso de la pieza sólo se incluyen los tiempos del operador dedicados a la extracción de la pieza y remoción de la estructura de soporte, si es necesario.

Como alternativa para el cálculo del $C_{\text{mano de obra}}$ se puede considerar un índice de dedicación del operario a la preparación y postproceso del mismo lote (Ecuación 7).

$$I_D = \frac{t_{\text{preparación}}(\text{horas/bandeja}) + t_{\text{post proceso}}(\text{horas/bandeja}) * \# \text{ de bandejas/lote}}{n^{\circ} \text{ horas disponibles}} \quad \text{Ecuación 7}$$

² Formato de archivo que se usa con frecuencia para la impresión 3D y el diseño asistido por computadora. Las siglas significan estereolitografía en inglés.

En algunos casos el operario dedicado a las operaciones de soporte a la FA puede que incluya en sus labores diarias, labores de ensamblado siempre y cuando el lote lo requiera. Para este modelo este tiempo no fue considerado.

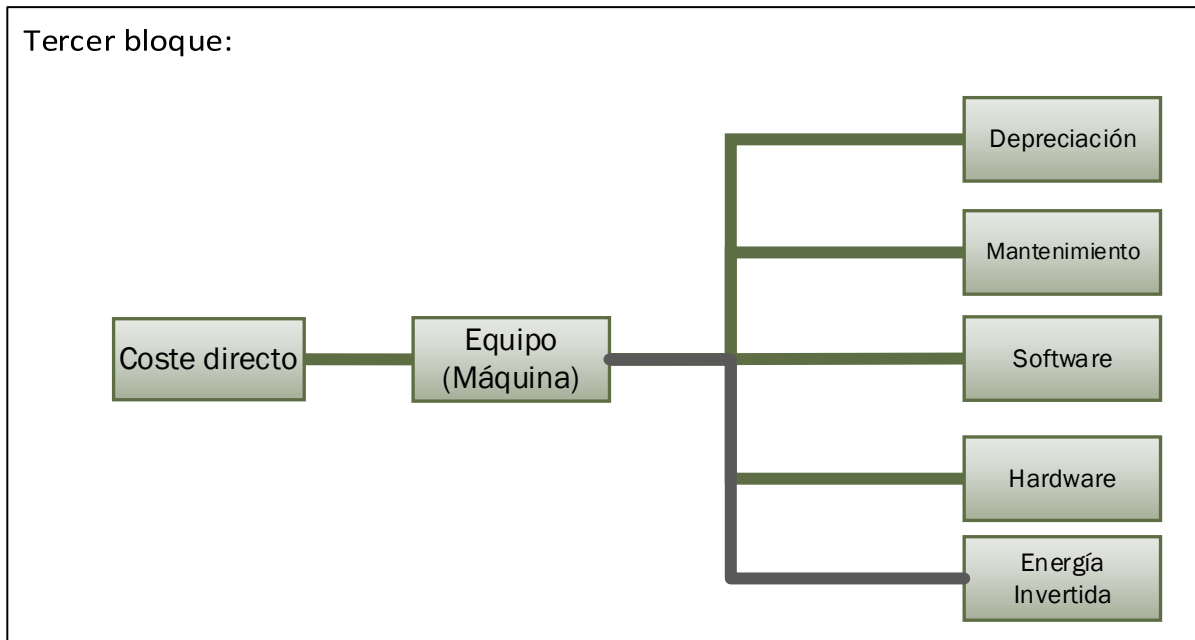


Figura 17. Descripción gráfica del tercer bloque de costes, C_{equipo} .

El tercer y último bloque del $C_{directo}$ es el C_{equipo} . Incluyen el coste de adquisición del equipo, costes operativos relacionados con el consumo energético y el mantenimiento. (ver Figura 17) Los costes del equipo informático para la preparación de la impresión no fueron considerados en el modelo de costes. Tampoco, el software utilizado para la preparación del archivo STL, por considerar que normalmente los equipos de impresión incluyen el software. La Ecuación 8 describe la forma de cálculo del C_{equipo} .

$$C_{equipo} = C_{adquisición} \left(\frac{\text{€}}{\text{pieza}} \right) + C_{mantenimiento} \left(\frac{\text{€}}{\text{pieza}} \right) + C_{energía} \left(\frac{\text{€}}{\text{pieza}} \right) \quad \text{Ecuación 8}$$

El $C_{adquisición}$ son los costes relacionados con la adquisición y depreciación del equipo, imputables por pieza. En la Ecuación 9 se describe la forma de cálculo.

$$C_{adquisición} = \left[\frac{C_{compra}}{t_{depreciación}} \right] * (I_{uso}) * \left(\frac{1}{\text{tamaño de lote}} \right) \left(\frac{\text{€}}{\text{pieza}} \right) \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde,

- C_{compra} es el precio, en euros, de compra de la impresora
- $t_{depreciación}$ es el periodo de tiempo en el que se deprecia contablemente el equipo
- I_{uso} es el índice de uso del equipo de FA durante la impresión y el tiempo total en el que el equipo está disponible.

El I_{uso} se encuentra definido en la Ecuación 10.

$$I_{uso} = \frac{\text{horas por bandeja}}{\text{horas efectivas de trabajo}} \quad \text{Ecuación 10}$$

El $C_{mantenimiento}$ ha sido estimado como un porcentaje del $C_{adquisición}$, sin embargo, si es posible identificar el coste de mantenimiento anual real, se calcularía dividiendo entre las horas de un año y multiplicado por el I_{uso} partido por el tamaño del lote basado en la metodología utilizada por Hopkinson and Dickens (2003).

El desarrollo de la tecnología FA ha crecido de forma acelerada en los últimos 20 años, pero existe incertidumbre sobre el consumo energético y el impacto que tiene al compararla con la fabricación tradicional. Además, es evidente que, ante un mercado de preparación y venta de filamentos con variadas especificaciones, se ha diseñado este bloque para anticipar el coste energético de esta tecnología ante diversos tipos de materiales.

El $C_{energía}$ incluye los costes de la energía invertida:

- para precalentar y mantener el sistema a temperatura óptima de impresión
- en el tiempo de espera entre lotes de impresión
- en los movimientos en los ejes x, y y z del cabezal y/o placa de impresión

Todo lo anterior multiplicado por el coste de la energía en kWh. Los $C_{energía}$ dependen de la tecnología y en particular para FDM se han definido en la Ecuación 11.

$$C_{energía} = [E_{precal} + E_{material} + E_{idle} + E_{mov} + E_{cal} + E_{enfria}] * P_{kWh} \left(\frac{€}{pieza} \right) \quad \text{Ecuación 11}$$

La E_{precal} es la energía utilizada para empezar a calentar el sistema. Condicionado por la tecnología, puede ser la placa de impresión y/o la cámara que en algunas impresoras cuentan con aislamiento térmico para mantener la temperatura interior. La E_{cal} es la energía necesaria para mantener la temperatura del sistema durante el proceso de impresión. La E_{cal} se puede considerar como la diferencia de la E_{total_cal} menos E_{precal} . (ver Ecuación 12)

$$E_{cal} = E_{total_cal} \left(\frac{kWh}{pieza} \right) - E_{precal} \left(\frac{kWh}{pieza} \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

E_{idle} , E_{mov} y E_{enfria} son las energías utilizadas por la máquina FDM en el modo de espera, movimiento de ejes y extrusor y abanico para enfriar el sistema respectivamente.

Por último, el $E_{material}$, representa la energía requerida para alcanzar el punto de fusión del material a extruir. (ver Ecuación 13)

$$E_{material} = c * m(T_m - T_a) \left(\frac{kWh}{pieza} \right) \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde, c representa la capacidad calorífica del material y m la masa del material que variará en función del tamaño y volumen de la pieza a fabricar. Por otro lado, T_m es la temperatura de fusión del material extruido y T_a es la temperatura ambiente en la que está el material antes de pasar por el proceso de extrusión.

El modelo propuesto como ninguno de los investigados hasta el momento, ofrece una valoración de los costes individuales de impresión considerando los costes directos. El factor diferenciador de este modelo reside en su capacidad de establecer el coste de una pieza o lote incluso antes de imprimirlo. Además de considerar el coste energético en la FA y la influencia que tienen los procesos térmicos en el coste final para concebir una pieza utilizando la tecnología FDM.

Para validar el modelo de coste propuesto, en el capítulo 5 se propone la simulación de diversos escenarios. Con esta validación se pretende analizar la relación del modelo con la variación de distintos parámetros de impresión.

A continuación, los parámetros considerados y modelo para el cálculo de la huella de carbono en la tecnología FDM.

3.2. PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO EN LA FABRICACIÓN ADITIVA

Como se pudo evidenciar en la revisión de la literatura, las empresas ya no sólo buscan la productividad y optimización económica de sus procesos productivos, sino que ahora también buscan que los procesos productivos sean sostenibles y amigables con el medio ambiente. Así como para el cálculo de los costes de FA se ha utilizado la tecnología FDM, para identificar los parámetros relacionados con el cálculo de la huella de carbono, principal indicador medio ambiental. De este modo tener una metodología en la que se pueda estudiar los costes productivos y las emisiones, para poder tomar decisiones.

3.2.1. CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA

En los últimos años el interés en la sostenibilidad ambiental de la FA ha sido creciente. Una de las principales características de la FA es la personalización de las piezas impresas con estas tecnologías. Frecuentemente la FA es comparada con procesos de fabricación tradicional como el moldeo por inyección no por el volumen de producción, sino por la capacidad de personalizar el producto final. La FA tiene la capacidad de producir con menor uso de materia prima y menor desperdicio en el proceso.

Algunos autores han analizado la sostenibilidad ambiental del proceso desde el punto de vista del rendimiento energético y desempeño ambiental de las tecnologías de FA. Por un lado Liu et al. (2018) realiza una aproximación al cálculo del consumo de energía específica, SEC por sus siglas en inglés, y el impacto ambiental resultante de un proceso habitual de FA. Por el otro Yi and Aurich (2021) evaluaron el desempeño energético con una simulación para predecir el consumo energético en el proceso de impresión utilizando tecnología SLM y FDM. Ambos estudios concluyen que no sólo es importante las características del material a utilizar para el desempeño energético, sino también los parámetros de entrada del proceso, donde es posible incrementar la eficiencia energética sin sacrificar la calidad del producto ajustando los parámetros de impresión.

En cuanto al desempeño ambiental Garcia et al. (2018) ha descubierto en su revisión de literatura sobre el desempeño ambiental de la FA, que el 87% de los artículos revisados el sujeto principal de investigación está relacionada con el consumo energético y que es dependiente de las características del proceso de FA seleccionado y los parámetros utilizados. Siguiendo la misma línea de desempeño ambiental de la FA Kellens et al. (2017) asegura en su investigación que hasta el momento se ha analizado el impacto ambiental de la tecnología de FA desde varias dimensiones, pero los autores realizan una aproximación más práctica hacia el impacto ambiental en la administración de la cadena de suministro y el inventario de ciclo de vida incluyendo la eficiencia energética del proceso de impresión. Por último, Tagliaferri et al. (2019) realizó una comparativa en costo y desempeño ambiental entre distintas tecnologías de FA resaltando aspectos como la limitación de espacio en los equipos de impresión para producción a gran escala y la influencia de las geometrías en el desempeño ambiental de las distintas tecnologías.

A diferencia de otros autores, el objetivo del modelo propuesto es poder comparar distintas geometrías y parámetros de impresión adecuados en los que la fabricación con tecnología FDM emita la menor cantidad de emisiones de CO₂ equivalente.

A continuación, se presenta el modelo propuesto para el cálculo de las emisiones de CO₂ equivalente del proceso de FA en particular utilizando la tecnología FDM. El modelo se basa en aspectos energéticos del proceso productivo. Es posible adaptar el modelo a otras tecnologías haciendo las modificaciones de acuerdo con las características de la tecnología de FA seleccionada.

3.2.2. BLOQUES PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA

El modelo propuesto en esta tesis para el cálculo de la huella de carbono puede ser utilizado para predecir el impacto ambiental de la fabricación de una pieza en un entorno de producción de pequeña escala. El modelo está diseñado para ser implementado en impresoras profesionales de escritorio, tomando en cuenta el mercado de impresoras y las características comunes.

De forma general las energías que intervienen en el proceso de impresión para el cálculo del CO₂ equivalente, se pueden resumir en las siguientes: energía térmica, energía de movimiento, energía de precalentamiento y de enfriamiento (ver Figura 18)

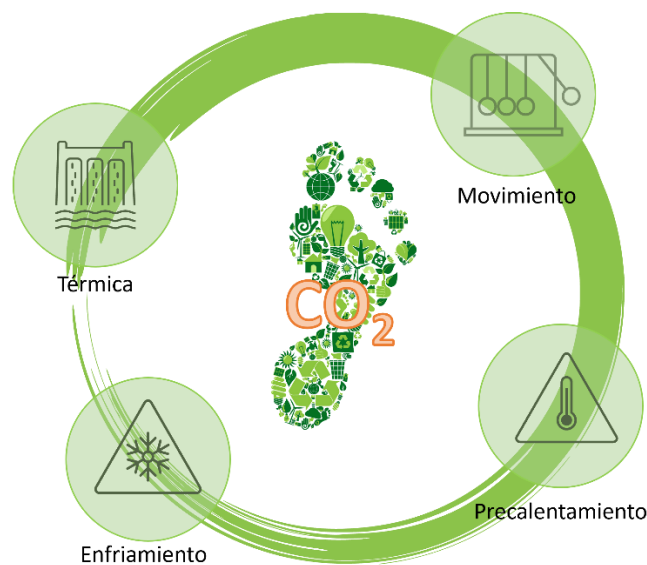


Figura 18. Energías consideradas para el cálculo la huella de carbono.

La energía invertida en la fabricación utilizando la tecnología FDM han sido agrupadas en la siguiente ecuación (ver Ecuación 14):

$$E_{FDM} = E_{térmica} + E_{movimiento} + E_{precal} + E_{enfriamiento} \quad \text{Ecuación 14}$$

Siendo E_{FDM} la suma de todas las energías utilizadas durante el proceso de impresión. $E_{térmica}$ es la suma de las energías utilizadas para calentar el sistema. $E_{movimiento}$ es la energía invertida en el movimiento del extrusor y/o bandeja de impresión a través de los tres ejes del sistema. E_{precal} es el sumatorio de las energías necesarias para precalentar el sistema antes del proceso de impresión. Finalmente, $E_{enfriamiento}$ es la energía utilizada para enfriar el sistema una vez pasado el proceso de impresión.



Los términos sumados en la $E_{t\acute{e}rmica}$ se pueden resumir en dos.

- Energía térmica necesaria para llevar el material a su punto de fusión
- Energía térmica necesaria para calentar la bandeja de impresión

Ambos términos de energía pueden ser formulados considerando el principio de conservación de energía. La conservación de la energía es un principio fundamental de la física que establece que la energía en un sistema aislado se mantiene constante en el tiempo, es decir la energía no se crea, ni se destruye, se transforma, por ende, la cantidad de energía total en un sistema cerrado se mantiene constante a lo largo del tiempo. Existen diferentes formas de energía, como la energía cinética, potencial, térmica, química, entre otras. La energía térmica juega un papel trascendente en la FA, ya que se utiliza en varias etapas del proceso, para fundir el filamento; solidificar o sinterizar los materiales, dependiendo de la tecnología utilizada (ver Ecuación 15).

$$E_{t\acute{e}rmica} = c_f * m_p * \Delta T + m_p * x + c_b * m_b * \Delta T \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde, c_f y c_b son el calor específico del filamento a utilizar y del material de la bandeja de impresión, respectivamente. Por otro lado, m_p y m_b son las masas de la pieza a fabricar y de la bandeja de impresión, respectivamente. El diferencial de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura de fabricación es ΔT . Por último, x es el calor latente del filamento a utilizar.

El calor específico es una propiedad fundamental de la termodinámica que describe cómo reaccionan las distintas sustancias ante cambios de temperatura. En este caso es utilizado para evaluar la cantidad de calor que absorben el filamento y el material de la bandeja de impresión para hallar la energía necesaria para llegar a esa temperatura. Mientras que el calor latente es una propiedad física que se refiere a la cantidad de energía térmica que se requiere para cambiar de fase (sólido a líquido), en el caso del modelo, encontrar a través del calor latente de fusión la energía térmica necesaria para cambiar una unidad de masa (filamento) de estado sólido a líquido manteniendo una temperatura constante.



Para la $E_{movimiento}$ se consideraron dos términos:

- La energía invertida durante la espera entre periodos de impresión
- La energía invertida durante el proceso de impresión

La $E_{movimiento}$ en el contexto de la fabricación aditiva en general se refiere a la energía cinética que se utiliza para mover los componentes del equipo de FA. Como, por ejemplo, la bandeja de impresión o el cabezal de impresión mientras se deposita material capa a capa. Esta energía cinética es necesaria para posicionar de forma correcta y con precisión los componentes móviles en las coordenadas correctas y permitir que el proceso de impresión sea eficiente y preciso. Los términos relacionados a la $E_{movimiento}$ desglosados en la Ecuación 16.

$$E_{movimiento} = P_{idle} * t_{idle} + \frac{P_{media} * t}{v} * v * t \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde, P_{idle} y t_{idle} es la potencia del equipo cuando está en reposo o espera entre periodos de impresión o esperando le sea asignado un trabajo de impresión y el tiempo que transcurre mientras está en reposo o espera, respectivamente. Mientras que P_{media} y t son la potencia media mientras está imprimiendo y el tiempo de impresión, respectivamente. V es el volumen total de la pieza y v el caudal volumétrico de filamento extruido durante el proceso de impresión.



Para la E_{precal} se consideraron tres términos:

- La energía invertida durante el precalentamiento de la bandeja de impresión
- La energía invertida durante el precalentamiento de la cámara de impresión
- La energía invertida para mantener la temperatura durante el proceso de impresión

La E_{precal} es la energía necesaria para elevar la temperatura de temperatura ambiente a una temperatura óptima de fabricación (ver Ecuación 17)

$$E_{precal} = E_{precal_cámara} + E_{precal_bandeja} \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde, $E_{precal_cámara}$ es la energía invertida para elevar la temperatura de la cámara de impresión desde la temperatura ambiente, a una temperatura óptima de impresión (ver Ecuación 18).

$$E_{precal_cámara} = c_{aire} * m_{aire} * \Delta T \quad \text{Ecuación 18}$$

Mientras que, $E_{precal_bandeja}$ es la energía invertida para elevar la temperatura de la bandeja de impresión desde la temperatura ambiente a una temperatura óptima de impresión (ver Ecuación 19)

$$E_{precal_bandeja} = c_b * m_b * \Delta T \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde, c_b y m_b son el calor específico del material y masa de la bandeja de impresión respectivamente. El diferencial de temperatura entre la temperatura ambiente y la temperatura de precalentamiento es igual a ΔT .

Durante el proceso de impresión la temperatura del sistema debe mantenerse estable, como hipótesis de partida, para obtener resultados óptimos. Por esta razón es importante calcular la energía necesaria para mantener la temperatura durante el proceso de impresión (ver Ecuación 20).

$$E_{mantener} = P_{media} * t - E_{precal} \quad \text{Ecuación 20}$$



Por último, la $E_{enfriamiento}$ donde se considera sólo un término

- La potencia invertida por el tiempo de funcionamiento del sistema de enfriamiento una vez haya culminado el proceso de impresión

$E_{enfriamiento}$ es la energía utilizada para enfriar el equipo y sistema FDM para poder remover la pieza sin peligro para el operario, ni para la consolidación de la pieza (ver Ecuación 21).

$$E_{enfriamiento} = P_{fan} * t_{enfriamiento} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde, la potencia del sistema utilizado para utilizar el sistema está representado por P_{fan} y el tiempo de enfriamiento es igual a $t_{enfriamiento}$.

Para el cálculo de la huella de carbono o CO₂ equivalente se ha realizado una adaptación del modelo propuesto por Huang et al. (2016) y Yi et al. (2020) que considera la energía del proceso y postproceso de impresión. (ver Ecuación 22)

$$C_{FDM} = \beta_{material} * m_{material} + \beta_{elect} * (E_{FDM} + E_{postproceso}) \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde, $\beta_{material}$ es una constante que representa los kilos de CO₂ emitidos para producir un kilo de materia prima. El β_{elect} es una constante que representa los kilos de CO₂ emitidos por cada julio de electricidad disponible para el proceso de FA. Ambas constantes fueron

obtenidas de la Agencia Federal del Medio Ambiente de Alemania (Corinne, Stoll, and Schoen 2020). A la E_{FDM} se le suma la $E_{postproceso}$ en el caso que exista un proceso previo a la extracción de las piezas de la bandeja que requiera consumo de energía eléctrica. Para el cálculo de la huella la energía necesaria para disponer de un kilogramo de materia prima es muy superior a la generada por el proceso (Hernandez et al. 2021), sin embargo, el número de materiales de bajo impacto en la huella durante su extracción y procesado, es escaso. Debido a lo anterior, en las validaciones, la huella de la materia prima no fue considerada en las emisiones totales y sólo se consideró la huella del proceso de fabricación.

A continuación, en el capítulo 5 se abordarán las validaciones teóricas de los modelos propuestos tanto para el cálculo de coste de la fabricación aditiva, como para el cálculo de la huella de carbono.

CAPÍTULO 4:

VALIDACIÓN TEÓRICA DE LOS MODELOS PROPUESTOS

CAPÍTULO 4: VALIDACIÓN TEÓRICA DE LOS MODELOS PROPUESTOS

4.1. MARCO METODOLÓGICO PARA LA VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

Para la validación de los modelos descritos en los capítulos anteriores, a continuación, se proponen una serie de simulaciones que plantean diferentes escenarios hipotéticos de utilización de la tecnología. El objetivo es comprobar hasta qué punto los modelos planteados son capaces de proporcionar información relevante a usuarios y potenciales usuarios, sobre la utilización de esta tecnología aditiva.

Dada la gran variedad de posibles usos de la FA, tanto desde el punto de vista estratégico del uso de la tecnología como en la versatilidad que existe en la configuración específica del proceso de impresión, se hace imprescindible imponer una serie de condiciones de marco o restricciones a los casos a simular:

- ✓ Se considera que la empresa que valore el uso de estos modelos utilizará la FA como un proceso auxiliar en su operación, lo que puede implicar la fabricación de prototipos, repuestos para mantenimiento, o elementos auxiliares para otros procesos productivos. Por tanto, se descarta su uso para empresas que deseen utilizar la FA como sistema de producción de producto final o para la fabricación de grandes series, sobre todo por las inversiones necesarias. Por otro lado, se podría considerar el escenario a simular como un paso previo para una integración más ambiciosa de la FA en el esquema productivo de la empresa.
- ✓ Como consecuencia del punto anterior, se considerará que la inversión en equipos productivos para FA debe estar claramente limitada, tanto es así, que se asumirá el uso o adquisición de un único equipo.
- ✓ Tal y como se introdujo en el capítulo 3 y 4 al modelar el consumo energético del proceso, este análisis se va a centrar en la tecnología de FA por extrusión de hilo, la cual está orientada a la extrusión de materiales poliméricos (aunque más reciente se ha popularizado el uso de soluciones específicas con composites e incluso materiales metálicos).
- ✓ Dado el uso de la tecnología, se considera que la variedad de materiales poliméricos comercialmente disponibles puede cubrir en la mayoría de los casos las necesidades de cualquier empresa (desde el punto de vista de las propiedades mecánicas y térmicas alcanzables).

Por otro lado, para que los modelos planteados sean realmente útiles, deben aplicarse sobre casos concretos, lo que implica la especificación completa de:

1. Geometría de la pieza a imprimir
2. Material de impresión
3. Modelo de impresora y software de operación
4. Parámetros de impresión
5. Datos económicos de todas las variables involucradas.

4.1.1. GEOMETRÍA DE IMPRESIÓN

Estudios previos han considerado la evaluación de distintas figuras geométricas y posiciones de impresión en diversas tecnologías de FA para comprobar su efecto en modelos de costes propuestos (Baumers et al. 2016; Ding et al. 2021; Ruffo and Hague 2007; Ruffo et al. 2006a) y en la medición de la sostenibilidad ambiental del proceso de impresión (Baumers et al. 2013a; Huang et al. 2016; Tagliaferri et al. 2019). (ver Figura 19)

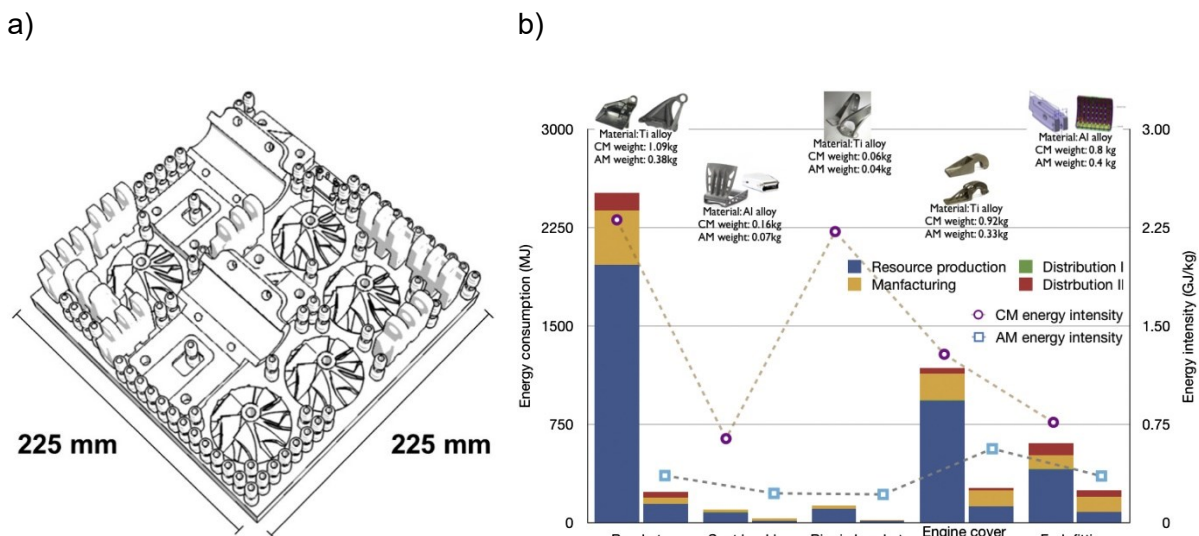


Figura 19. Piezas utilizadas en el estudio de (Baumers et al. 2016)(a) y piezas utilizadas sen el estudio de (Huang et al. 2016)(b)

Además de los otros estudios, los presentados por Martin Baumers y Runze Huang utilizaron combinaciones entre figuras con distintos volúmenes y posiciones de impresión dependiendo de la tecnología. Es decir, no parece existir una pieza patrón de referencia para este tipo de estudios, por lo que en este caso para validar el modelo de coste y el modelo para el cálculo de la huella de carbono, se propone la simulación de la impresión de un espécimen para ensayos de tensión (ASTM D638-14 2016) en distintos tamaños de lote (ver Figura 20). Este tipo de espécimen es muy habitual en los estudios dirigidos a la validación de las propiedades

mecánicas obtenidas por las piezas impresas en función del uso de diferentes materiales y parámetros de impresión (Algarni and Ghazali 2021; Banjanin et al. 2018; Cojocaru et al. 2022) o incluso su comparación con otros procesos de fabricación. La elección de esta geometría permitirá, como trabajo posterior a esta tesis, complementar este estudio con otro vinculado a la medición experimental de las propiedades mecánicas resultantes en cada caso simulado, proporcionando así una información útil sobre cómo conseguir unas determinadas prestaciones mecánicas al mínimo coste posible.

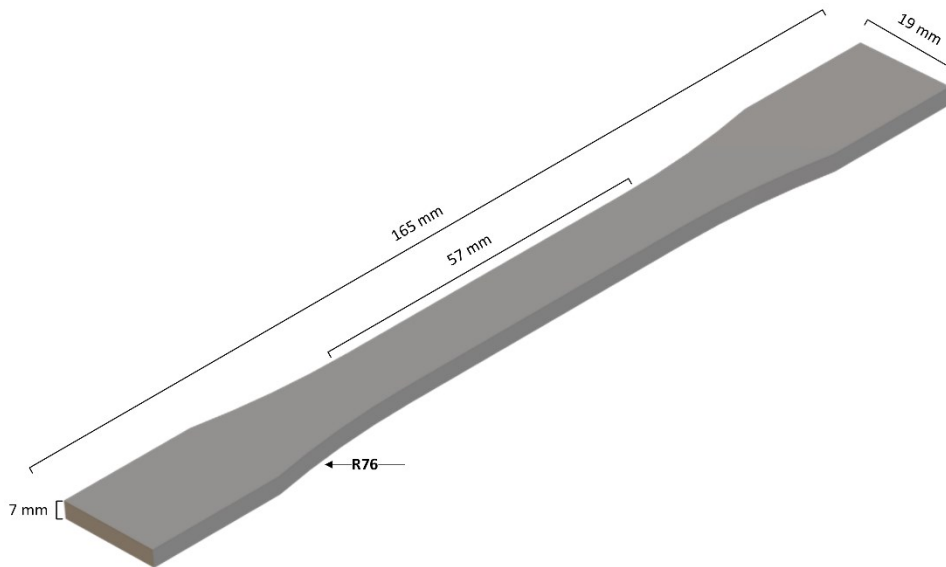


Figura 20. Dimensiones del espécimen para ensayos de tensión de acuerdo con la norma ASTM D638-14

Además del espécimen para ensayos, para validar el modelo para el cálculo de la huella de carbono se simuló la impresión de una esfera de 65 mm de diámetro cortada a 45° de la tangente de su circunferencia con respecto al eje X, de ahora en adelante pieza CEs (ver Figura 21a). Por último, también se seleccionó una semiesfera de 65mm de diámetro cortada por la mitad con respecto al eje X, de ahora en adelante pieza Ses (ver Figura 21b). Para ambas piezas se seleccionó el mismo tamaño de lote y características de impresión variables, de acuerdo con los parámetros y materiales simulados.

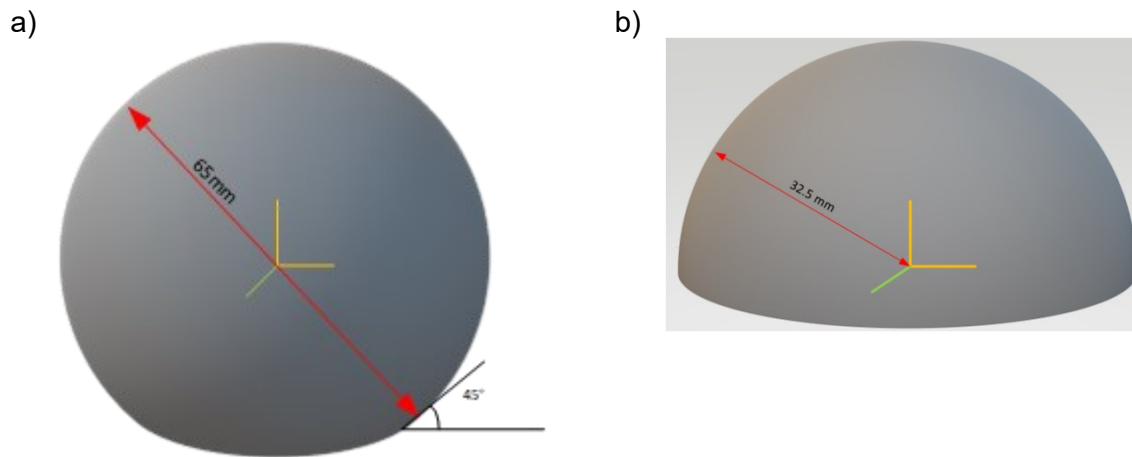
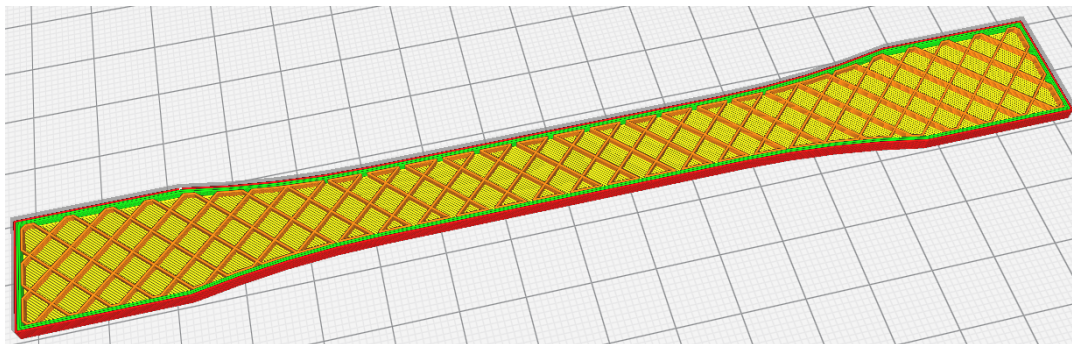


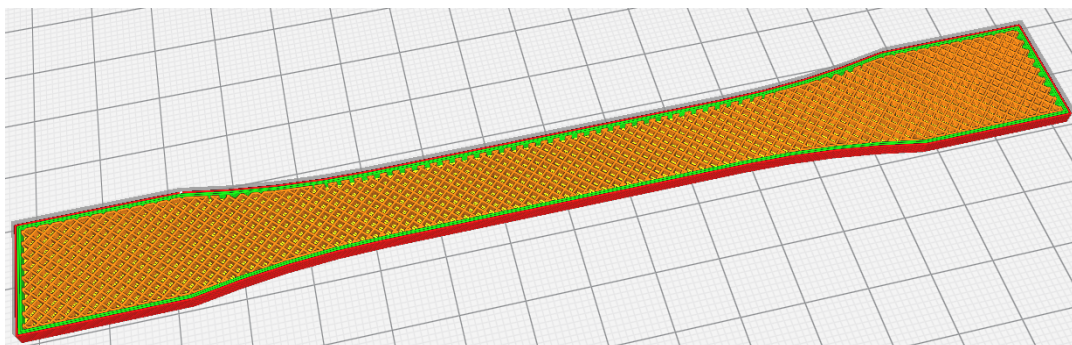
Figura 21. Dimensiones de la pieza CEs (a) y de la pieza Ses (b)

En este punto conviene destacar que las piezas realizadas mediante FA no suelen ser macizas: cuentan con una serie de capas (normalmente tres en tecnología FDM) que conforman una especie de cáscara, y el interior del volumen es rellenado parcialmente mediante un patrón de relleno configurable (tanto en la geometría como en su densidad). (Ver Figura 22)

a)



b)



c)

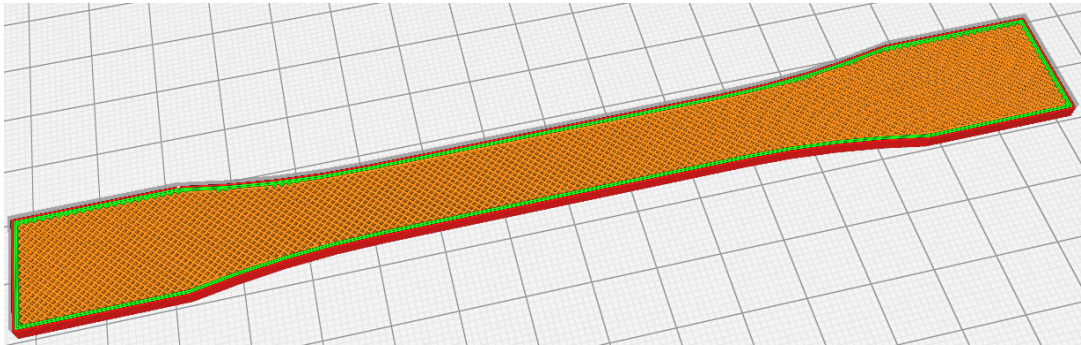


Figura 22. Espécimen de ensayo con rellenos de 20% (a), 60% (b) y 100% (c)

Obviamente, cuanto menor es el porcentaje de relleno menor es el peso de la pieza, pero también pueden empeorar sus propiedades mecánicas (esta relación no es fácilmente cuantificable). Esto ha popularizado hoy en día el uso de herramientas de simulación basadas en optimización topológica para maximizar alguna propiedad mecánica minimizando la masa de la pieza, lo que suele generar geometrías muy orgánicas casi imposibles de obtener sin el uso de la FA.

Además, hay que tener en cuenta que el espécimen para ensayos seleccionado es una pieza casi plana, por lo que apenas se verá afectada por las variaciones en el porcentaje de relleno. Por ello se han seleccionado para algunos de los casos simulados las geometrías esféricas representadas en Figura 21, que permiten amplificar el efecto del relleno sobre los modelos planteados. Concretamente se ha seleccionado la pieza CEs y Ses (Figura 21) y no una esfera completa para evitar el uso de material de soporte.

Suele ser habitual en la FA con FDM la adición de material de soporte siempre que la tangente de la superficie de la pieza forme un ángulo inferior a unos 45° con respecto a la horizontal (este parámetro es configurable). Este material permite sostener aquellas partes de la pieza que por efecto de la gravedad podrían derrumbarse o deformarse durante el proceso de impresión. Sin embargo, la adición de material de soporte en el caso de imprimir una geometría esférica sería casi equivalente (desde el punto de vista de la cantidad de material consumido o del tiempo de impresión) al material de relleno para una pieza de geometría que proyecta en la bandeja de impresión círculos de distintos tamaños (esfera) capa a capa (con la salvedad de que el material de soporte no suele imprimirse con un porcentaje de relleno superior al 25% para facilitar su posterior eliminación), (ver Figura 23).

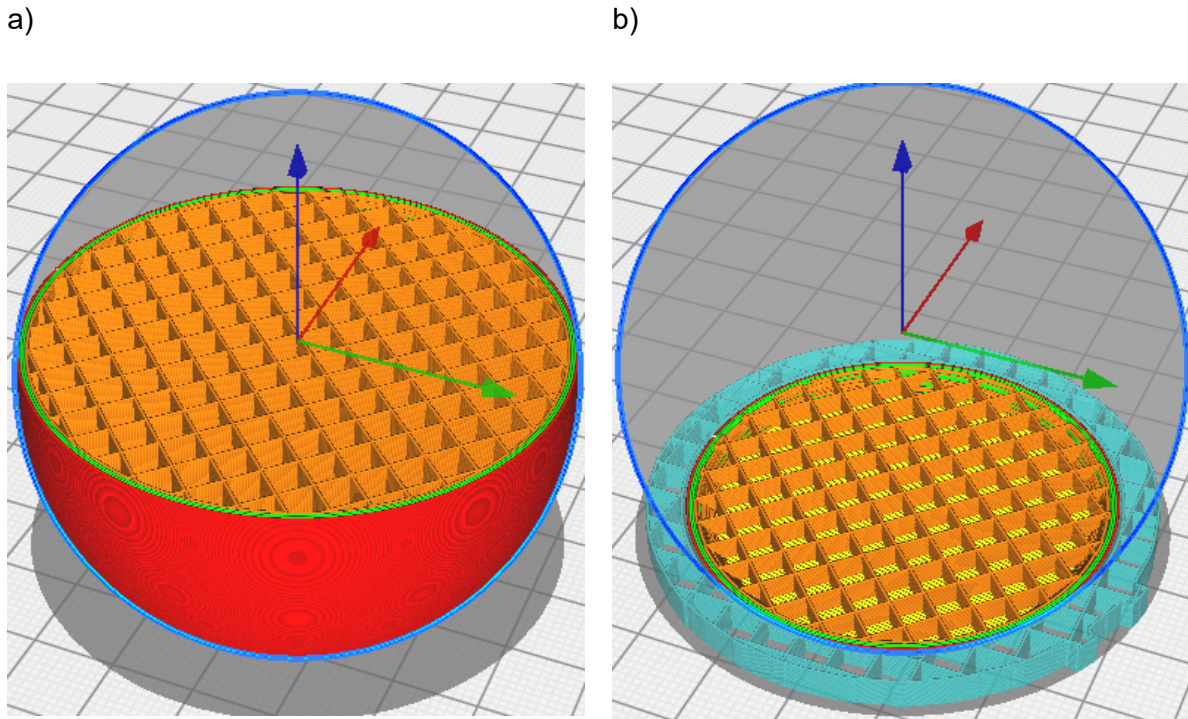


Figura 23. Pieza CEs sin estructura de soporte (a) y con estructura de soporte (b)

También hay que tener en cuenta que el uso de material de soporte daña la calidad superficial de la pieza impresa en los puntos en que dicho material se une a la pieza por lo que suele ser una razón más para evitar su uso.

Por último, la evaluación por lote de las piezas descritas facilita al análisis del coste unitario teniendo en cuenta el máximo aprovechamiento del área de impresión.

4.1.2. MATERIAL DE IMPRESIÓN

La materia prima para FDM son filamentos termoplásticos extruidos capa por capa para construir el objeto deseado. En el Capítulo 2 de esta tesis se realizó una revisión del estado del arte sobre los distintos materiales utilizados en la FA con filamentos. A continuación, se describen los diferentes tipos de materiales utilizados para las simulaciones propuestas, sus propiedades, aplicaciones y coste de adquisición.

Para diversificar los resultados se escogieron materiales semi cristalinos y amorfos.

- ✓ Los termoplásticos semi cristalinos tienen regiones tanto cristalinas como amorfas en su estructura. Estos materiales tienden a ser más fuertes y rígidos que los amorfos, además tienen un punto de fusión más alto y temperatura de transición vítrea más baja

que los amorfos. Por ejemplo: polipropileno (PP), poliamidas (PA), polietileno (PE) y PEEK, entre otros.

- ✓ Los termoplásticos amorfos son aquellos cuyas moléculas poliméricas no se encuentran ordenadas como en las estructuras cristalinas. Estos materiales no tienen una temperatura de transición vítrea, además tienden a ser materiales más flexibles en comparación con los cristalinos y los semi cristalinos. Por ejemplo: poliestireno (PS), PLA, ABS, TPU, entre otros. (Jafferson and Chatterjee 2021)

Debido a su temperatura de fusión, características técnicas para su extrusión y adhesión capa a capa de material, se clasificaron los materiales escogidos para las simulaciones por su dificultad de impresión. En este sentido, se tienen por un lado de alta dificultad para los que requieran márgenes reducidos de temperatura de impresión y características particulares del equipo de impresión y por otro de baja dificultad para los que no requieren características particulares del equipo de impresión y pueden ser impresos en rangos elevados de temperatura de extrusión.

Dentro de los materiales semi cristalinos se consideró para las simulaciones el PP y el PEEK.

- a. La dificultad de impresión del PP es alta debido a su temperatura de fusión (160°C de media) de ahí que sea adecuado la utilización de una bandeja calefactada y de ser posible una cámara de impresión con temperatura controlada. Las aplicaciones del PP incluyen la industria del embalaje, componentes de electrodomésticos, en el automóvil y electrodomésticos por su alta resistencia a productos químicos, ligereza y buen aislamiento eléctrico. Por su uso frecuente en la industria y sus propiedades, el coste del PP en forma de filamento está entre 30 y 40 euros un carrete de 500 gramos.
- b. La dificultad de impresión del PEEK es alta debido a las altas temperaturas que son necesarias para su extrusión, además es obligatorio para su procesamiento en tecnología FDM que tanto la bandeja como la cámara de impresión sean calefactadas. El PEEK es un material de alto rendimiento, siendo utilizado en el sector industrial y aeroespacial especialmente por sus prestaciones en condiciones de altas temperaturas, resistencia frente a productos químicos, además de excelentes propiedades mecánicas. El coste de este material es muy superior al PP y puede estar entre los 700 y 1.000 euros el kilogramo.

Por otro lado, en cuanto a los materiales amorfos escogidos para las simulaciones están el PLA, PETG, TPU y ABS.

- a. La dificultad de impresión del PLA es baja debido a que no necesita temperaturas tan altas como los materiales semi cristalinos, además no es obligatorio el uso de una

bandeja, ni cámara calefactada para su extrusión y adhesión capa a capa. El PLA es uno de los materiales más populares para la impresión 3D mediante filamentos debido a su facilidad de uso y ser biodegradable, ya que es un plástico derivado de fuentes renovables como el maíz o la caña de azúcar. Este material es utilizado normalmente para realizar prototipos rápidos, decorativos y aplicaciones de baja resistencia mecánica. El coste aproximado de kilogramo de filamento es de 25 euros.

- b. La dificultad de impresión del PETG es baja debido a que ofrece un rango más amplio de temperatura de impresión, además no requiere de mayores características técnicas en el equipo FDM que un extrusor capaz de soportar temperaturas no mayores a los 400 °C. El PETG es una variante del PET que combina la facilidad de impresión del PLA con la resistencia y propiedades mecánicas de piezas impresas con ABS. Este material tiene múltiples aplicaciones debido a su resistencia al calor, impacto y solvencia química en la logística de empaques de minoristas y de insumos médicos, aisladores electrónicos y en la industria de piezas que demanden cierta resistencia mecánica. El costo del PETG puede estar alrededor de los 30 euros el kilogramo.
- c. El TPU tiene una dificultad de impresión alta debido a la temperatura necesaria para su extrusión y características técnicas del equipo de impresión que incluye el uso de una bandeja calefactada. El TPU es un material flexible utilizado para imprimir objetos que requieran propiedades con alta elasticidad. Entre los usos de este material están en la industria de fabricación por ejemplo en juntas y sellos, además de su uso para fabricar carcasas de dispositivos móviles (fundas de protección). El costo por kilogramo de filamento TPU es de aproximadamente 40 euros.
- d. El filamento de ABS tiene una dificultad de impresión media debido a que requiere de una bandeja calefactada, pero la temperatura de extrusión no es tan elevada como por ejemplo con el TPU o el PETG. Presenta una resistencia y rigidez mayor que el PLA, además de una mayor resistencia al calor, esto lo hace uno de los materiales más utilizados para la tecnología FDM. Entre las aplicaciones del ABS están piezas funcionales, utillajes para la industria automotriz y, por su resistencia, fundas y protectores para equipos móviles. El coste aproximado del kilogramo de ABS es de 30 euros.

En cuanto a la selección de material, para la validación del modelo de coste se seleccionaron el ABS y el PEEK, tanto por ser materiales con prestaciones técnicas suficientes distintas como para representar de manera realista necesidades de usuarios diferentes, como para probar el modelo bajo varias condiciones de impresión. Por un lado, aunque ambos materiales requieren del uso de una cama calefactada, el ABS es un material en el cual se pueden imprimir piezas sin necesidad de contar con una cámara calefactada, mientras que, el PEEK

requiere que la cámara esté calefactada como requisito de impresión y adhesión del material. Esta característica particular prevé una variación considerable de coste energético, entre cada uno de los materiales, uno de los bloques de coste del modelo y así comprobar la efectividad del cálculo de este parámetro.

Para la validación del modelo para el cálculo de la huella de carbono se realizaron dos simulaciones distintas. Una primera simulación donde se consideraron el PLA, PETG, ABS, TPU y PP debido a las distintas velocidades de impresión recomendadas por el fabricante para cada filamento y así poder compararlas con las emisiones producidas. En la segunda simulación se consideraron el ABS, PLA y PEEK por la diversidad de las características térmicas necesarias para su impresión. Por ejemplo, para el PLA no es necesario el uso de una bandeja ni cámara calefactada. Para el ABS sólo se consideró la bandeja de impresión calefactada y para el PEEK se consideraron tanto la bandeja como la cámara calefactada.

4.1.3. EQUIPOS DE IMPRESIÓN

Debido a las características particulares de la tecnología FDM y la materia prima a base de filamento, los equipos para impresión por extrusión presentan diferentes arquitecturas que se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- Cartesiana
- Delta
- Polar
- Brazo Robótico

Las impresoras FDM tipo delta deben su nombre a su configuración triangular de tres brazos con rieles que ofrecen movimientos cartesianos de arriba y hacia abajo y de izquierda a derecha con una bandeja de impresión fija y en forma circular. Las dimensiones de este tipo de equipo están limitadas por la altura de los brazos y el diámetro de la base, pero al mismo tiempo es un beneficio ya que puede ser redimensionable. (ver Figura 24)



Figura 24. Impresora tipo delta (Anycubic 2023)

A diferencia de las impresoras FDM de tipo delta y cartesiana, las de tipo polar utilizan coordenadas polares para orientarse en una cuadrícula circular. Esto quiere decir que la bandeja de impresión gira y el extrusor se mueve hacia arriba y abajo y de izquierda a derecha. Una de las principales ventajas de este tipo de impresoras es que facilitan la impresión de objetos que siguen un patrón en espiral, además que puede funcionar con sólo dos motores. Por otro lado, no son ideales al intentar escalar la figura geométrica ya que por el movimiento giratorio de la bandeja de impresión la precisión de la impresión desciende al alejarse del centro (ver Figura 25).

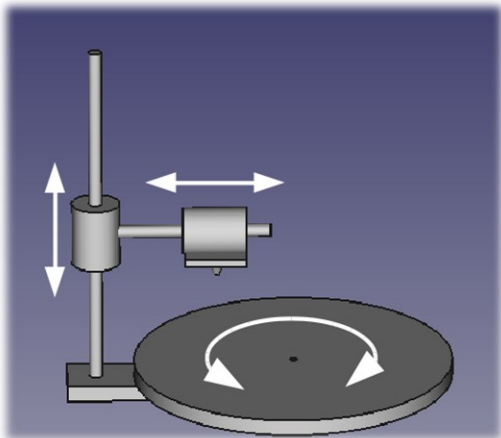


Figura 25. Dirección de movimiento de impresora polar

Las impresoras FDM tipo brazo robótico están en desarrollo y no son más que la adaptación de un extrusor a un brazo robótico que es el que realiza los movimientos dependiendo de los grados de libertad del brazo robótico. Debido a la libertad de movimiento de estos equipos son aún más costosos que los tipos antes mencionados (ver Figura 26), pero a cambio ofrecen

la máxima flexibilidad en cuanto a la accesibilidad a la zona de impresión y la orientación espacial del extrusor respecto de la superficie de la pieza.



Figura 26. Ejemplo de brazo robótico con extrusor de filamento

Las impresoras de tipo cartesiana son las más comunes del mercado. Este tipo de impresoras reciben su nombre por que utilizan un sistema de coordenadas dimensionales (eje X, Y y Z) para ubicarse en el espacio de impresión y definir movimientos posteriores. Los costos de este tipo de impresoras varían en función de las características térmicas que pueda ofrecer para procesar un filamento y el volumen de impresión disponible. Dependiendo del volumen disponible de impresión y las características de procesamiento térmico de material estas impresoras se pueden clasificar en impresoras de escritorio, semi industriales o industriales. Las impresoras de escritorio por lo general son de tamaño inferior a los 300 mm³ y con capacidad reducida de procesamiento de material (por las características de procesamiento térmico del filamento). Estas impresoras son las más económicas, ya que se consideran para uso doméstico.

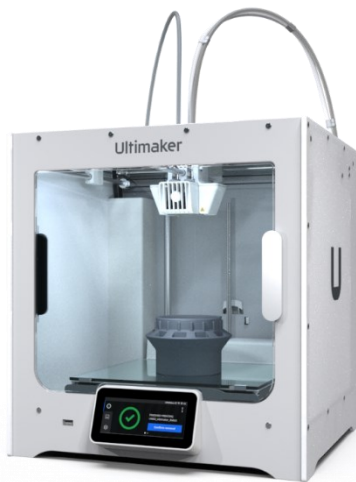
Por otro lado, las semi industriales son impresoras con dimensiones similares a las de escritorio con la diferencia que tienen una capacidad para procesar una mayor diversidad de filamentos por las características de procesamiento térmico que ofrecen estos equipos (bandeja calefactada, cámara calefactada). Estos equipos tienen un coste superior a los equipos de escritorio.

Por último, las impresoras industriales, cuyas dimensiones destacan y requieren de adecuaciones a las instalaciones ya que son de mínimo un volumen de 1000 mm³ además de ofrecer una mayor diversidad de materiales que pueden ser procesados por este tipo de

equipo, tienen características especiales para el procesamiento térmico del filamento. Estos equipos ofrecen una alta productividad y son de alto coste.

Para las simulaciones, dos impresoras fueron seleccionadas, una Ultimaker S5 (Ultimaker 2019b) y una CreatBot PEEK 300 (Henan Suwei Electronics Technology co. 2017). La Ultimaker S5 es una impresora de escritorio cuyas prestaciones incluyen bandeja calefactada y la posibilidad de imprimir la mayoría de los materiales simulados. Mientras que, la CreatBot PEEK 300, igualmente de escritorio, incluye una bandeja y cámara calefactada que permite la impresión de materiales técnicos como el PEEK.

a)



b)



Figura 27. Imagen representativa de la impresora Ultimaker S5 (a) y de la impresora CreatBot PEEK-300 (b)

Ambas impresoras se consideran de escritorio, sin embargo, por la variedad de materiales que pueden procesar se podrían considerar impresoras semi industriales y no de uso doméstico. Por un lado, la Ultimaker S5 (Figura 27a) tiene un volumen de impresión de 330 x 240 x 300 mm con un peso de 29.1 Kg y potencia máxima de impresión de 500 W. Y por el otro, la CreatBot PEEK – 300 (Figura 27b) tiene un volumen de impresión de 300 x 300 x 400 mm con un peso de 120 Kg y potencia máxima mientras imprime de 4600 W.

El enfoque de las simulaciones está orientado a empresas con bajo a medio nivel de producción, hacia la personalización de las piezas y maximización del área de impresión. El coste de las impresoras ronda entre los 6,000€ y 12,000€ por lo que no son impresoras industriales y se adaptan perfectamente a los escenarios de simulaciones previstas para verificar su integración en un ambiente de producción tipo PYME o de baja industrialización. Por ello, los materiales escogidos en las simulaciones tienen un uso industrial y así obtener resultados de costes y huella representativos de lo que su uso implicaría a nivel industrial.

4.1.4. SOFTWARE DE IMPRESIÓN

El software utilizado para simular el proceso de impresión es el Ultimaker Cura (Ultimaker 2019a). Ultimaker Cura es un software de código abierto para impresoras FDM que permite preparar las piezas antes de la impresión e incluye un sin número de especificaciones, perfiles de impresión y la inclusión de cualquier material utilizable para FDM. Además, permite previsualizar el resultado esperado de la impresión, indicando la cantidad de gramos de material que utilizará la pieza propuesta (modelo STL) y el tiempo de impresión, parámetros esenciales para simular los modelos propuestos.

Existen muchas marcas comerciales de impresoras de escritorio FDM que usan CURA como software de impresión, sin embargo, entre las impresoras semi industriales e industriales suele ser habitual el uso de su propio software, que por lo general no es de descarga libre.

Entre algunos de los bloques de parámetros que permite personalizar el software están:

- Calidad
- Paredes
- Capa superior e inferior
- Relleno
- Material
- Velocidad
- Soporte

Dentro de la calidad de impresión es posible personalizar la altura de capa y la calidad superficial de la pieza final a través del ancho de línea de las paredes interior y exterior, además del ancho de las líneas de relleno, superior e inferior y de soporte.

En lo que respecta a la personalización de las paredes, en el software, es posible determinar el ancho de las paredes y personalizar qué hacer en caso de superposición de paredes dentro de una misma impresión.

El software además permite la personalización de las capas superior e inferior de la pieza en cuanto al grosor y patrón de impresión, entre otros.

Por otro lado, el relleno se puede personalizar desde la densidad (% de relleno), patrón de relleno, área mínima de relleno, entre otras características.

En cuanto a la personalización del material se incluyen características como la temperatura del volumen de impresión, la temperatura de impresión hasta el control del flujo del filamento extruido, entre otros.

Es posible personalizar no sólo la velocidad de impresión, sino también la velocidad de extrusión del relleno, pared, soporte, entre otras. La velocidad de impresión está medida en mm/s.

La personalización del soporte está relacionada con la estructura de soporte, ángulo de voladizo del soporte, tipo de soporte, densidad del soporte (en porcentaje), entre otros.

Una vez definido o creado el equipo de impresión, Cura permite obtener una previsualización de la pieza a imprimir (una simulación) capa a capa con información de la cantidad de gramos de material que utilizará la pieza simulada y el tiempo requerido para su impresión. (ver Figura 28)

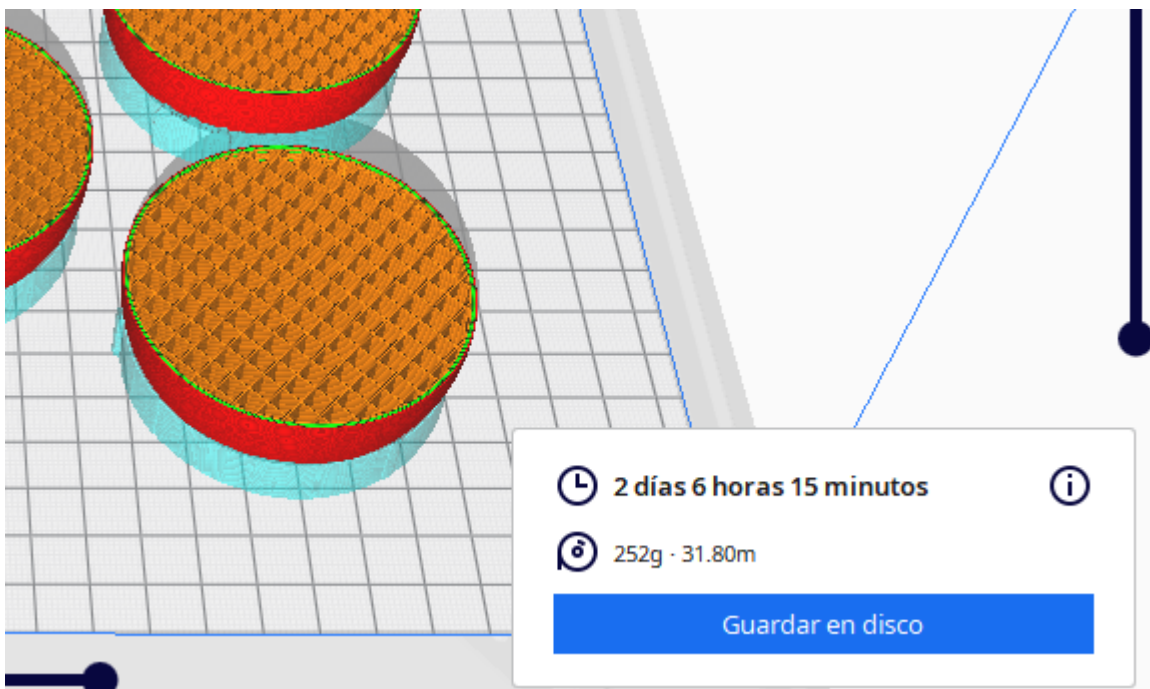


Figura 28. Ejemplo de previsualización del tiempo y gramos de material simulados en Cura

Por último, el software Cura fue escogido para las simulaciones, además de lo anteriormente expuesto, debido a la capacidad de personalizar materiales (filamentos) e impresoras FDM. Cura tiene una base de datos amplia de impresoras, normalmente de escritorio. Adicionalmente, de no aparecer la impresora deseada es posible crear una nueva con las características personalizadas.

4.1.5. PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

Dentro de todos los parámetros personalizables del software Cura para las simulaciones se ha decidido limitar el estudio al análisis del impacto que tienen las variaciones de la calidad, velocidad y relleno. Estos parámetros fueron escogidos debido a su relevancia en otros estudios como el de Hällgren, Pejryd, and Ekengren (2016) donde fueron utilizados para comparar distintos procesos de fabricación y el estudio de Vambol et al. (2021) donde a través de la variación en la temperatura, velocidad y altura de capa se midió el impacto en los parámetros estructurales requeridos en una cierta pieza.

A continuación, se describen las consideraciones particulares para cada uno de los parámetros escogidos.

- Para la calidad superficial se utilizaron alturas de capa de 0.1 mm, 0.15 mm y de 0.2 mm, independiente del tipo de material y pieza simulada.
- En cuanto a la velocidad de impresión se utilizaron intervalos de velocidad entre 20 mm/s hasta 70 mm/s dependiendo de las especificaciones técnicas y los rangos seguros de velocidad de impresión de cada material simulado.
- Por último, se escogieron porcentajes de relleno de 20%, 60% y 100% este último es igual a una pieza maciza y es independiente del tipo de material.

4.1.6. COSTES DE IMPRESIÓN

Para la validación del modelo de coste ha sido necesario plantear una serie de hipótesis en cuanto al valor de algunos bloques de coste para poder obtener un resultado de las simulaciones. A continuación, se detallan los costes que han sido establecidos, sus valores y una justificación por la cual se fijaron.

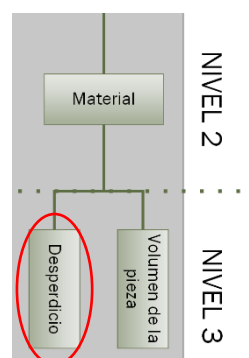


Figura 29. Bloque de coste de material

Del bloque de costes de material (Figura 29), el coste del desperdicio se fijó en un 4% del coste por gramo de material utilizado en la impresión. Esta proporción está relacionada con la

probabilidad conjunta de la ocurrencia de dos tipos de errores en la impresión (“*overhang*” y “*warping*”) (Saluja et al. 2020; Yuanbin Wang et al. 2018). Este coste de desperdicio nos permite contabilizar la posibilidad de errores en escenarios de producción de lote medio o bajo. Esta proporción, en un ámbito de producción, puede variar en función de la experiencia con el equipo de impresión al contabilizar la ocurrencia de ambos tipos de errores.

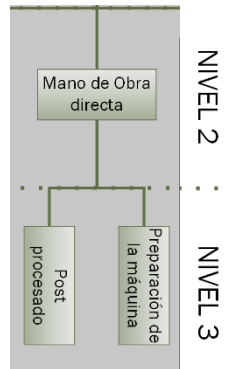


Figura 30. Bloque de coste de mano de obra

En cuanto al bloque de mano de obra (Figura 30), se fijó el coste por hora de un operador que se relaciona con el proceso de impresión en la fase de preparación de la máquina y postproceso. Este tiempo de dedicación se multiplica por 10 euros hora operario; el tiempo de dedicación se fijó en 15 min por lote para obtener un valor de coste de mano de obra en la simulación. Este coste puede variar en función de la organización y el coste de mano de obra de este tipo de actividad en un ambiente de producción.

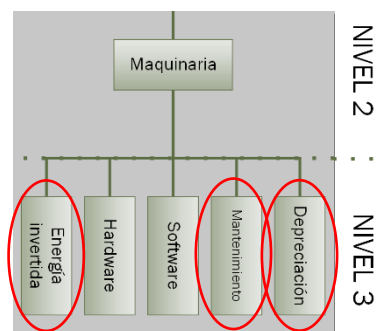


Figura 31. Bloque de coste de maquinaria

Seguidamente, en el bloque de coste de maquinaria (Figura 31) se han fijado varios costes para poder realizar la valoración de este bloque. El primero, es el coste de depreciación del equipo FDM que, para los equipos considerados en la simulación, se fijó en 5 años del valor proporcional anual de los equipos seleccionados.

El segundo de este bloque es el coste de mantenimiento que, al considerarse equipos semi industriales, se fijaron en 9% del coste de adquisición del equipo FDM simulado (Baumers et al. 2016; Yi et al. 2021).

Tercero, para el coste energético se fijó un coste por kilovatio de energía en 0.08 euros y para realizar un análisis de sensibilidad se fijó el coste por kilovatio de energía en 0.21 euros (Nasta and Diaz Fuentes 2021) para comparar el efecto del aumento del precio de la energía eléctrica.

Al no contar con una medición de potencia media de los equipos simulados y al ser un objetivo del modelo calcular los costes de impresión para escoger la mejor combinación de equipo, material y parámetros, a partir de un modelo digital (STL), se ha propuesto para las simulaciones utilizar la potencia media definida en estudios anteriores (Balogun, Kirkwood, and Mativenga 2014; Lunetto et al. 2020). Continuando con el bloque de maquinaria, el cuarto coste fijado es el del consumo de energía del equipo en reposo que se fijó en un 1% de la potencia media por el coste por kilovatio hora (Yoon et al. 2014). Este periodo de reposo está relacionado con la espera entre periodos de impresión de lotes en la impresora FDM que para las simulaciones se definió en 10 minutos.

El quinto coste fijado para las simulaciones es el coste de precalentar el sistema que se ha definido como tres cuartos de la potencia media por el periodo de precalentamiento. Este coste puede variar y va en función del equipo a utiliza y la potencia del equipo FDM

Por último, en el bloque de costes de maquinaria, se ha fijado la potencia invertida en el proceso de enfriamiento del sistema que se ha definido como 0.5 kW y duración de 30 minutos por el precio de la energía.

A continuación, la validación teórica del modelo de coste, donde se hace referencia a los costes de adquisición de la impresora, materiales y otras variables (ver Tabla 7).

4.2. CASO 1: VALIDACIÓN TEÓRICA DEL MODELO DE COSTE

Para el ABS los datos para los parámetros de impresión utilizados fueron los de la ficha técnica del fabricante Raise3D (Raise3D 2017). Para los parámetros de impresión del PEEK la ficha técnica seleccionada es la de 3D4Makers (3D4Makers 2018). Para validar el modelo ha sido necesario definir ciertas variables (ver Tabla 7):

Tabla 7. Parámetros de la simulación

	Ensayo_PEEK	Ensayo_ABS
Precio del material	700 euros / Kg	30 euros / Kg
Máquina FDM	CreatBot PEEK-300	ULTIMAKER S5
Precio de la máquina	12,000	6,000
Periodo de depreciación	5 años	
Coste de mantenimiento	9%	
Disponibilidad anual	8760 horas	
Volumen disponible (mm)	300 x 300 x 400	330 x 240 x 300
Temperatura de la cama	139° C	100° C
Temperatura de la cámara	185° C	N/A
Temperatura del hot-end	373° C	220° C
Tiempo de precalentamiento	30 min	N/A
Tiempo de enfriamiento	30 min	N/A
Velocidad e impresión	25 mm/s	
Tiempo de espera (idle)	10 min	
Potencia media (durante la impresión)	2.25 kW	0.17 kW

N/A, no aplica

Con respecto a la mano de obra se asume el salario anual de un operador de la máquina FDM en 20.800 € anuales y el tiempo de dedicación del operario en 15 min por lote. El tiempo de dedicación es en el que el operador está insertando el modelo STL en la impresora, preparando la impresión y remoción de la pieza de la bandeja de impresión.

Los resultados después de simular 12 lotes de distintos tamaños de especímenes para ensayos de tensión (Figura 20) con el PEEK se muestran en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados de las simulaciones de especímenes para ensayos con PEEK y distintos tamaños de lote

Nº de especímenes por lote	Tiempo por lote (hrs)	$C_{material}$ (€ por pieza)	$C_{mano\ de\ obra}$ (€ por pieza)	$C_{adquisición}$ (€ por pieza)	$C_{mantenimiento}$ (€ por pieza)	$C_{energía}$ (€ por pieza)	Coste por pieza (€)
1	1.03	4.79	2.50 €	0.28	0.03	0.48	8.08 €
2	2.05	4.79	1.25 €	0.28	0.03	0.4	6.75 €
3	3.08	4.79	0.83 €	0.28	0.03	0.37	6.30 €
4	4.1	4.79	0.63 €	0.28	0.03	0.36	6.08 €
5	5.25	4.79	0.50 €	0.29	0.03	0.36	5.96 €
6	6.27	4.79	0.42 €	0.29	0.03	0.35	5.87 €
7	7.3	4.79	0.36 €	0.29	0.03	0.35	5.81 €
8	8.32	4.79	0.31 €	0.28	0.03	0.34	5.76 €
9	9.35	4.79	0.28 €	0.28	0.03	0.34	5.72 €
10	10.48	4.79	0.25 €	0.29	0.03	0.34	5.70 €
11	11.52	4.79	0.23 €	0.29	0.03	0.34	5.67 €
12	12.53	4.79	0.21 €	0.29	0.03	0.34	5.65 €

Los resultados de las simulaciones utilizando ABS se pueden ver en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultado de las simulaciones con ABS

Nº de especímenes por lote	Tiempo por lote (hrs)	$C_{material}$ (€ por pieza)	$C_{mano\ de\ obra}$ (€ por pieza)	$C_{adquisición}$ (€ por pieza)	$C_{mantenimiento}$ (€ por pieza)	$C_{energía}$ (€ por pieza)	Coste por pieza (€)
1	1.00	0.24 €	2.50 €	0.14 €	0.01 €	0.03 €	2.92 €
2	2.03	0.24 €	1.25 €	0.14 €	0.01 €	0.02 €	1.67 €
3	3.05	0.24 €	0.83 €	0.14 €	0.01 €	0.02 €	1.25 €
4	4.07	0.24 €	0.63 €	0.14 €	0.01 €	0.02 €	1.04 €
5	5.08	0.24 €	0.50 €	0.14 €	0.01 €	0.02 €	0.91 €
6	6.12	0.24 €	0.42 €	0.14 €	0.01 €	0.02 €	0.83 €
7	7.13	0.24 €	0.36 €	0.14 €	0.01 €	0.02 €	0.77 €
8	8.15	0.24 €	0.31 €	0.14 €	0.01 €	0.02 €	0.73 €
9	9.17	0.24 €	0.28 €	0.14 €	0.01 €	0.02 €	0.69 €
10	10.2	0.24 €	0.25 €	0.14 €	0.01 €	0.02 €	0.66 €
11	11.22	0.24 €	0.23 €	0.14 €	0.01 €	0.02 €	0.64 €
12	12.25	0.24 €	0.21 €	0.14 €	0.01 €	0.02 €	0.62 €

Los resultados sugieren que, al igual que en la fabricación tradicional, al aumentar el número de piezas por lote, el coste por pieza disminuye debido a que el $C_{mano\ de\ obra}$ se distribuye entre el lote. El $C_{mano\ de\ obra}$ es proporcional al número de piezas impresas. El $C_{material}$ en ambos ensayos se mantuvo igual debido a no haber cambios en el volumen de la pieza simulada. Existe poca variación por lote en $C_{adquisición}$ y $C_{mantenimiento}$ debido a la depreciación proporcional del equipo.

A continuación, se procede a mostrar gráficamente los resultados obtenidos con ambos materiales para facilitar su análisis. En la Figura 32 se presenta la distribución porcentual de los costes para un mejor análisis de los resultados. Además, se selecciona un tamaño de lote para realizar un análisis de Pareto de los costes en los ensayos con PEEK. Concretamente se elige un tamaño de lote de 8 piezas porque como se puede ver en la Figura 32, a partir de ese número los costes tienden a estabilizarse.

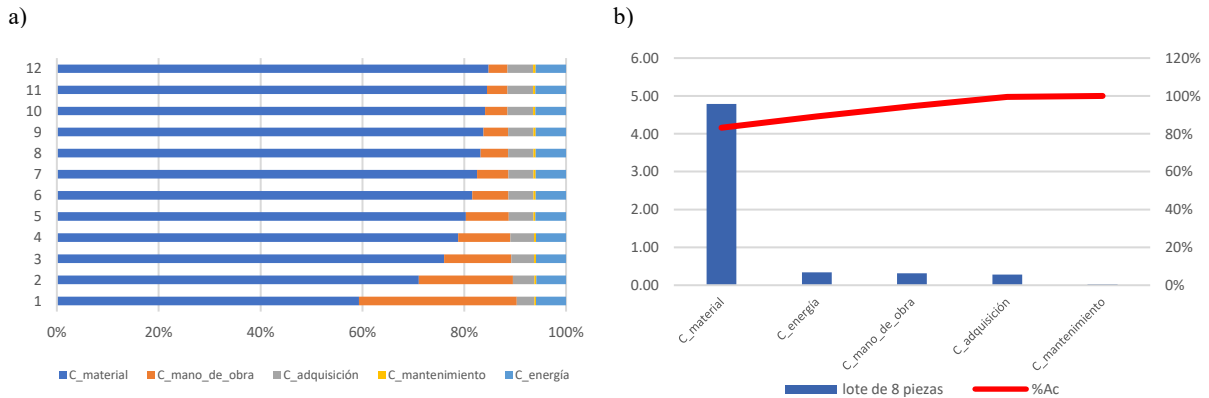


Figura 32. Fuente de costes y peso porcentual (a) y gráfico de Pareto para 8 piezas por lote (b) para los ensayos con PEEK

En el análisis de Pareto Figura 32b para el ensayo con PEEK se muestra que el $C_{material}$ representa más del 80% de las fuentes de coste, mientras que el $C_{mantenimiento}$ no representa ni un 1 % de los costes por pieza, de acuerdo con las asunciones de partida. Como se puede observar en la Figura 32a el $C_{energía}$ mantiene constante su proporción a pesar del tamaño del lote.

En la Figura 33 se representa el coste unitario por lote y fuente de coste en los ensayos con PEEK.

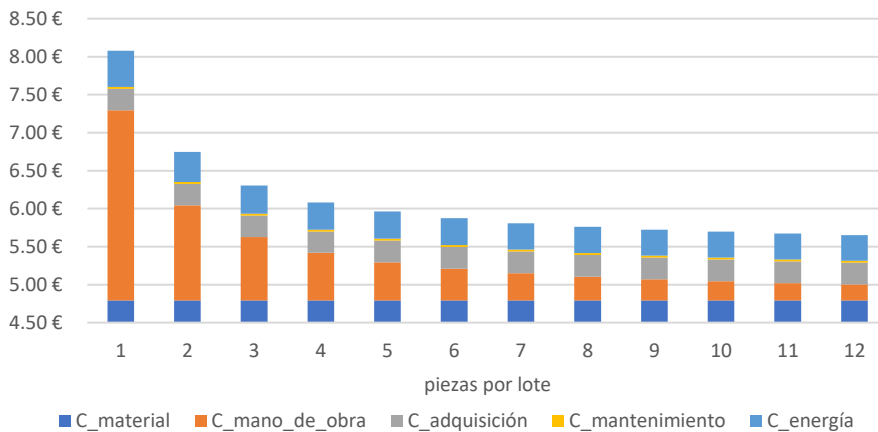


Figura 33. Coste unitario y fuente de coste por tamaño de lote para ensayos con PEEK

En la Figura 33 se constata cómo se reduce el coste unitario por lote a medida que el número de piezas por lote aumenta. El $C_{material}$ notablemente disminuye de manera relativa con respecto al tamaño del lote, mientras que los $C_{energía}$, $C_{material}$ y $C_{adquisición}$ no varían o su variación es mínima con respecto al tamaño del lote. Por tanto, la variación del $C_{mano\ de\ obra}$ se convierte en dominante.

Por otro lado, para los ensayos en ABS en la Figura 34 se muestra la distribución porcentual de los costes por fuente y un análisis de Pareto, por fuente de coste, del lote de 8 especímenes.

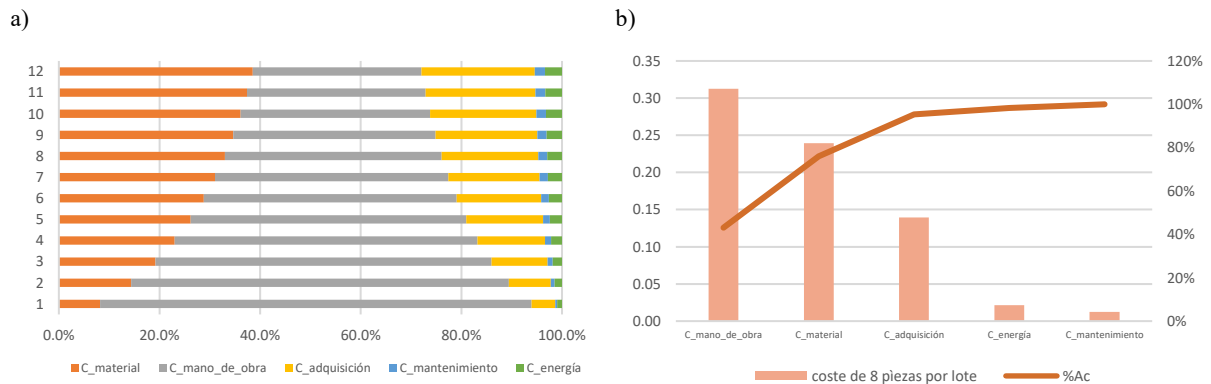


Figura 34. Fuente de costes y peso porcentual (a) y gráfico de Pareto para 8 piezas por lote (b) para los ensayos con ABS

En la Figura 34b, a través del gráfico de Pareto, resaltan el $C_{mano\ de\ obra}$ y el $C_{material}$ como las principales fuentes de coste con alrededor del 76%. Por otro lado, en la Figura 34a se muestra como todas las fuentes de coste aumentan en relación con el tamaño del lote, excepto $C_{mano\ de\ obra}$, por la repercusión de este coste por pieza. Es decir, la estructura de costes es significativamente diferente con respecto al caso basado en el uso del material PEEK.

El coste unitario por fuente de coste y tamaño de lote se representa en la Figura 35.

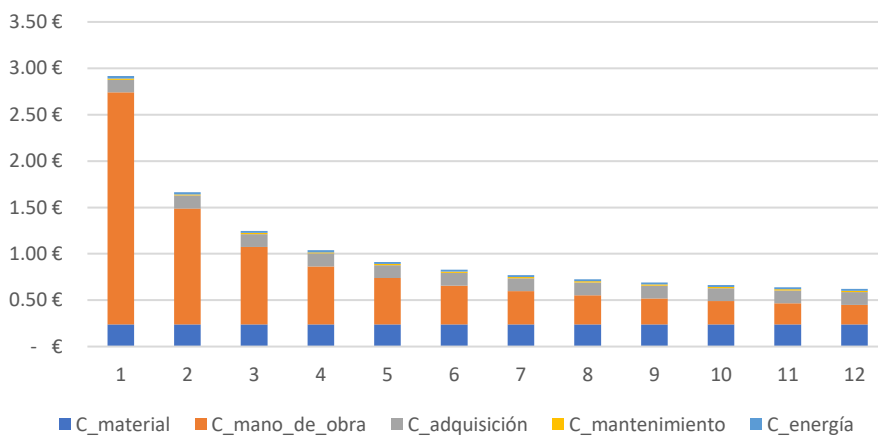


Figura 35. Coste unitario y fuente de coste por tamaño de lote para ensayos con ABS

Es posible observar que los $C_{mano\ de\ obra}$, $C_{material}$ y $C_{adquisición}$ tienen la mayor participación en el coste unitario de los especímenes fabricados con ABS. En este caso y comparado con el PEEK, el $C_{energía}$ no tiene mayor participación en el coste unitario.

Comparando ambos materiales, los $C_{energía}$ y $C_{mano\ de\ obra}$ son dependientes del volumen de producción. Además, se puede destacar que en cuanto al $C_{material}$ en el PEEK es aproximadamente 20 veces más que con el ABS y el $C_{energía}$ es 16 veces mayor con el PEEK.

Para identificar el ahorro en coste por material y tamaño del lote se muestra en la Figura 36.

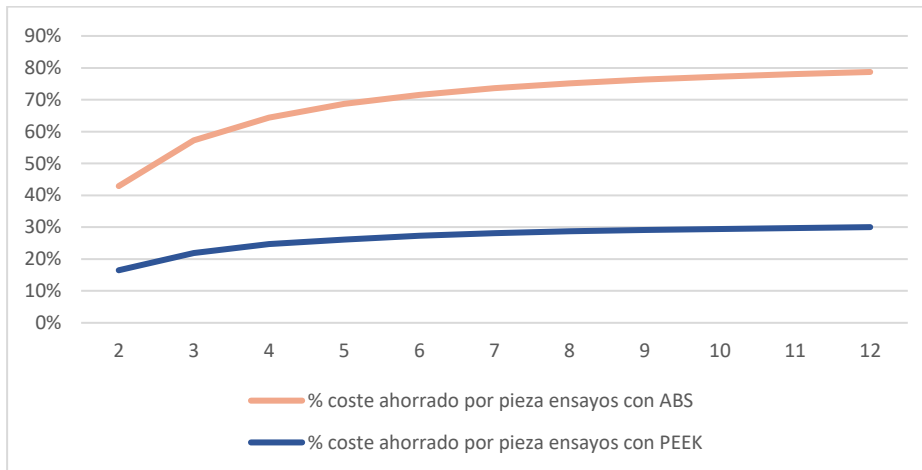


Figura 36. Porcentaje de ahorro por material y tamaño del lote con respecto a un lote unitario

En la Figura 36 se puede identificar como en los ensayos con ABS es más evidente el ahorro en coste con el aumento del tamaño del lote. Mientras que en el PEEK el ahorro por pieza se convierte en una línea constante a pesar de incrementar el tamaño del lote desde 5 piezas, además, no es, sino a partir, de un tamaño de lote de 8 piezas que la curva de ahorro por pieza no empieza a aplanarse en el tiempo en ambos materiales. Esto podría indicar la serie mínima rentable que se tiene en el proceso (Lambán Castillo 2010), es decir, el mínimo número de piezas que se deben de fabricar para poder compensar costes improductivos de preparación previo a la fabricación como tal.

Por las diferencias en el $C_{energía}$ entre ambos materiales a continuación se presenta un análisis particular de esta fuente de coste.

4.2.1. ANÁLISIS DEL CONSUMO ENERGÉTICO

El coste energético está ganando relevancia en el ámbito de la fabricación (Kavvadias 2016). Las investigaciones relacionadas con la energía están encaminadas hacia la identificación de nuevas fuentes y la compatibilidad ambiental de las mismas. Por otro lado, las previsiones de precios de la energía se han mostrado al alza en la última década (Lu et al. 2021).

Para analizar el efecto de los costes energéticos en ambos ensayos se propone un análisis de sensibilidad utilizando dos precios distintos de la energía. El primer precio por kW de 0.08

€ es el utilizado en la validación del modelo y el precio de la energía para uso industrial para el análisis de sensibilidad de 0.21 € (Nasta and Diaz Fuentes 2021). (ver Figura 37)

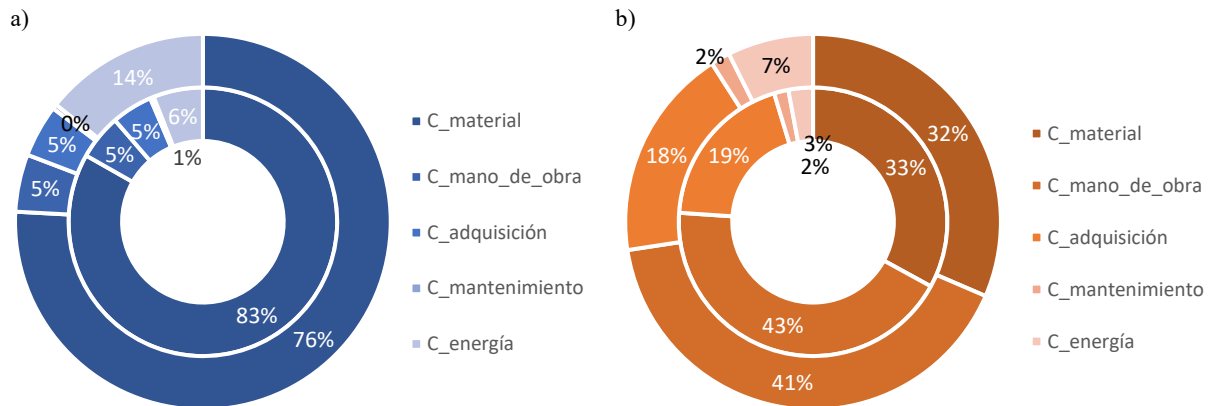


Figura 37. Comportamiento de los pesos ante variación de precios en ensayo con PEEK (a) y en ensayos con ABS (b)

En el anillo interior se representan los pesos de las fuentes de costes con precio de la energía de 0.08 €/kWh y en el anillo exterior se representan los pesos de las fuentes de coste del modelo con precio de la energía de 0.21 €/kWh.

En el ensayo con PEEK el peso del coste de material disminuye un 7% entre las otras fuentes de coste. Por el contrario, en el ensayo con ABS los pesos en las fuentes de coste varían proporcionalmente un 1% excepto el $C_{energía}$ que se ve incrementado en un 4%.

La estructura de costes de los ensayos con PEEK y ABS son distintos. El $C_{material}$ en el ensayo con PEEK es la fuente de coste más relevante seguido por el $C_{energía}$ por la relación entre el material y la energía necesaria para procesarlo con la tecnología FDM. Por otro lado, la estructura de costes en el ensayo con ABS está distribuida proporcionalmente entre todas las fuentes de costes, a excepción del $C_{mantenimiento}$ y $C_{energía}$. El ABS no necesita funciones especiales en el equipo de impresión como el PEEK. Además, el $C_{mano\ de\ obra}$ es el coste proporcionalmente mayor en los ensayos con ABS. El $C_{mano\ de\ obra}$ es la fuente de coste que podría impactar aún más que el $C_{energía}$.

4.3. CASO 2: VALIDACIÓN TEÓRICA DEL MODELO PARA EL CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO

Para la aplicación del modelo se propone simular la impresión de distintas piezas utilizando varios materiales. Como fue detallado en la sección 5.1, para la simulación se propone utilizar

el software CURA de Ultimaker (Ultimaker 2019a) y a continuación una lista de los elementos considerados en la simulación.

- a. Equipo de impresión capaces de fabricar los materiales escogidos
- b. Materiales con diversas características
- c. Diversos parámetros de impresión ajustados a cada material e impresora
- d. Piezas con características definidas

Se propone hacer dos simulaciones, una primera simulación utilizando diversos materiales en una misma pieza, con distintas orientaciones. Y una segunda simulación considerando piezas con distintos volúmenes y orientaciones; con distintas impresoras por las características de la selección de material.

4.3.1. SIMULACIÓN SEGÚN MATERIAL DE IMPRESIÓN

En esta primera simulación la impresora seleccionada es una Ultimaker S5 (Ultimaker 2019b) cuyas características son capaces de procesar los materiales seleccionados. El objetivo de esta primera simulación es el de analizar si el modelo tiene la capacidad de calcular y comparar la huella de carbono en el proceso de impresión utilizando la tecnología FDM con diferentes materiales. En la Tabla 10 se listan los materiales seleccionados por características y dificultad de procesado en una impresora FDM.

Tabla 10. Materiales seleccionados por dificultad y características de impresión

Material	Dificultad para imprimir	Temperatura de fusión (K)	Temperatura bandeja de impresión (K)	Capacidad calorífica específica (kJ/kgK)
PLA	Baja	433	333	1.8
PETG	Baja	513	333	1.2
ABS	Media	473	373	1.2
TPU	Alta	490	333	1.2
PP	Alta	433	358	1.8

Los filamentos fueron seleccionados según la diversidad de la dificultad de impresión, características de fabricación y aplicaciones de los materiales.

A continuación, se describen las hipótesis de trabajo del proceso de fabricación consideradas en esta simulación. Fue seleccionada una boquilla de 0.4 mm para el proceso de impresión. La geometría seleccionada es un espécimen para ensayos de tensión basado en el estándar (ASTM D638-14 2016) (ver Figura 38)

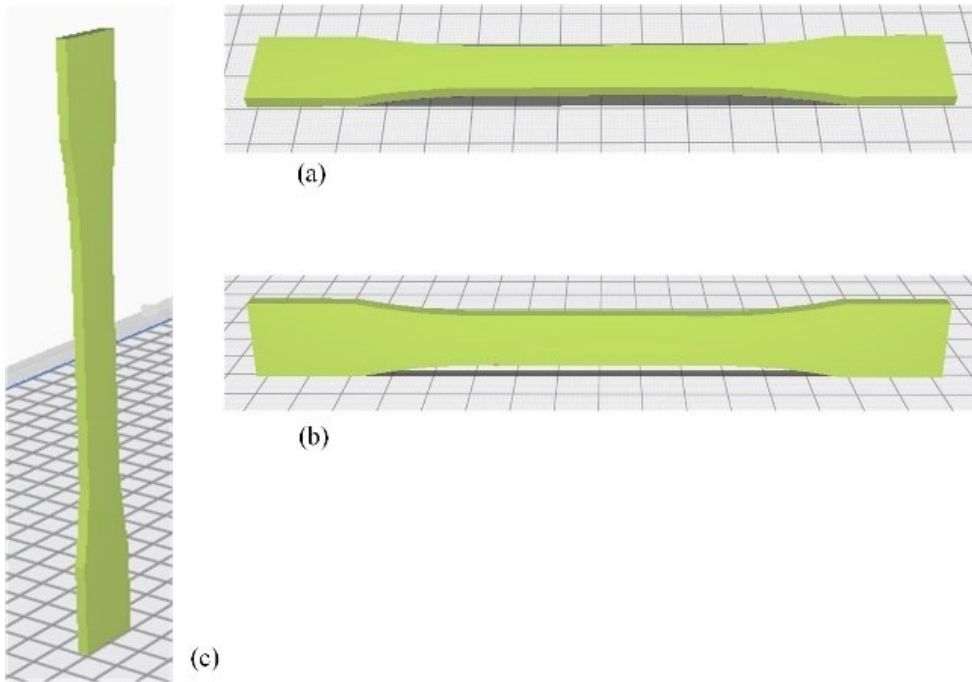


Figura 38. *Espécimen con orientación A (a). Espécimen con orientación B (b). Espécimen con orientación C (c)*

El espécimen con la orientación A es el que tiene la mayor superficie descansando sobre la bandeja de impresión (Figura 38a). El espécimen con orientación B tiene la cara lateral descansando sobre la superficie de la bandeja de impresión (Figura 38b). Por último, el espécimen con orientación C es el que tiene el área superficial más pequeña descansando sobre la superficie de la bandeja de impresión (Figura 38c).

Algunos estudios han demostrado la importancia que tiene la orientación de la pieza en el proceso de impresión y el impacto relacionado con el coste (Alexander et al. 1998), pérdidas energéticas (Song and Telenko 2017) y propiedades mecánicas (Solomon, Sevel, and Gunasekaran 2020). Según las prestaciones mecánicas buscadas, balanceadas con la altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno, cualquier usuario de FA podría compensar prestaciones mecánicas con cualquiera de los parámetros anteriormente mencionados.

A continuación, se listan los materiales seleccionados y las velocidades escogidas de entre el rango propuesto por los fabricantes (ver

Tabla 11).

Tabla 11. Velocidades de impresión escogidas por material

Material	0.03 m/s	0.045 m/s	0.06 m/s	0.09 m/s
PLA	X	X		X
PETG			X	X
ABS	X	X		X
TPU	X	X		
PP	X	X		

Para simular un ambiente de trabajo en el que el equipo FDM esté operando se asumen 298 K de temperatura. Además, los especímenes estarán posicionados en medio de la bandeja de impresión. No se consideró material extra adherido a la bandeja de impresión que evitan defectos de fabricación. Sólo se considera la masa del material utilizado en la impresión del espécimen.

Los materiales seleccionados fueron comparados desde el punto de vista del desempeño energético y su orientación en la bandeja de impresión. Entre los hallazgos se comprobó, tal y como era esperable, que el desempeño energético varía con respecto al material elegido. En la Figura 39 se puede observar como el ABS y el PP tienen los mayores valores de consumo energético, independiente de la posición en la que se encuentran las piezas impresas.

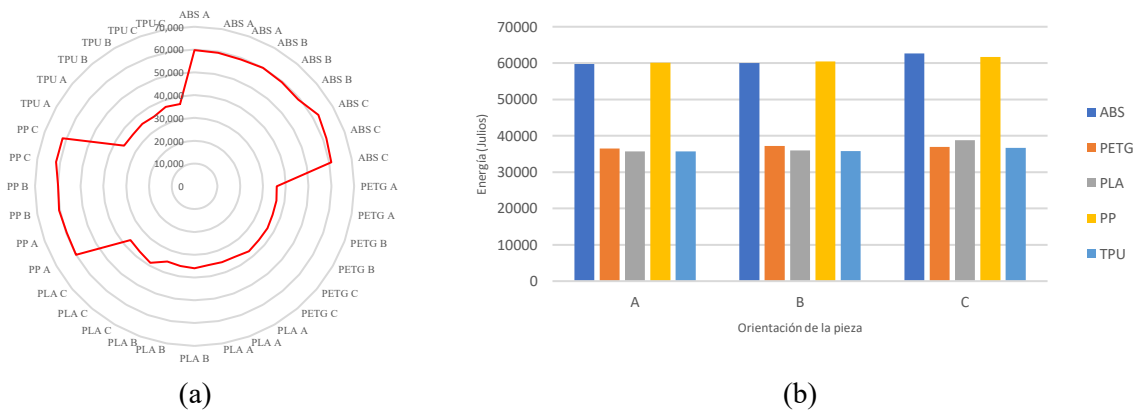


Figura 39. Comparación entre material y desempeño energético (a). Máxima E_{FDM} por material y orientación de la pieza (b)

El peor desempeño energético en esta simulación resulta en la impresión del espécimen en la orientación C comparado con las otras dos posiciones simuladas. (ver Figura 39b)

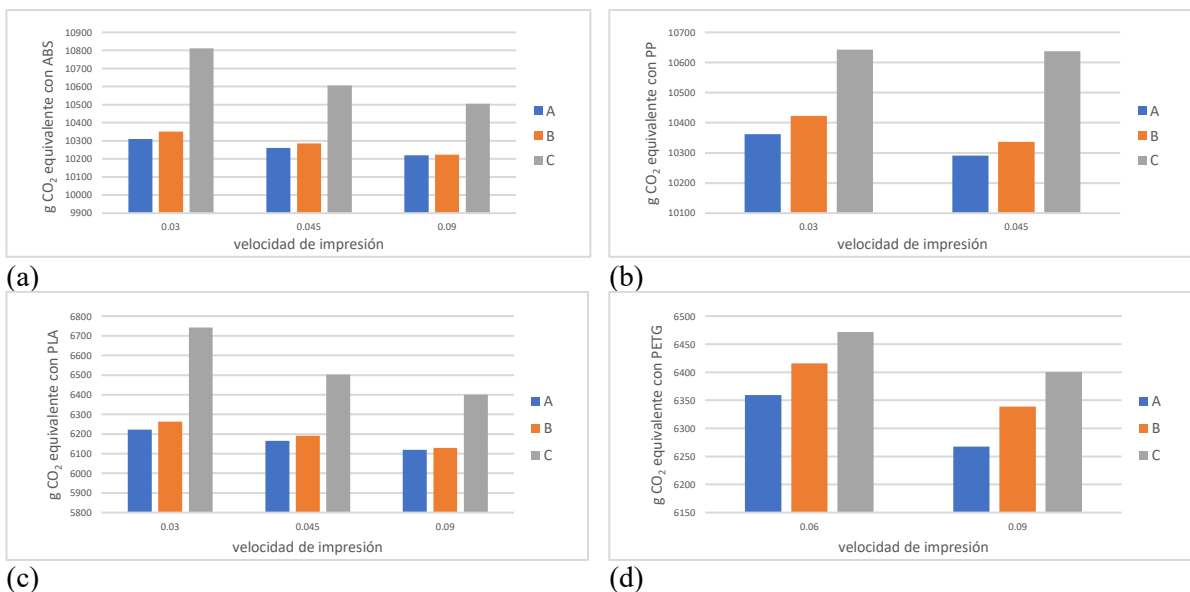
Por otro lado, el PP y el ABS tienen el peor desempeño energético con 61.4 kJ y 62.7 kJ respectivamente, comparado con los resultados del TPU con el mejor desempeño energético con 35.3 kJ. De todos los casos simulados el peor desempeño energético resulta de utilizar el ABS como material de impresión y el espécimen en la orientación C con la más baja velocidad

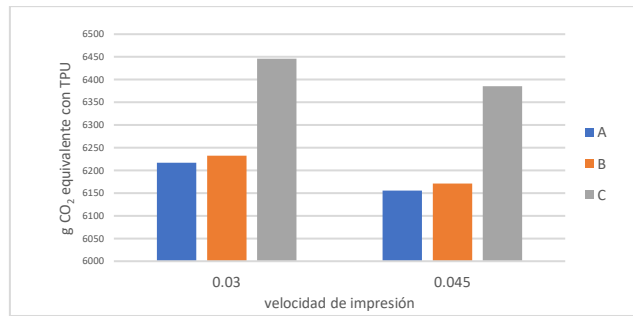
de impresión de 0.03 m/s. Sin embargo, la energía invertida en la fabricación con TPU es 59% lo que se invirtió en el ABS en la misma orientación y velocidad de 0.03 m/s. En ese mismo orden de ideas, y analizando otros materiales, la energía invertida fabricando el espécimen en la orientación C con el PLA es 62.9% la energía invertida con el PP a una velocidad de 0.03 m/s en ambos materiales. Además, los especímenes fabricados con PLA y PETG tienen un desempeño energético similar, entre 35 kJ y 36 kJ con una velocidad de 0.09 m/s. El desempeño energético, por ende, la huella de carbono al producir una pieza es dependiente del material escogido y las características de impresión. Los datos utilizados para hacer una comparativa de los resultados se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. E_{FDM} calculado por velocidad de impresión y orientación del espécimen

Material velocidad ($\frac{m}{s}$)/ orientación	E_{FDM} (kJ)																	
	PLA			PETG			ABS			TPU			PP					
	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C			
0.03	35.7	35.9	38.8				59.8	60.0	62.7	35.7	35.8	37.0	60.0	60.4	61.7			
0.045	35.4	35.5	37.3				59.4	59.6	61.5	35.3	35.4	36.6	59.6	59.9	61.7			
0.06				36.5	36.8	37.2												
0.09	35.1	35.2	36.7	36.0	36.4	36.7	59.2	59.2	60.9									

Una de las principales fuentes de emisiones de CO₂ es la energía consumida durante el proceso de impresión utilizando FDM. Es por esta razón que el CO₂ equivalente corresponderá con el desempeño energético. Existe una diferencia significativa entre los gramos de CO₂ equivalente que se emitirían con el espécimen en la posición C con respecto a las otras dos orientaciones. (ver Figura 40)





(e)

Figura 40. Gramos de CO₂ equivalente por velocidad y orientación del espécimen con ABS(a), PP(b), PLA(c), PETG(d) y TPU€

Como se puede evidenciar, el comportamiento de los materiales es consistente en todas las velocidades de impresión. La menor emisión está relacionada con la fabricación del espécimen en la orientación A, seguido por la orientación B del espécimen y la máxima emisión de CO₂ equivalente está relacionada con el espécimen en la orientación C.

Un efecto lógico que ocasiona una variabilidad en el consumo energético es el relacionado con el tiempo de impresión que, comparado con las tres posiciones, de media en la orientación C del espécimen, es mayor. (ver Figura 41)

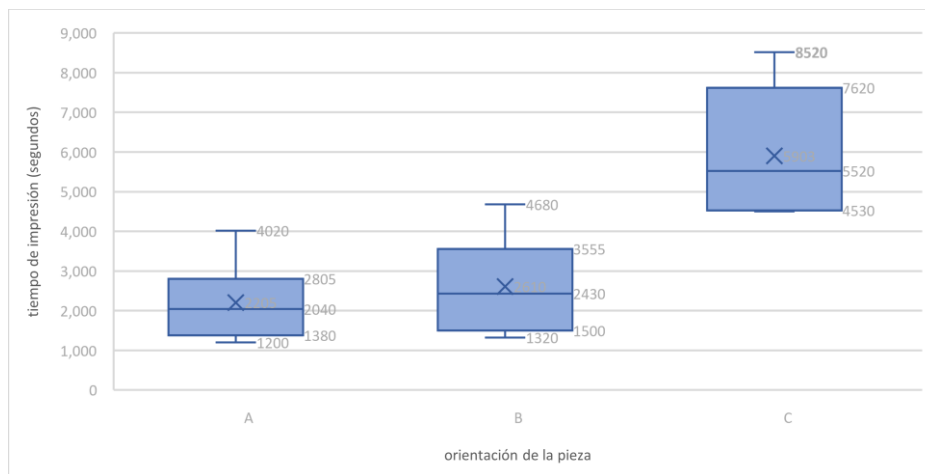


Figura 41. Promedio de tiempo de impresión por orientación del espécimen.

Entre todas las variables analizadas el tiempo de impresión eleva la emisión de CO₂ equivalente debido a la continua operación de la máquina FDM.

4.3.2. SIMULACIÓN SEGÚN TIPOLOGÍA DE PIEZA

En esta segunda simulación basada en el modelo propuesto para el cálculo de la huella de carbono, se proponen simular la fabricación de dos tipos de piezas y una de ellas en distintas posiciones. Además, se propone, para la simulación, tres tipos de materiales utilizando el

software CURA de Ultimaker, en impresora Ultimaker S5 (Ultimaker 2019a, 2019b) y CreatBot PEEK300 de CreatWare (Henan Suwei Electronics Technology co. 2017). El objetivo de esta segunda simulación es evaluar el comportamiento del modelo propuesto al comparar diferentes tipologías de piezas y condiciones de impresión. Las propiedades y parámetros de impresión escogidos para la simulación se muestran en la Tabla 13.

Tabla 13. Materiales escogidos y sus parámetros de impresión para la simulación según tipología de pieza

Materiales	ABS	PLA	PEEK	Unidades
densidad	1.1	1.2	1.3	g/cm ³
diámetro	2.85	2.85	2.85	mm
temperatura de impresión	255	200	350	°C
Temperatura de la cámara de impresión			100	°C
temperatura de la bandeja de impresión	100		120	°C

Las propiedades del material están basadas en las especificaciones técnicas del fabricante de filamentos Raise3D (Raise3D 2017, 2022) para el ABS y el PLA y Victrex (Victrex High Performance Polymers 2019) para el PEEK. Otros parámetros de impresión fueron tomados en cuenta para hacer una combinación de ellos y obtener 486 resultados que serán utilizados para el análisis. En la Tabla 14 se muestran las variables y datos utilizados para cada simulación.

Tabla 14. Parámetros de impresión utilizados para la simulación según tipología de pieza

Relleno (%)	Altura de capa (mm)	Velocidad con ABS y PLA (mm/s)	Velocidad con PEEK (mm/s)
20	0.10	30	20
60	0.15	50	25
100	0.20	70	30

En la sección 5.2.1. la simulación está orientada a validar el modelo para el cálculo de la huella de carbono utilizando distintos materiales con variadas necesidades térmicas para su impresión. Para esta simulación se propone validar el modelo para el cálculo de la huella de carbono simulando la impresión de piezas con distintas geometrías y posiciones, además de comprobar la efectividad del modelo ante diversos parámetros de impresión. Para aprovechar el volumen de impresión de las máquinas seleccionadas se simularon 12 piezas por lote; utilizando una combinación de los parámetros de impresión, posición de la pieza, la utilización o no de material de soporte (dependiendo de la posición) y volumen de la pieza.

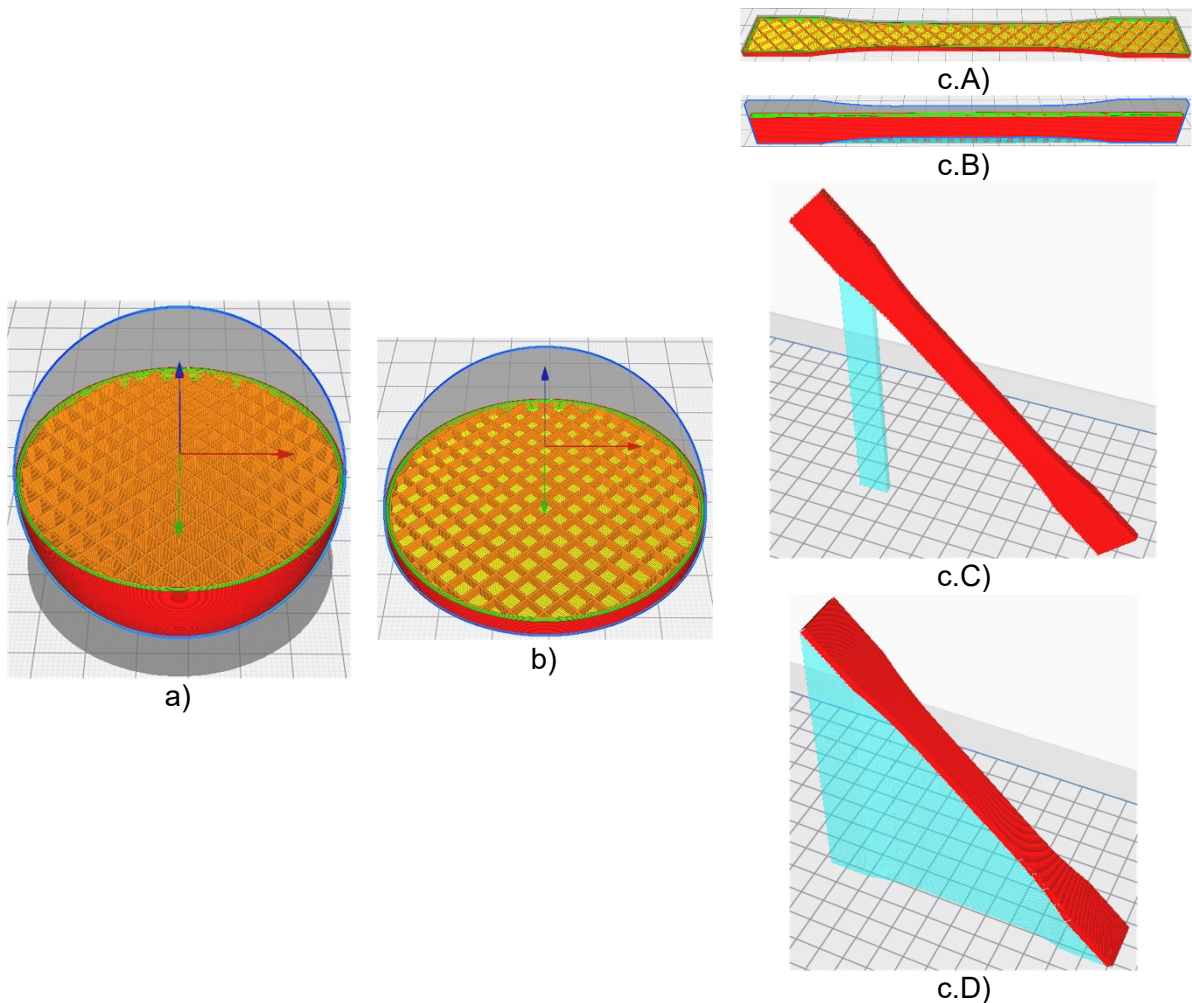


Figura 42. Piezas utilizadas en la 2da simulación, a) esfera cortada a 45° de su tangente, b) media esfera, c) espécimen para ensayos de tensión en la posición A, B, C y D.

Tres tipos de piezas fueron seleccionados. La primera, un espécimen utilizado para ensayos de tensión (ASTM D638-14 2016) colocado en cuatro posiciones distintas (Ver Figura 42cA, cB, cC, y cD). Además, una esfera cortada a 45° de su tangente con respecto al plano X, de ahora en adelante la pieza CEs (ver Figura 42a). Por último, una semi esfera, de ahora en adelante Ses, que al igual que la pieza CEs tiene un diámetro de 65 mm (ver Figura 42b).

Como ha sido mencionado en la sección 5.1 del marco metodológico de las simulaciones, se han escogido figuras con distintos volúmenes y posiciones para comprobar los modelos propuestos y validar su implementación.

En el anexo B se incluye, una descripción exhaustiva de las simulaciones realizadas por pieza y material. A continuación, se describen los resultados al aplicar el modelo propuesto y su efecto en los lotes de piezas.

Inicialmente, la media de emisiones en Kg de CO₂ equivalente de los especímenes por material se muestra en la Figura 43.

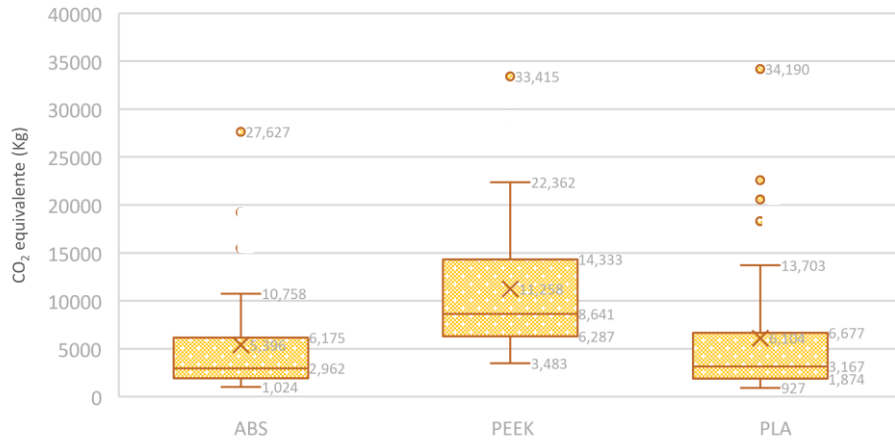


Figura 43. Promedio de emisiones de CO₂ equivalente de los especímenes por cada material.

En los especímenes simulados, la variabilidad de las emisiones en el PEEK es mayor que la variabilidad de las emisiones promedios del ABS y el PLA. Además, la diferencia entre los cuartiles de PLA y ABS es de aproximadamente un 7% manteniendo una variabilidad similar en las emisiones promedio.

Seguidamente, los resultados de las emisiones promedio por material utilizado en la pieza CEs (ver Figura 44).

Es posible observar que el promedio de emisiones de las piezas CEs utilizando el PEEK es por lo menos 5 veces más que las emisiones promedio con el mismo material en los especímenes para ensayo de tensión. Además, se observa una similitud con la variabilidad presentada en los especímenes fabricados con ABS y PLA.

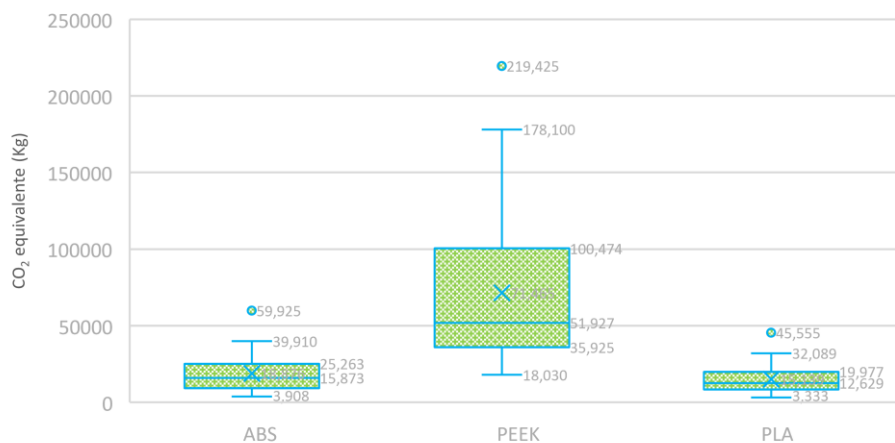


Figura 44. Promedio de emisiones de CO₂ equivalente de la pieza CEs por cada material.

Por último, los resultados de las emisiones promedio con la pieza Ses son presentados en la Figura 45.

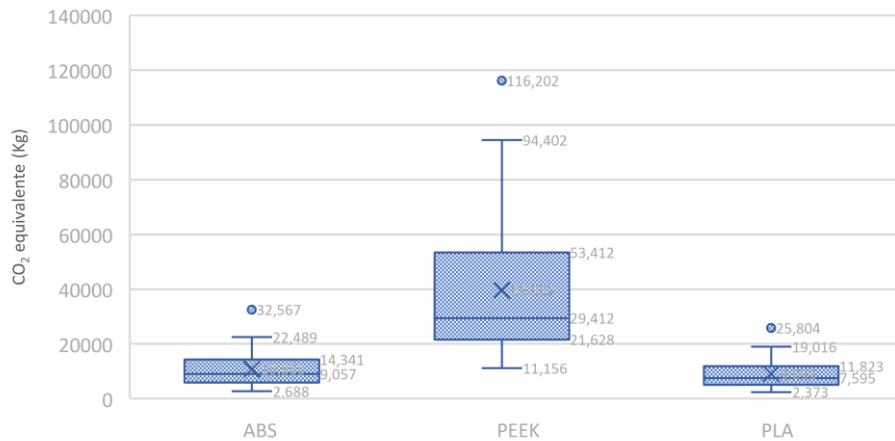


Figura 45. Promedio de emisiones de CO₂ equivalente de la pieza Ses por cada material.

Se puede observar el mismo comportamiento de emisiones promedio que con los resultados mostrados en las Figuras 39 y 40. Sin embargo, con respecto a las emisiones promedio de los especímenes es hasta 2.5 veces mayor. Por otro lado, con respecto a las emisiones promedio de la pieza CEs es un poco más de la mitad.

Para la evaluación del modelo se han escogido piezas con distintos volúmenes, esto hace difícil la comparativa de las emisiones por pieza. Se podrían proponer distintas métricas para normalizar la medición de las emisiones, como, por ejemplo:

- a. Emisiones por volumen geométrico
- b. Emisiones por volumen ocupado de la bandeja de impresión
- c. Emisiones por área de la pieza proyectada en la bandeja

El cálculo de las emisiones por volumen geométrico considera las emisiones por volumen geométrico de la pieza o del lote de piezas dispuesto en la bandeja de impresión. Este método para evaluar la efectividad del modelo para el cálculo de la huella de carbono no considera la subutilización del volumen total de impresión, por el contrario, sólo toma en consideración las emisiones de las piezas impresas sin castigar la subutilización del volumen de impresión.

Por otro lado, para evaluar la efectividad del modelo considerando las emisiones por volumen de la bandeja de impresión, estaría castigando la subutilización del volumen total de impresión, por ejemplo, si la pieza impresa fuera plana con pocos milímetros de altura. Sin embargo, este método, si fuera el objetivo, podría decirnos cuánto se ha aprovechado la bandeja de impresión con respecto a las emisiones producidas.

Por último, el método de cálculo de las emisiones por área de la pieza proyectada en la bandeja de impresión para evaluar el modelo, podría decirnos las emisiones con respecto al

aprovechamiento del área total de la bandeja de impresión. Sin embargo, este método sólo podría indicar las emisiones por el grado de aprovechamiento del área de impresión sin considerar el volumen total de impresión.

En este caso se ha escogido la comparación de las emisiones por volumen geométrico por su practicidad y orientación directa hacia el lote de piezas impreso. Esta consiste en las emisiones de CO₂ equivalente por unidad de volumen teórico de pieza por lote (suponiendo que es maciza). Por ejemplo, el volumen del espécimen en la posición D es de 8.21 cm³ y las emisiones de CO₂ equivalente utilizando PLA con velocidad de impresión de 30 mm/s, altura de capa de 0.1 mm y relleno del 100% es de aproximadamente 34 Ton de CO₂. Las emisiones por volumen geométrico son de alrededor de 4 Ton de CO₂ por cm³. A continuación, los resultados de las emisiones por volumen geométrico desde la perspectiva de los parámetros simulados. El primer parámetro presentado es la altura de capa, estos son los resultados de las emisiones por volumen geométrico (ver Figura 46).

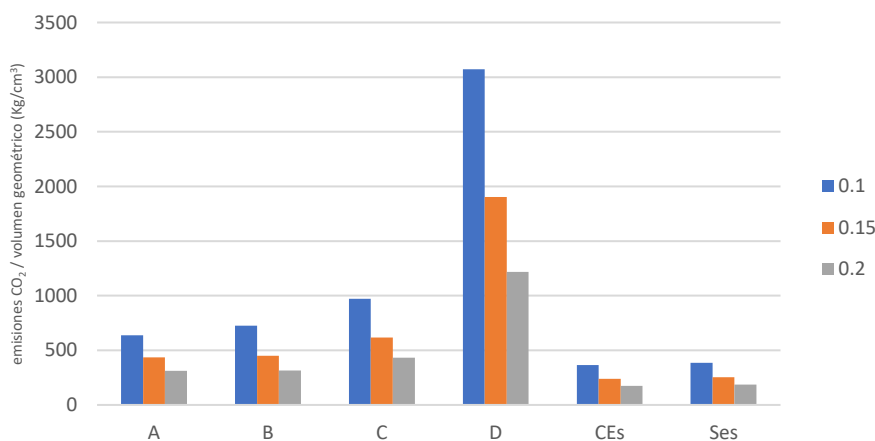


Figura 46. Emisiones de CO₂ equivalente por volumen geométrico por altura de capa.

Las emisiones por volumen geométrico del espécimen en la posición D, son mayores a las encontradas en las otras piezas simuladas. Esto es así ya que, para obtener el mismo volumen final de pieza, se está gastando mucho más material como soporte. Entre los especímenes se observa una tendencia creciente. Entre el espécimen en la posición A y la posición B el crecimiento de las emisiones por volumen de pieza es de alrededor del 12%. Mientras que, entre el espécimen en la posición B y C el crecimiento es de alrededor del 25%. Por otro lado, entre alturas de capas, las emisiones de CO₂ equivalente para una altura de capa de 0.2 mm es de casi la mitad de las emisiones obtenidas con una altura de 0.1 mm.

Seguidamente, las emisiones por volumen geométrico de todas las piezas por porcentaje de relleno. (ver Figura 47)

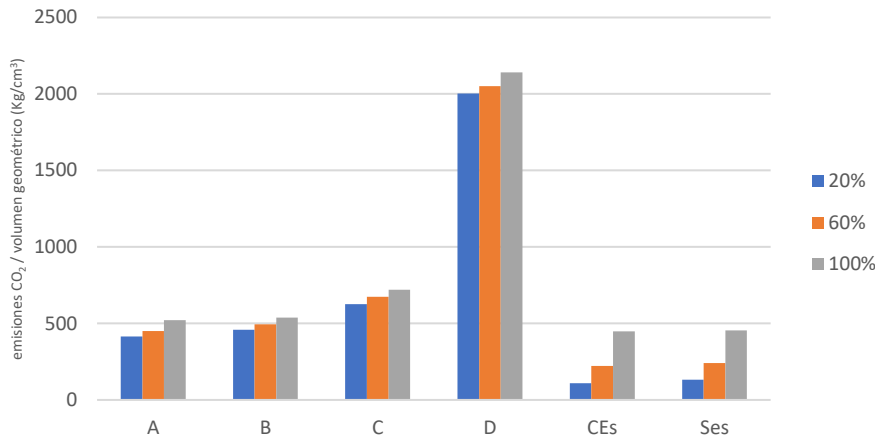


Figura 47. Emisiones de CO₂ equivalente por volumen geométrico por porcentaje de relleno.

Por un lado, en los especímenes, los cambios entre porcentajes de relleno van de un 2% hasta un 8% aproximadamente dependiendo de la posición del espécimen. Por el otro, en las piezas con mayor volumen (CEs y Ses) las emisiones por volumen geométrico aumentan un 50% por cambios en el porcentaje de relleno. A más porcentaje de relleno, mayores son las emisiones por volumen geométrico.

Por último, las emisiones por volumen geométrico de todas las piezas simuladas por las velocidades consideradas (ver Figura 48).

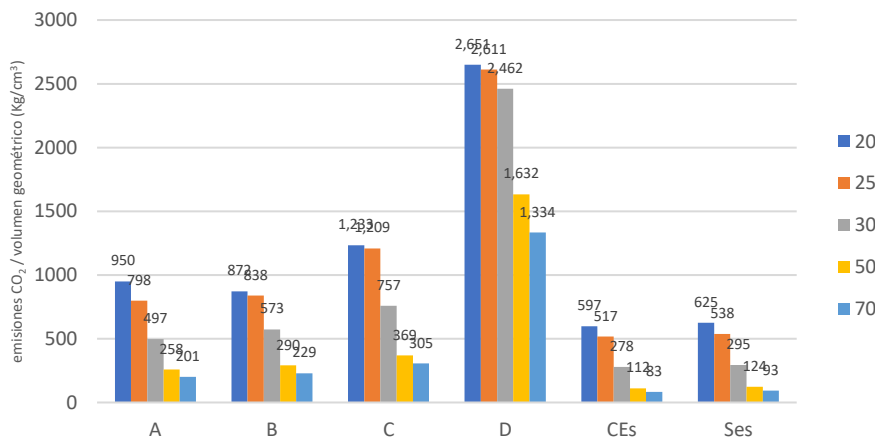


Figura 48. Emisiones de CO₂ equivalente por volumen geométrico por velocidad de impresión.

Ante cambios en la velocidad de impresión, los saltos porcentuales entre las emisiones por volumen geométrico entre los especímenes en las posiciones B y C son similares. Estos saltos porcentuales son de entre un 3% a casi un 50% más antes cambios en la velocidad. Por otro lado, el espécimen en la posición A, D y las piezas con mayor volumen CEs y Ses, son más sensibles a cambios en la velocidad de impresión ya que los saltos porcentuales ante cambios de velocidad son mayores que en los especímenes B y C.

Estas simulaciones han demostrado el efecto en el cambio del material y su incidencia en la energía promedio que utilizan los equipos de FDM para procesar dicho material. Los parámetros de impresión inciden directamente en el desempeño del equipo por ende en el consumo energético y se ha demostrado que el modelo propuesto es capaz de anticipar las emisiones de un lote o pieza, a partir del diseño digital y las dimensiones de impresión. Esto hace posible ayudar a decidir la combinación ideal entre parámetros de impresión y dimensiones de piezas para definir la mejor estrategia de impresión para equilibrar coste y emisiones de CO₂ equivalente.

Ha sido posible corroborar que las dimensiones volumétricas de las piezas inciden directamente en el tiempo de impresión y por ende en las emisiones, ahora podemos saber cuánto por unidad volumétrica. Las simulaciones muestran como el modelo propuesto es capaz de representar tanto cambios en factores de la pieza como en los parámetros de impresión para anticipar las emisiones de CO₂ de la estrategia de impresión seleccionada. Con toda esta información, un potencial usuario sería capaz de seleccionar el escenario de trabajo más relevante en función de sus condiciones de operación.

CAPÍTULO 5:

CONCLUSIONES Y TRABAJOS

FUTUROS

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. CONCLUSIONES

La tesis presentada sobre un modelo de coste y cálculo de la huella de carbono del proceso de FA que se encuentra enmarcada en la industria 4.0 por su impacto en el desarrollo tecnológico y sostenibilidad de las tecnologías de impresión 3D a nivel industrial.

En la literatura se ha identificado una brecha en la definición de los bloques de costes, particularmente en la tecnología FDM, para la caracterización de los costes de explotación de esta tecnología. En el capítulo 2, se han identificado y descrito los principales modelos de coste formulados para distintas tecnologías, incluida la FDM. Sin embargo, los hallazgos son limitados en cuanto a los parámetros de impresión y su importancia en el coste de la pieza final. La influencia de la energía en el coste por pieza con la tecnología FDM, no ha sido considerada como lo ha sido en el modelo propuesto en esta tesis.

A diferencia de otros modelos para medir el impacto en la huella de carbono de la fabricación aditiva, el modelo propuesto es el primero en ofrecer un análisis profundo de las conexiones entre tres principales parámetros de impresión (velocidad, porcentaje de relleno y altura de capa) y el cálculo de la huella de carbono utilizando dos tipos de materiales contemplados en el alcance de la tesis. Es posible ahora conocer el lote óptimo a producir desde el punto de vista económico y de sostenibilidad ambiental.

Los resultados obtenidos en la validación del modelo de coste para FDM van más allá de los alcanzados anteriormente. El marco del modelo propuesto podría llegar a ser adaptado a cualquier impresora FDM y cualquier tipo de filamento, esto lo hace único. Basta con conocer las dimensiones de la impresora, potencia media o máxima y las características del filamento a utilizar como la capacidad calorífica y temperatura de extrusión.

Como ha sido mostrado en la revisión de la literatura, el marco del modelo propuesto considera costes directos de fabricación, antes no considerados. Entre estos costes directos están:

- Material desperdiciado en el proceso
- Consumo energético
- Mantenimiento del equipo

Se puede resaltar que el cálculo de la energía efectiva utilizada en el proceso de impresión está basado en la potencia media del equipo. Este parámetro es totalmente dependiente de las características del equipo y el tipo de material a procesar.

El cálculo propuesto de los costes directos provee de información a los responsables de la toma de decisiones para la óptima selección de material y tipo de equipo necesario. Además, provee de información sobre la influencia del material y del equipo seleccionado en el desempeño de los costes.

Por otro lado, se pudo identificar en la validación del modelo de coste, que, cuantas más piezas por bandeja, el coste unitario es mejor, siendo esta mejora más acentuada hasta la séptima pieza por bandeja. A partir de la séptima pieza en la bandeja la mejora en coste es mucho menor. Lo anterior considerando las dimensiones de las piezas y del tamaño del lote a imprimir. En otras palabras, para distintos escenarios de dimensiones de pieza y tamaños de lote, se puede asegurar que hay una mejora en coste unitario con un aprovechamiento del área de impresión de casi un 60%. Es importante considerar las dimensiones de la pieza, volumen y si es necesaria o no la utilización de estructuras de soporte para su materialización. Lo anterior ayudará a determinar el mejor escenario (tamaño de lote y parámetros a considerar) de impresión para minimizar el coste unitario y las emisiones de CO₂ equivalente. Es posible entonces, con el marco del modelo propuesto, calcular el mínimo tamaño de lote para un rendimiento óptimo de los costes de producción. Esto quiere decir que, para usuarios, mercado y empresas, es una manera de calcular los ahorros en coste aprovechando el volumen total disponible de producción. En estos ensayos es posible identificar que con una ocupación del área de la bandeja de impresión de aproximadamente 65% (8 piezas), no hay mucha reducción en el coste por pieza lo que podría justificar la conveniencia en la utilización de la FA para escenarios de lotes pequeños de producción.

De los resultados de la validación del modelo de coste, se pueden llegar a las siguientes conclusiones:

- Los costes de material es el más relevante en la estructura de coste, seguido por el coste de mano de obra, sin embargo, el coste energético es sensible a cambios en el precio de la energía.
- La diferencia en la estructura de coste entre ambos ensayos muestra que el modelo es sensible a las características del material a utilizar.
- La selección de material para impresión y características de la máquina depende de las propiedades mecánicas deseadas. El marco del modelo de coste ayuda a predecir el mejor tamaño del equipo y tipo de material a utilizar.

- El consumo de energía es no lineal y depende de las características del equipo de impresión, el material deseado y sobre todo en los tiempos de precalentamiento de la bandeja y cámara de impresión.
- El desperdicio de material que se produce por las estructuras de soporte y los errores de fabricación como el *warping* y ángulo de voladizo, es una fuente de coste y depende proporcionalmente a la forma de pieza, tamaño y posición al imprimir.

En el marco de la implementación de la tecnología FA en una cadena de suministro, con los modelos propuestos es posible comparar la gestión de la cadena de suministro tradicional, con una cadena de suministro que acorte sus procesos de aprovisionamiento a través de la implementación de la FA. Esta disminución de eslabones consiste en cambiar el aprovisionamiento tradicional por una fabricación “*in house*” de algunos componentes, además de descentralizar la producción y personalización de productos y, por último, acercar la distribución al consumidor final.

El desempeño energético en cualquier proceso de fabricación es una de las variables más importantes concernientes a la huella de carbono. El modelo propuesto para el cálculo de la huella de carbono es capaz de predecir la variabilidad de las emisiones debido a cambios en los parámetros de impresión y/o material. De acuerdo con los resultados de la validación teórica del modelo, la energía térmica invertida en el proceso de impresión utilizando FDM, representa un 90% de la energía total utilizada. La energía térmica utilizada en el proceso de impresión está estrechamente relacionada con el material seleccionado. Esto lleva a suponer que las emisiones de CO₂ se pueden controlar modificando algunos parámetros de impresión como la altura de capa, el porcentaje de relleno y la velocidad de impresión. En el capítulo 4 de las validaciones de los modelos se llevaron las especificaciones de los materiales hasta los máximos permitidos por las especificaciones del material, independiente del acabado deseado.

Para hacer una comparativa más justa con una cadena tradicional los modelos propuestos podrían integrar un análisis más profundo desde las dimensiones medioambientales y económicas. Los modelos propuestos permiten llevar los costes y emisiones a las mismas unidades utilizadas en la fabricación tradicional (coste por pieza y CO₂ equivalente). Con los modelos planteados se podría ahora afirmar que los empresarios y profesionales tendrán una herramienta de toma de decisiones balanceando variables económicas y variables medioambientales. Por un lado, el modelo de coste permite conocer el coste unitario a partir del modelo digital (STL) y así anticipar la decisión de utilizar la fabricación tradicional o la impresión 3D. Por el otro, el modelo para el cálculo de la huella permite anticipar los distintos escenarios de emisiones con la variación de distintos parámetros de impresión (posición,

calidad de acabado, porcentaje de relleno, altura de capa, etc.) y así comparar con las emisiones utilizando la FA con las emisiones utilizando la fabricación tradicional.

Estas conclusiones proveen de evidencia suficiente para abrir otras líneas de investigación discutidas en el siguiente apartado.

5.2. TRABAJOS FUTUROS

Considerar, en la evaluación de costes, la posibilidad de la redistribución de la fabricación, con el propósito de reducir los costes de inventario y en general en la cadena de suministro.

La energía que no está directamente asociada al proceso de impresión, como el postproceso, dependen del cliente y el tipo de postproceso deseado, este análisis y su impacto en la huella podría ser analizado en futuros estudios.

Comparar la gestión de la cadena de suministro tradicional con una gestionada con tecnología de FA, intercambiando algunos eslabones, como el aprovisionamiento, fabricación y distribución, con tecnologías FA y utilizar los modelos propuestos en este trabajo para una validación teórica o práctica.

Por último, realizar una validación práctica de los modelos propuestos, aprovechar los datos en tiempo real de una impresora FDM mientras imprime los modelos al sensorizar el equipo y recopilar los datos para comparar con las validaciones teóricas.

5.3. DIFUSIÓN DE RESULTADOS

Como parte del proceso de investigación, algunos aspectos de esta tesis han sido validados, aceptados y publicados en revistas y/o congresos. A continuación, una lista de las publicaciones realizadas en revistas indexadas en JCR:

- Hernandez Korner M E, Lambán M P, Albajez J A, Santolaria J, Ng Corrales L D C and Royo J 2020 Systematic literature review: Integration of additive manufacturing and industry 4.0 Metals (Basel). 10 pp 1-24. DOI: 10.3390/met10081061 **IF: 2.351 JCR: Q2 en METALLURGY & METALLURGICAL ENGINEERING, Q3 en METALLURGY & METALLURGICAL ENGINEERING**
- Hernandez Korner M E, Lamban M P, Albajez J A, Santolaria J, Ng Corrales L del C and Royo J 2022 Cost Model Framework for Pieces Additively Manufactured in Fused Deposition Modeling for Low to Medium Batches 3D Print. Addit. Manuf. 00 1–12. DOI: 10.1089/3dp.2022.0044 **IF: 3.1 JCR: Q3**

Seguidamente, la divulgación en congreso, a través de la presentación de un poster:

- Hernandez M E, Albajez J A, Lamban M P, Royo J, Santolaria J and Ng Corrales L C 2021 Fused deposition modelling process environmental performance through the carbon footprint evaluation IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 1193 012127. **Cite Score: 1.1 Percentile: 35**

Artículo de congreso aceptado para ser presentado en el congreso del MESIC 2023 en modalidad de póster y saldrá publicada en una revista de IOP Conference Series in Material Science:

- *“Theoretical model for carbon footprint calculus based on energy consumption for polymer parts additively manufactured”*

Por último, se ha realizado una divulgación en los seminarios del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación.

- Presentación realizada presencialmente en el auditorio del edificio Torres de Quevedo el día 11 de junio de 2019. En esta presentación se dieron a conocer los principales hallazgos de la revisión de literatura en cuanto a los modelos de coste y parámetros de sostenibilidad de la fabricación aditiva.

REFERENCIAS

3D4Makers. 2018. *PEEK Filament Technical Data Sheet*.

Aghaei Chadegani, Arezoo, Hadi Salehi, Melor M. Md Yunus, Hadi Farhadi, Masood Fooladi, Maryam Farhadi, and Nader Ale Ebrahim. 2013. "A Comparison between Two Main Academic Literature Collections: Web of Science and Scopus Databases." *Asian Social Science* 9(5):18–26. doi: 10.5539/ass.v9n5p18.

Alexander, Paul, Seth Allen, and Debasish Dutta. 1998. "Part Orientation and Build Cost Determination in Layered Manufacturing." *Computer-Aided Design* 30(5):343–56. doi: 10.1016/S0010-4485(97)00083-3.

Algarni, Mohammed, and Sami Ghazali. 2021. "Comparative Study of the Sensitivity of Pla, Abs, Peek, and Petg's Mechanical Properties to Fdm Printing Process Parameters." *Crystals* 11(8). doi: 10.3390/cryst11080995.

Amir Sasson, John Chandler Johnson. 2016. "The 3D Printing Order: Variability, Supercenters and Supply Chain Reconfigurations." *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* 46(1):88–94. doi: <https://doi.org/10.1108/IJPDLM-10-2015-0257>.

Anycubic. 2023. "Anycubic." Retrieved (<https://www.anycubic.com/products/anycubic-kossel-3d-printer>).

Aria, Massimo, and Corrado Cuccurullo. 2017. "Bibliometrix: An R-Tool for Comprehensive Science Mapping Analysis." *Journal of Informetrics* 11(4):959–75. doi: 10.1016/j.joi.2017.08.007.

ASTM. 2022. *Additive Manufacturing — General Principles — Fundamentals and Vocabulary*. West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/F3177-21.

ASTM D638-14. 2016. *Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens*. Vol. 82. doi: 10.1520/D0638-14.1.

Attaran, Mohsen. 2017. "The Rise of 3-D Printing: The Advantages of Additive Manufacturing over Traditional Manufacturing." *Business Horizons* 60(5):677–88. doi: 10.1016/j.bushor.2017.05.011.

Atzeni, Eleonora; Luca; Iuliano, Paolo; Minetola, and Alessandro; Salmi. 2010. "Redesign and Cost Estimation of Rapid Manufactured Plastic Parts." *Rapid Prototyping Journal*

16(5):308–17. doi: 10.1108/13552541011065704.

Baheti, Radhakisan; Gill, Helen. 2011. “Cyber-Physical Systems.” *The Impact of Control Technology* 12(1):161–66.

Balogun, Vincent A., Neil D. Kirkwood, and Paul T. Mativenga. 2014. “Direct Electrical Energy Demand in Fused Deposition Modelling.” Pp. 38–43 in *21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering*.

Banjanin, Bojan, Gojko Vladić, Magdolna Pál, Sebastian Baloš, Miroslav Dramićanin, Milan Rackov, and Ivan Knežević. 2018. “Consistency Analysis of Mechanical Properties of Elements Produced by FDM Additive Manufacturing Technology.” *Matéria (Rio de Janeiro)* 23(4). doi: 10.1590/S1517-707620180004.0584.

Baumers, Martin, Phill Dickens, Chris Tuck, and Richard Hague. 2016. “The Cost of Additive Manufacturing: Machine Productivity, Economies of Scale and Technology-Push.” *Technological Forecasting and Social Change* 102:193–201. doi: 10.1016/j.techfore.2015.02.015.

Baumers, Martin, Chris Tuck, Ricky Wildman, Ian Ashcroft, Emma Rosamond, and Richard Hague. 2013a. “Transparency Built-in: Energy Consumption and Cost Estimation for Additive Manufacturing Baumers et Al. Energy and Cost Estimation for Additive Manufacturing.” *Journal of Industrial Ecology* 17(3):418–31. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00512.x.

Baumers, Martin, Chris Tuck, Ricky Wildman, Ian Ashcroft, Emma Rosamond, and Richard Hague. 2013b. “Transparency Built-In.” *Journal of Industrial Ecology* 17(3):418–31. doi: 10.1111/j.1530-9290.2012.00512.x.

Beatriz, Ana, Lopes De Sousa, Jabbour Charbel, Jose Chiappetta, Moacir Godinho, and Filho David. 2018. “Industry 4 . 0 and the Circular Economy : A Proposed Research Agenda and Original Roadmap for Sustainable Operations.” *Annals of Operations Research* 270(1):273–86. doi: 10.1007/s10479-018-2772-8.

Blaya, Fernando, Pilar San Pedro, Julia Lopez Silva, Roberto D’Amato, Enrique Soriano Heras, Juan Antonio Juanes, Pilar San Pedro, Julia Lopez Silva, Roberto D’Amato, Enrique Soriano Heras, and Juan Antonio Juanes. 2018. “Design of an Orthopedic Product by Using Additive Manufacturing Technology: The Arm Splint.” *JOURNAL OF MEDICAL SYSTEMS* 42(3):54. doi: 10.1007/s10916-018-0909-6.

- Bogers, Marcel, Ronen Hadar, and Arne Bilberg. 2016. "Additive Manufacturing for Consumer-Centric Business Models: Implications for Supply Chains in Consumer Goods Manufacturing." *Technological Forecasting and Social Change* 102:225–39. doi: 10.1016/j.techfore.2015.07.024.
- Bours, J., B. Adzima, S. Gladwin, J. Cabral, and S. Mau. 2017. "Addressing Hazardous Implications of Additive Manufacturing: Complementing Life Cycle Assessment with a Framework for Evaluating Direct Human Health and Environmental Impacts." *Journal of Industrial Ecology* 21:S25–36. doi: 10.1111/jiec.12587.
- Byard, Dennis J., Aubrey L. Woern, Robert B. Oakley, Matthew J. Fiedler, Samantha L. Snabes, and Joshua M. Pearce. 2019. "Green Fab Lab Applications of Large-Area Waste Polymer-Based Additive Manufacturing." *Additive Manufacturing* 27:515–25. doi: 10.1016/j.addma.2019.03.006.
- Chen, Danfang, Steffen Heyer, Suphunnika Ibbotson, Konstantinos Salonitis, Jón Garðar Steingrímsson, Sebastian Thiede, Jon Gardar Steingrímsson, Sebastian Thiede, Jón Garðar Steingrímsson, Sebastian Thiede, Jon Gardar Steingrímsson, and Sebastian Thiede. 2015. "Direct Digital Manufacturing: Definition, Evolution, and Sustainability Implications." *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* 107:615–25. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.009.
- Chitrao, Pradnya. 2016. "21st C New Technologies a Pathway to Inclusive and Sustainable Growth." *Information Systems Design and Intelligent Applications, Vol 2, India 2016* 434:395–402. doi: 10.1007/978-81-322-2752-6_39.
- Cojocar, Vasile, Doina Frunzaverde, Calin Octavian Miclosina, and Gabriela Marginean. 2022. "The Influence of the Process Parameters on the Mechanical Properties of PLA Specimens Produced by Fused Filament Fabrication—A Review." *Polymers* 14(5).
- Colosimo, Bianca Maria B. M. M., Simona Cavalli, and Marco Grasso. 2019. "A Cost Model for the Economic Evaluation of In-Situ Monitoring Tools in Metal Additive Manufacturing." *International Journal of Production Economics* 223:107532. doi: 10.1016/j.ijpe.2019.107532.
- Corinne, Meunier, Jonas Stoll, and Laura Schoen. 2020. "ProBas." *Agencia Federal Del Medio Ambiente Dessau-Roblau*. Retrieved February 17, 2021 (<https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>).
- Dev, Navin K., Ravi Shankar, and Fahham Hasan. 2020. "Resources , Conservation &

- Recycling Industry 4.0 and Circular Economy: Operational Excellence for Sustainable Reverse Supply Chain Performance.” *Resources, Conservation and Recycling* 153(January 2019):104583. doi: 10.1016/j.resconrec.2019.104583.
- Di, Lei, and Yiran Yang. 2020. “Cost Modeling and Evaluation of Direct Metal Laser Sintering with Integrated Dynamic Process Planning.” *Sustainability* 13(1):319. doi: 10.3390/su13010319.
- Dias, Marta R., Jose M. Guedes, Colleen L. Flanagan, Scott J. Hollister, and Paulo R. Fernandes. 2014. “Optimization of Scaffold Design for Bone Tissue Engineering: A Computational and Experimental Study.” *MEDICAL ENGINEERING & PHYSICS* 36(4):448–57. doi: 10.1016/j.medengphy.2014.02.010.
- Ding, Jin, Martin Baumann, Elizabeth A. Clark, and Ricky D. Wildman. 2021. “The Economics of Additive Manufacturing: Towards a General Cost Model Including Process Failure.” *International Journal of Production Economics* 108087. doi: 10.1016/j.ijpe.2021.108087.
- Fera, M., F. Fruggiero, G. Costabile, A. Lambiase, and D. T. T. Pham. 2017. “A New Mixed Production Cost Allocation Model for Additive Manufacturing (MiProCAMAM).” *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY* 92(9–12):4275–91. doi: 10.1007/s00170-017-0492-x.
- Garcia, Fabricio Leon, Virgínia Aparecida da Silva Moris, Andréa Oliveira Nunes, and Diogo Aparecido Lopes Silva. 2018. “Environmental Performance of Additive Manufacturing Process – an Overview.” *Rapid Prototyping Journal* 24(7):1166–77.
- Gebler, Malte, Anton J. M. Schoot Uiterkamp, and Cindy Visser. 2014. “A Global Sustainability Perspective on 3D Printing Technologies.” *Energy Policy* 74:158–67. doi: 10.1016/j.enpol.2014.08.033.
- Ghobakhloo, Morteza. 2018. “The Future of Manufacturing Industry: A Strategic Roadmap toward Industry 4.0.” *Journal of Manufacturing Technology Management* 29(6):910–36. doi: 10.1108/JMTM-02-2018-0057.
- Graham, John. 2014. “Three-Dimensional Printing Technology.” *Article in Journal of Clinical Orthodontics*.
- Gwamuri, Jephias, Dhiogo Franco, Khalid Y. Khan, Lucia Gauchia, and Joshua M. Pearce. 2016. “High-Efficiency Solar-Powered 3-D Printers for Sustainable Development.” *Machines* 4(1):3. doi: 10.3390/machines4010003.

- Hällgren, Sebastian, Lars Pejryd, and Jens Ekengren. 2016. "Additive Manufacturing and High Speed Machining -Cost Comparison of Short Lead Time Manufacturing Methods." *Procedia CIRP* 50:384–89. doi: 10.1016/j.procir.2016.05.049.
- Hansen, D. R., M. M. Mowen, and D. L. Heitger. 2021. *Cost Management*. 5th ed. edited by Cengage Learning. Cengage Learning.
- Heck, Stefan, Matt Rogers, and Paul Carroll. 2014. *Resource Revolution : How to Capture the Biggest Business Opportunity in a Century*. Houghton Mifflin Harcourt.
- Henan Suwei Electronics Technology co. 2017. "CreatBot 3D Printer User Manual." 40.
- Hernandez, M. E., J. A. Albajez, M. P. Lamban, J. Royo, J. Santolaria, and L. C. Ng Corrales. 2021. "Fused Deposition Modelling Process Environmental Performance through the Carbon Footprint Evaluation." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 1193(1):012127. doi: 10.1088/1757-899x/1193/1/012127.
- Holzmann, Patrick, Robert J. R. J. Robert J. Breiteneker, A. A. Aqeel A. Soomro, and Erich J. E. J. Schwarz. 2017. "User Entrepreneur Business Models in 3D Printing." *JOURNAL OF MANUFACTURING TECHNOLOGY MANAGEMENT* 28(1, 2, SI):75–94. doi: 10.1108/JMTM-12-2015-0115.
- Hopkinson, N., and P. Dickens. 2003. "Analysis of Rapid Manufacturing - Using Layer Manufacturing Processes for Production." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* 217(1):31–40. doi: 10.1243/095440603762554596.
- Huang, Runze, Matthew Riddle, Diane Graziano, Joshua Warren, Sujit Das, Sachin Nimbalkar, Joe Cresko, and Eric Masanet. 2016. "Energy and Emissions Saving Potential of Additive Manufacturing: The Case of Lightweight Aircraft Components." *Journal of Cleaner Production* 135:pp 1559-1570. doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.109.
- Ibarra, Dorleta, Jaione Ganzarain, and Juan Ignacio Igartua. 2018. "Business Model Innovation through Industry 4.0: A Review." Pp. 4–10 in *Procedia Manufacturing*. Vol. 22. Elsevier B.V.
- Ingole, D. S., T. R. Deshmukh, A. M. Kuthe, and K. M. Ashtankar. 2011. "Build Orientation Analysis for Minimum Cost Determination in FDM." *PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART B-JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE* 225(B10):1925–38. doi: 10.1177/0954405411413694.

- Ivanov, Dmitry, Alexandre Dolgui, and Boris Sokolov. 2019. "The Impact of Digital Technology and Industry 4.0 on the Ripple Effect and Supply Chain Risk Analytics." *International Journal of Production Research* 57(3):829–46. doi: 10.1080/00207543.2018.1488086.
- Jafferson, J. M., and Debdutta Chatterjee. 2021. "A Review on Polymeric Materials in Additive Manufacturing." *Materials Today: Proceedings* 46(xxxx):1349–65. doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.485.
- Junior, Osiris Canciglieri, Angelo Márcio Oliveira Sant'Anna, and Luis Carlos Machado. 2014. "Decision Making for Rapid Prototyping Technologies of Sustainable Products." *Chemical Engineering Transactions* 39(Special Issue):529–34. doi: 10.3303/CET1439089.
- Kamble, Sachin S., Angappa Gunasekaran, and Shradha A. Gawankar. 2018. "Sustainable Industry 4.0 Framework: A Systematic Literature Review Identifying the Current Trends and Future Perspectives." *Process Safety and Environmental Protection* 117:408–25. doi: 10.1016/j.psep.2018.05.009.
- Kamps, Tobias, Max Lutter-Guenther, Christian Seidel, Timothy Gutowski, and Gunther Reinhart. 2018. "Cost- and Energy-Efficient Manufacture of Gears by Laser Beam Melting." *CIRP JOURNAL OF MANUFACTURING SCIENCE AND TECHNOLOGY* 21:47–60. doi: 10.1016/j.cirpj.2018.01.002.
- Kavvadias, K. C. 2016. "Energy Price Spread as a Driving Force for Combined Generation Investments: A View on Europe." *Energy* 115:1632–39. doi: 10.1016/J.ENERGY.2016.03.058.
- Kellens, Karel, Martin Baemers, Timothy G. Gutowski, William Flanagan, Reid Lifset, and Joost R. Dufflou. 2017. "Environmental Dimensions of Additive Manufacturing: Mapping Application Domains and Their Environmental Implications." *Journal of Industrial Ecology* 21:S49–68. doi: 10.1111/JIEC.12629.
- Knofius, N., M. C. van der Heijden, and W. H. M. Zijm. 2019. "Consolidating Spare Parts for Asset Maintenance with Additive Manufacturing." *International Journal of Production Economics* 208:269–80. doi: 10.1016/J.IJPE.2018.11.007.
- Korner, Mario Enrique Hernandez, María Pilar Lambán, José Antonio Albajez, Jorge Santolaria, Lisbeth Del Carmen Ng Corrales, and Jesús Royo. 2020. "Systematic Literature Review: Integration of Additive Manufacturing and Industry 4.0." *Metals* 10(8):pp 1-24. doi: 10.3390/met10081061.

- Kuchеров, Fedor A., Evgeny G. Gordeev, Alexey S. Kashin, and Valentine P. Ananikov. 2017. "Three-Dimensional Printing with Biomass-Derived PEF for Carbon-Neutral Manufacturing." *Angewandte Chemie-International Edition* 56(50):15931–35. doi: 10.1002/anie.201708528.
- Lambán Castillo, María Pilar. 2010. "Determinación de Costes de Procesos de La Cadena de Suministro e Influencia de Factores Productivos y Logísticos." Universidad de Zaragoza.
- Laplume, Andre, G. C. Gerald C. Anzalone, and Joshua M. J. M. Pearce. 2016. "Open-Source, Self-Replicating 3-D Printer Factory for Small-Business Manufacturing." *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED MANUFACTURING TECHNOLOGY* 85(1–4):633–42. doi: 10.1007/s00170-015-7970-9.
- Lasi, Heiner, Peter Fettke, Hans Georg Kemper, Thomas Feld, and Michael Hoffmann. 2014. "Industry 4.0." *Business and Information Systems Engineering* 6(4):239–42. doi: 10.1007/s12599-014-0334-4.
- Leino, Maija, Joonas Pekkarinen, and Risto Soukka. 2016. "The Role of Laser Additive Manufacturing Methods of Metals in Repair, Refurbishment and Remanufacturing - Enabling Circular Economy." *Laser Assisted Net Shape Engineering 9 International Conference on Photonic Technologies Proceedings of the Lane 2016* 83:752–60. doi: 10.1016/j.phpro.2016.08.077.
- Liu, Zhichao, Qihong Jiang, Fuda Ning, Hoyeol Kim, Weilong Cong, Changxue Xu, and Hongchao Zhang. 2018. "Investigation of Energy Requirements and Environmental Performance for Additive Manufacturing Processes." *Sustainability* 10(10):3606. doi: 10.3390/su10103606.
- Lu, Hongfang, Xin Ma, Minda Ma, and Senlin Zhu. 2021. "Energy Price Prediction Using Data-Driven Models: A Decade Review." *Computer Science Review* 39:100356. doi: 10.1016/J.COSREV.2020.100356.
- Lu, Yang. 2017. *Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues*. Vol. 6. Elsevier B.V.
- Lunetto, Vincenzo, Paolo C. Priarone, Manuela Galati, and Paolo Minetola. 2020. "On the Correlation between Process Parameters and Specific Energy Consumption in Fused Deposition Modelling." *Journal of Manufacturing Processes* 56:pp 1039-1049. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.06.002.

- Manyika, J; Chui, M; Bughin, J; Dobbs, R; Bisson, P; and Marrs, A. 2013. "Disruptive Technologies: Advances That Will Transform Life, Business, and the Global Economy." *McKinsey Global Institute* 180:176.
- Mattos Nascimento, Daniel Luiz, Viviam Alencastro, Osvaldo Luiz Goncalves Quelhas, Rodrigo Goyannes Gusmao Caiado, Jose Arturo J. A. Jose Arturo Garza-Reyes, Luis Rocha L. R. Luis Rocha Lona, Guilherme Tortorella, Daniel Luiz Mattos D. L. M. Nascimento, Viviam Alencastro, Osvaldo Luiz Goncalves O. L. G. Quelhas, Rodrigo Goyannes Gusmao R. G. G. G. Caiado, Jose Arturo J. A. Jose Arturo Garza-Reyes, Luis Rocha L. R. Luis Rocha Lona, Guilherme Tortorella, Daniel Luiz Mattos Nascimento, Viviam Alencastro, Osvaldo Luiz Goncalves Quelhas, Rodrigo Goyannes Gusmao Caiado, Jose Arturo J. A. Jose Arturo Garza-Reyes, Luis Rocha L. R. Luis Rocha Lona, Guilherme Tortorella, Daniel Luiz Mattos D. L. M. Nascimento, Viviam Alencastro, Osvaldo Luiz Goncalves O. L. G. Quelhas, Rodrigo Goyannes Gusmao R. G. G. G. Caiado, Jose Arturo J. A. Jose Arturo Garza-Reyes, Luis Rocha L. R. Luis Rocha Lona, and Guilherme Tortorella. 2019. "Exploring Industry 4.0 Technologies to Enable Circular Economy Practices in a Manufacturing Context A Business Model Proposal." *JOURNAL OF MANUFACTURING TECHNOLOGY MANAGEMENT* 30(3, SI):607–27. doi: 10.1108/JMTM-03-2018-0071.
- Miao, Xin, Qiang Zhang, Chris Atkin, Zhengzhong Sun, and Yansheng Li. 2018. "Improving Purge Air Cooling Effectiveness by Engineered End-Wall Surface Structures-Part I: Duct Flow." *JOURNAL OF TURBOMACHINERY-TRANSACTIONS OF THE ASME* 140(9). doi: 10.1115/1.4040853.
- Moher, David, Alessandro Liberati, Jennifer Tetzlaff, Douglas G. Altman, Doug Altman, Gerd Antes, David Atkins, Virginia Barbour, Nick Barrowman, Jesse A. Berlin, Jocalyn Clark, Mike Clarke, Deborah Cook, Roberto D'Amico, Jonathan J. Deeks, P. J. Devereaux, Kay Dickersin, Matthias Egger, Edzard Ernst, Peter C. Gøtzsche, Jeremy Grimshaw, Gordon Guyatt, Julian Higgins, John P. A. Ioannidis, Jos Kleijnen, Tom Lang, Nicola Magrini, David McNamee, Lorenzo Moja, Cynthia Mulrow, Maryann Napoli, Andy Oxman, Bá Pham, Drummond Rennie, Margaret Sampson, Kenneth F. Schulz, Paul G. Shekelle, David Tovey, and Peter Tugwell. 2009. "Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement." *PLoS Medicine* 6(7). doi: 10.1371/journal.pmed.1000097.
- Mosconi, Franco. 2015. *The New European Industrial Policy: Global Competitiveness and the Manufacturing Renaissance*. Oxfordshire, England: Routledge - Taylor and Francis

Group.

- Murmura, Federica, and Laura Bravi. 2018. "Additive Manufacturing in the Wood-Furniture Sector: Sustainability of the Technology, Benefits and Limitations of Adoption." *Journal of Manufacturing Technology Management* 29(2):350–71. doi: 10.1108/JMTM-08-2017-0175.
- Nascimento, D. L. M., V. Alencastro, O. L. G. Quelhas, R. G. G. Caiado, J. A. Garza-Reyes, L. R. Lona, and G. Tortorella. 2019. "Exploring Industry 4.0 Technologies to Enable Circular Economy Practices in a Manufacturing Context: A Business Model Proposal." *Journal of Manufacturing Technology Management* 30(3):607–27. doi: 10.1108/JMTM-03-2018-0071.
- Nasta, Mihai Cristian, and Daniel Diaz Fuentes. 2021. *ELECTRICITY AS KEY TO ECONOMIC REGENERATION LA ELECTRICIDAD COMO CLAVE DE LA REGENERACIÓN ECONÓMICA*.
- Paciorek-Sadowska, Joanna, Marcin Borowicz, and Marek Isbrandt. 2019. "New Poly(Lactide-Urethane-Isocyanurate) Foams Based on Bio-Polylactide Waste." *Polymers* 11(3):481. doi: 10.3390/polym11030481.
- Pelanconi, M., M. Barbato, S. Zavattoni, G. L. Vignoles, and A. Ortona. 2019. "Thermal Design, Optimization and Additive Manufacturing of Ceramic Regular Structures to Maximize the Radiative Heat Transfer." *MATERIALS & DESIGN* 163. doi: 10.1016/j.matdes.2018.107539.
- Priarone, Paolo C., Gianni Campatelli, Filippo Montevecchi, Giuseppe Venturini, and Luca Settineri. 2019. "A Modelling Framework for Comparing the Environmental and Economic Performance of WAAM-Based Integrated Manufacturing and Machining." *CIRP ANNALS-MANUFACTURING TECHNOLOGY* 68(1):37–40. doi: 10.1016/j.cirp.2019.04.005.
- Priarone, Paolo C., and Giuseppe Ingarao. 2017. "Towards Criteria for Sustainable Process Selection: On the Modelling of Pure Subtractive versus Additive/Subtractive Integrated Manufacturing Approaches." *Journal of Cleaner Production* 144:57–68. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.165.
- Qin, J., Y. Liu, R. Grosvenor, F. Lacan, and Z. Jiang. 2020. "Deep Learning-Driven Particle Swarm Optimisation for Additive Manufacturing Energy Optimisation." *Journal of Cleaner Production* 245. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118702.

- Rahito, D. A. Wahab, and A. H. Azman. 2019. "Additive Manufacturing for Repair and Restoration in Remanufacturing: An Overview from Object Design and Systems Perspectives." *PROCESSES* 7(11). doi: 10.3390/pr7110802.
- Raise3D. 2017. *Raise3D Premium ABS Technical Data Sheet*. Vol. 3.
- Raise3D. 2022. *Raise3D Premium PLA Technical Data Sheet*.
- Rayna, Thierry, and Ludmila Striukova. 2016. "From Rapid Prototyping to Home Fabrication: How 3D Printing Is Changing Business Model Innovation." *TECHNOLOGICAL FORECASTING AND SOCIAL CHANGE* 102:214–24. doi: 10.1016/j.techfore.2015.07.023.
- Reich, Matthew J., Aubrey L. Woern, Nagendra G. Tanikella, and Joshua M. Pearce. 2019. "Mechanical Properties and Applications of Recycled Polycarbonate Particle Material Extrusion-Based Additive Manufacturing." *Materials* 12(10):1642. doi: 10.3390/ma12101642.
- Ren, Lei, Shicheng Wang, Yijun Shen, Shikai Hong, Yudi Chen, and Lin Zhang. 2016. "3D PRINTING IN CLOUD MANUFACTURING: MODEL AND PLATFORM DESIGN." P. V002T04A014 in *Proceedings of the ASME 11th International Manufacturing Science and Engineering Conference, 2016, vol 2*. THREE PARK AVENUE, NEW YORK, NY 10016-5990 USA: AMER SOC MECHANICAL ENGINEERS.
- Rickenbacher, L., A. Spierings, and K. Wegener. 2013. "An Integrated Cost-Model for Selective Laser Melting (SLM)." *RAPID PROTOTYPING JOURNAL* 19(3):208–14. doi: 10.1108/13552541311312201.
- Roblek, Vasja, Maja Meško, and Alojz Krapež. 2016. "A Complex View of Industry 4.0." *SAGE Open* 6(2):215824401665398. doi: 10.1177/2158244016653987.
- Rogozhin, Alex, Michael Gallaher, Gloria Helfand, and Walter McManus. 2010. "Using Indirect Cost Multipliers to Estimate the Total Cost of Adding New Technology in the Automobile Industry." *International Journal of Production Economics* 124(2):360–68. doi: 10.1016/j.ijpe.2009.11.031.
- Rong, K., D. Patton, and W. Chen. 2018. "Business Models Dynamics and Business Ecosystems in the Emerging 3D Printing Industry." *Technological Forecasting and Social Change* 134:234–45. doi: 10.1016/j.techfore.2018.06.015.

- Roy, Rajkumar, and John Harrington. 2003. "Decision Engineering Report Series COST ENGINEERING : WHY , WHAT AND." in *Decision Engineering Report Series*.
- Ruffo, M., and R. Hague. 2007. "Cost Estimation for Rapid Manufacturing - Simultaneous Production of Mixed Components Using Laser Sintering." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 221(11):1585–91. doi: 10.1243/09544054JEM894.
- Ruffo, M., C. Tuck, and R. Hague. 2006a. "Cost Estimation for Rapid Manufacturing - Laser Sintering Production for Low to Medium Volumes." *PROCEEDINGS OF THE INSTITUTION OF MECHANICAL ENGINEERS PART B-JOURNAL OF ENGINEERING MANUFACTURE* 220(9):1417–27. doi: 10.1243/09544054JEM517.
- Ruffo, M., C. Tuck, and R. Hague. 2006b. "Empirical Laser Sintering Time Estimator for Duraform PA." *International Journal of Production Research* 44(23):5131–46. doi: 10.1080/00207540600622522.
- Ruffo, Massimiliano, Chris Tuck, and Richard Hague. 2007. "Make or Buy Analysis for Rapid Manufacturing." *Rapid Prototyping Journal* 13(1):23–29. doi: 10.1108/13552540710719181.
- Saboori, Abdollah, Alberta Aversa, Giulio Marchese, Sara Biamino, Mariangela Lombardi, and Paolo Fino. 2019. "Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair." *APPLIED SCIENCES-BASEL* 9(16). doi: 10.3390/app9163316.
- Saluja, Aditya, Jiarui Xie, and Kazem Fayazbakhsh. 2020. "A Closed-Loop in-Process Warping Detection System for Fused Filament Fabrication Using Convolutional Neural Networks." *Journal of Manufacturing Processes* 58:407–15. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.08.036.
- Santolaria, Jorge, Rosa Monge, Ángel Tobajas, Roberto Jimenez, Mirko A. Cabrera, and Luis J. Fernandez. 2013. "Design, Manufacture and Geometric Verification of Rapid Prototyped Microfluidic Encapsulations by Computed Tomography." *Computers in Industry*. doi: 10.1016/j.compind.2013.06.015.
- Santos, Gilberto, Federica Murrura, and Laura Bravi. 2018. "Fabrication Laboratories: The Development of New Business Models with New Digital Technologies." *Journal of Manufacturing Technology Management* 29(8):1332–57. doi: 10.1108/JMTM-03-2018-0072.
- Sauerwein, Marita, Eugeni Doubrovski, Ruud Balkenende, and Conny Bakker. 2019.

- “Exploring the Potential of Additive Manufacturing for Product Design in a Circular Economy.” *Journal of Cleaner Production* 226:1138–49. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.108.
- Shrouf, F., J. Ordieres, and G. Miragliotta. 2014. “Smart Factories in Industry 4.0: A Review of the Concept and of Energy Management Approached in Production Based on the Internet of Things Paradigm.” *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management* 2015-Janua:697–701. doi: 10.1109/IEEM.2014.7058728.
- Solomon, I. John, P. Sevel, and J. Gunasekaran. 2020. “A Review on the Various Processing Parameters in FDM.” Pp. 509–14 in *Materials Today: Proceedings*. Vol. 37. Elsevier.
- Song, Ruoyu, and Cassandra Telenko. 2017. “Material and Energy Loss Due to Human and Machine Error in Commercial FDM Printers.” *Journal of Cleaner Production* 148:pp 895-904. doi: 10.1016/j.jclepro.2017.01.171.
- Sutradhar, Alok, Jaejong Park, Diana Carrau, and Michael J. J. Miller. 2014. “Experimental Validation of 3D Printed Patient-Specific Implants Using Digital Image Correlation and Finite Element Analysis.” *COMPUTERS IN BIOLOGY AND MEDICINE* 52:8–17. doi: 10.1016/j.combiomed.2014.06.002.
- Tagliaferri, Vincenzo, Federica Trovalusci, Stefano Guarino, and Simone Venettacci. 2019. “Environmental and Economic Analysis of FDM, SLS and MJF Additive Manufacturing Technologies.” *Materials* 12(24):p 4161. doi: 10.3390/ma12244161.
- Tang, Yunlong, Kieran Mak, and Yaoyao Fiona Zhao. 2016a. “A Framework to Reduce Product Environmental Impact through Design for Additive Manufacturing.” *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* 137:1560–72. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.037.
- Tang, Yunlong, Kieran Mak, and Yaoyao Fiona Zhao. 2016b. “A Framework to Reduce Product Environmental Impact through Design Optimization for Additive Manufacturing.” *JOURNAL OF CLEANER PRODUCTION* 137:1560–72. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.06.037.
- The Ellen MacArthur Foundation. 2022. “What Is a Circular Economy? | Ellen MacArthur Foundation.” *The Ellen MacArthur Foundation*. Retrieved November 30, 2022 (<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept>).
- Thomas, Douglas. 2016. “Costs, Benefits, and Adoption of Additive Manufacturing: A Supply Chain Perspective.” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*

85(5–8):1857–76. doi: 10.1007/s00170-015-7973-6.

- Thompson, Mary Kathryn, Giovanni Moroni, Tom Vaneker, Georges Fadel, R. Ian Campbell, Ian Gibson, Alain Bernard, Joachim Schulz, Patricia Graf, Bhrihu Ahuja, and Filomeno Martina. 2016. “Design for Additive Manufacturing: Trends, Opportunities, Considerations, and Constraints.” *CIRP ANNALS-MANUFACTURING TECHNOLOGY* 65(2):737–60. doi: 10.1016/j.cirp.2016.05.004.
- Turner, Chris, Mariale Moreno, Luigi Mondini, Konstantinos Salonitis, Fiona Charnley, Ashutosh Tiwari, and Windo Hutabarat. 2019. “Sustainable Production in a Circular Economy: A Business Model for Re-Distributed Manufacturing.” *SUSTAINABILITY* 11(16). doi: 10.3390/su11164291.
- Ultimaker. 2019a. “Cura.”
- Ultimaker. 2019b. “Ultimaker S5.” *Ultimaker*.
- Urbanic, R. J. J., and S. M. M. Saqib. 2019. “A Manufacturing Cost Analysis Framework to Evaluate Machining and Fused Filament Fabrication Additive Manufacturing Approaches.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 102(9–12):3091–3108. doi: 10.1007/s00170-019-03394-x.
- Vambol, Oleksii, Andrii Kondratiev, Svitlana Purhina, and Maryna Shevtsova. 2021. “Determining the Parameters for a 3D-Printing Process Using the Fused Deposition Modeling in Order to Manufacture an Article with the Required Structural Parameters.” *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2(1–110):70–80. doi: 10.15587/1729-4061.2021.227075.
- Verma, A., and R. Rai. 2017. “Sustainability-Induced Dual-Level Optimization of Additive Manufacturing Process.” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 88(5–8):1945–59. doi: 10.1007/s00170-016-8905-9.
- Victrex High Performance Polymers. 2019. “Victrex ® PEEK.” *PEEK 450g Technical Data Sheet* (November):1–2.
- Wang, Yaguang, Jincheng Gao, and Zhan Kang. 2018. “Level Set-Based Topology Optimization with Overhang Constraint: Towards Support-Free Additive Manufacturing.” *COMPUTER METHODS IN APPLIED MECHANICS AND ENGINEERING* 339:591–614. doi: 10.1016/j.cma.2018.04.040.

- Wang, Yuanbin, Robert Blache, Pai Zheng, and Xun Xu. 2018. "A Knowledge Management System to Support Design for Additive Manufacturing Using Bayesian Networks." *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME* 140(5). doi: 10.1115/1.4039201.
- Westerweel, Bram, Rob J. I. Basten, and Geert-Jan van Houtum. 2018. "Traditional or Additive Manufacturing? Assessing Component Design Options through Lifecycle Cost Analysis." *European Journal of Operational Research* 270(2):570–85. doi: 10.1016/J.EJOR.2018.04.015.
- Wittbrodt, B. T. T., A. G. G. Glover, J. Laureto, G. C. C. Anzalone, D. Oppliger, J. L. L. Irwin, and J. M. M. Pearce. 2013. "Life-Cycle Economic Analysis of Distributed Manufacturing with Open-Source 3-D Printers." *MECHATRONICS* 23(6):713–26. doi: 10.1016/j.mechatronics.2013.06.002.
- Woern, Aubrey L., Dennis J. Byard, Robert B. Oakley, Matthew J. Fiedler, Samantha L. Snabes, and Joshua M. Pearce. 2018. "Fused Particle Fabrication 3-D Printing: Recycled Materials' Optimization and Mechanical Properties." *Materials* 11(8):1413. doi: 10.3390/ma11081413.
- Wohlers, Terry. 2014. "Wohlers Report 2015: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report." *Wohlers Associates* 24:1–34.
- Wu, Jun, Anders Clausen, and Ole Sigmund. 2017. "Minimum Compliance Topology Optimization of Shell-Infill Composites for Additive Manufacturing." *COMPUTER METHODS IN APPLIED MECHANICS AND ENGINEERING* 326:358–75. doi: 10.1016/j.cma.2017.08.018.
- Xu, Jinghua, Kang Wang, Hongsheng Sheng, Mingyu Gao, Shuyou Zhang, and Jianrong Tan. 2020. "Energy Efficiency Optimization for Ecological 3D Printing Based on Adaptive Multi-Layer Customization." *Journal of Cleaner Production* 245:p 118826. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118826.
- Yakout, Mostafa, M. A. Elbestawi, and Stephen C. Veldhuis. 2018. "A Review of Metal Additive Manufacturing Technologies." *Solid State Phenomena* 278:1–14. doi: 10.4028/www.scientific.net/ssp.278.1.
- Yang, S., W. Min, J. Ghibardo, and Y. F. Zhao. 2019. "Understanding the Sustainability Potential of Part Consolidation Design Supported by Additive Manufacturing." *Journal of Cleaner Production* 232:722–38. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.05.380.

- Yang, Sheng, and Yaoyao Fiona Zhao. 2018. "Additive Manufacturing-Enabled Part Count Reduction: A Lifecycle Perspective." *JOURNAL OF MECHANICAL DESIGN* 140(3). doi: 10.1115/1.4038922.
- Yang, Y., L. Li, Y. Pan, and Z. Sun. 2017. "Energy Consumption Modeling of Stereolithography-Based Additive Manufacturing Toward Environmental Sustainability." *Journal of Industrial Ecology* 21:S168–78. doi: 10.1111/jiec.12589.
- Yang, Yiran, and Lin Li. 2018. "Cost Modeling and Analysis for Mask Image Projection Stereolithography Additive Manufacturing: Simultaneous Production with Mixed Geometries." *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION ECONOMICS* 206:146–58. doi: 10.1016/j.ijpe.2018.09.023.
- Yi, Li, and Jan C. Aurich. 2021. "Development and Validation of Energy Simulation for Additive Manufacturing." in *OpenAccess Series in Informatics*. Vol. 89. Schloss Dagstuhl- Leibniz-Zentrum für Informatik GmbH, Dagstuhl Publishing.
- Yi, Li, Svenja Ehmsen, Moritz Glatt, and Jan C. Aurich. 2021. "Modeling and Software Implementation of Manufacturing Costs in Additive Manufacturing." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 33:380–88. doi: 10.1016/j.cirpj.2021.04.003.
- Yi, Li, Christopher Glaessner, J. C. Jan C. Aurich, Christopher Gläßner, J. C. Jan C. Aurich, Christopher Glaessner, and J. C. Jan C. Aurich. 2019. "How to Integrate Additive Manufacturing Technologies into Manufacturing Systems Successfully: A Perspective from the Commercial Vehicle Industry." *Journal of Manufacturing Systems* 53(October):195–211. doi: 10.1016/j.jmsy.2019.09.007.
- Yi, Li, Moritz Glatt, Praveen Sridhar, Kristin de Payrebrune, Barbara S. Linke, Bahram Ravani, and Jan C. Aurich. 2020. "An Eco-Design for Additive Manufacturing Framework Based on Energy Performance Assessment." *Additive Manufacturing* 33:p 101120. doi: 10.1016/j.addma.2020.101120.
- Yoon, Hae-Sung, Jang-Yeob Lee, Hyung-Soo Kim, Min-Soo Kim, Eun-Seob Kim, Yong-Jun Shin, Won-Shik Chu, and Sung-Hoon Ahn. 2014. "A Comparison of Energy Consumption in Bulk Forming, Subtractive, and Additive Processes: Review and Case Study." *INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY* 1(3):pp 261-279. doi: 10.1007/s40684-014-0033-0.
- Zadpoor, Amir A. 2017. "Design for Additive Bio-Manufacturing: From Patient-Specific Medical to Rationally Designed Meta-Biomaterials." *INTERNATIONAL JOURNAL OF*

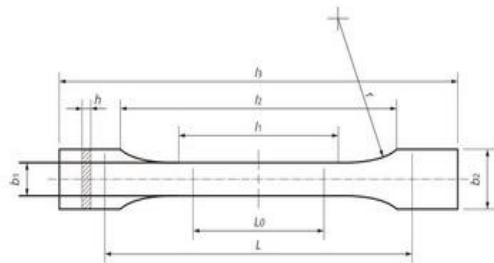
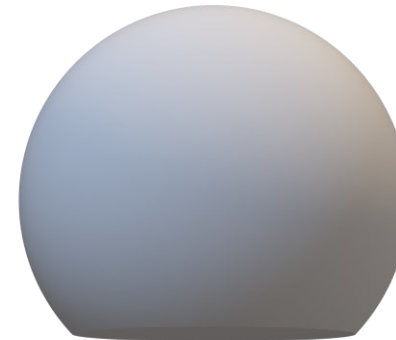
MOLECULAR SCIENCES 18(8). doi: 10.3390/ijms18081607.

Zhong, Shan, and Joshua M. Pearce. 2018. "Tightening the Loop on the Circular Economy: Coupled Distributed Recycling and Manufacturing with Recyclebot and RepRap 3-D Printing." *RESOURCES CONSERVATION AND RECYCLING* 128:48–58. doi: 10.1016/j.resconrec.2017.09.023.

ANEXOS

PARÁMETROS DE IMPRESIÓN (SIMULACIÓN CÁLCULO DE LA HUELLA)

Size	Type I	Type II	Type III	Type IV	Type V
Full length, l_3	165	185	165	115	
Parallel length, l_2	57	57	57	33	63.5
Gauge length, l_1	50	50	50	25	*
Parallel section width, $strong_1$	13	6	19	6	7.62
Thickness, h	7 mm or less (Recommend 3.2±0.4 mm)		7mm to 14mm	4mm or less	
Grip section width, $strong_2$	19	19	29	19	9.53
Distance between grips	115	135	115	65	25.4



POSICIONES DE LA PROBETA				PIEZAS CON VOLUMEN	
A	B	C	D	CEs	Ses
Acostada sobre el eje x	giro de 90°	giro de 45°	giro de 45° área más ancha	Esfera cortada a 45° de la tangente de la circunferencia	Semi esfera cortada por el radio

MATERIAL

ABS

PLA

PEEK

Unidades

Anexos

DENSIDAD	1.1	1.24	1.3	g/cm3
DIAMETRO	2.85	2.85	2.85	mm
TEMP IMPRESIÓN	255	200	350	°C
CAMA CALEFACTADA	100	0	120	°C
CAMARA CALEFACTADA	n/a	n/a	100	°C
VELOCIDAD	30	30	30	mm/s

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
ABS	1706	243.14	100%	CEs	0.1	12	30	553.70	0.002	0.00E+00	3.77	3.77	94.13	0.004	0.015	97.92	59925.25
ABS	1146	163.28	60%	CEs	0.1	12	30	368.75	0.002	0.00E+00	2.51	2.51	62.69	0.004	0.010	65.21	39910.29
ABS	1706	243.15	100%	CEs	0.15	12	30	351.25	0.002	0.00E+00	2.39	2.39	59.71	0.004	0.015	62.12	38019.84
ABS	1706	243.11	100%	CEs	0.1	12	50	335.22	0.002	0.00E+00	2.28	2.28	56.99	0.004	0.015	59.29	36285.00
ABS	907	129.29	100%	Ses	0.1	12	30	300.90	0.002	0.00E+00	2.05	2.05	51.15	0.004	0.008	53.21	32567.49
ABS	382	54.5	100%	D	0.1	12	30	256.27	0.002	0.00E+00	1.74	1.75	43.57	0.004	0.003	45.32	27735.21
ABS	381	54.34	60%	D	0.1	12	30	255.73	0.002	0.00E+00	1.74	1.74	43.47	0.004	0.003	45.22	27677.50
ABS	380	54.09	20%	D	0.1	12	30	255.27	0.002	0.00E+00	1.74	1.74	43.40	0.004	0.003	45.14	27627.00
ABS	1706	243.07	100%	CEs	0.1	12	70	247.08	0.002	0.00E+00	1.68	1.68	42.00	0.004	0.015	43.71	26748.84
ABS	1706	243.16	100%	CEs	0.2	12	30	240.75	0.002	0.00E+00	1.64	1.64	40.93	0.004	0.015	42.59	26063.56
ABS	1147	163.39	60%	CEs	0.15	12	30	233.38	0.002	0.00E+00	1.59	1.59	39.68	0.004	0.010	41.28	25263.40
ABS	1146	163.26	60%	CEs	0.1	12	50	224.65	0.002	0.00E+00	1.53	1.53	38.19	0.004	0.010	39.74	24318.43
ABS	1706	243.11	100%	CEs	0.15	12	50	215.05	0.002	0.00E+00	1.46	1.47	36.56	0.004	0.015	38.04	23282.78
ABS	625	89.07	60%	Ses	0.1	12	30	207.77	0.002	0.00E+00	1.41	1.42	35.32	0.004	0.006	36.75	22488.77
ABS	907	129.3	100%	Ses	0.15	12	30	193.63	0.002	0.00E+00	1.32	1.32	32.92	0.004	0.008	34.25	20961.07
ABS	907	129.27	100%	Ses	0.1	12	50	183.83	0.002	0.00E+00	1.25	1.25	31.25	0.004	0.008	32.52	19900.69
ABS	503	71.67	20%	CEs	0.1	12	30	183.70	0.002	0.00E+00	1.25	1.25	31.23	0.004	0.005	32.49	19884.04
ABS	382	54.5	100%	D	0.1	12	50	178.42	0.002	0.00E+00	1.21	1.22	30.33	0.004	0.003	31.56	19311.71
ABS	381	54.34	60%	D	0.1	12	50	178.02	0.002	0.00E+00	1.21	1.21	30.26	0.004	0.003	31.48	19268.43

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
ABS	380	54.09	20%	D	0.1	12	50	177.63	0.002	0.00E+00	1.21	1.21	30.20	0.004	0.003	31.42	19226.95
ABS	1145	163.23	60%	CEs	0.1	12	70	166.13	0.002	0.00E+00	1.13	1.13	28.24	0.004	0.010	29.39	17986.83
ABS	1145	163.18	60%	CEs	0.2	12	30	159.02	0.002	0.00E+00	1.08	1.08	27.03	0.004	0.010	28.13	17216.80
ABS	1706	243.05	100%	CEs	0.15	12	70	157.52	0.002	0.00E+00	1.07	1.07	26.78	0.004	0.015	27.87	17057.58
ABS	382	54.48	100%	D	0.15	12	30	148.13	0.002	0.00E+00	1.01	1.01	25.18	0.004	0.003	26.20	16035.01
ABS	382	54.4	60%	D	0.15	12	30	147.90	0.002	0.00E+00	1.01	1.01	25.14	0.004	0.003	26.16	16009.76
ABS	381	54.27	20%	D	0.15	12	30	147.75	0.002	0.00E+00	1.01	1.01	25.12	0.004	0.003	26.13	15993.53
ABS	1706	243.1	100%	CEs	0.2	12	50	146.57	0.002	0.00E+00	1.00	1.00	24.92	0.004	0.015	25.94	15872.77
ABS	382	54.5	100%	D	0.1	12	70	144.18	0.002	0.00E+00	0.98	0.98	24.51	0.004	0.003	25.50	15607.61
ABS	381	54.34	60%	D	0.1	12	70	143.72	0.002	0.00E+00	0.98	0.98	24.43	0.004	0.003	25.42	15557.11
ABS	1146	163.36	60%	CEs	0.15	12	50	143.30	0.002	0.00E+00	0.98	0.98	24.36	0.004	0.010	25.35	15516.23
ABS	380	54.09	20%	D	0.1	12	70	143.25	0.002	0.00E+00	0.98	0.98	24.35	0.004	0.003	25.34	15506.61
ABS	907	129.25	100%	Ses	0.1	12	70	136.52	0.002	0.00E+00	0.93	0.93	23.21	0.004	0.008	24.15	14780.95
ABS	626	89.18	60%	Ses	0.15	12	30	134.27	0.002	0.00E+00	0.91	0.92	22.83	0.004	0.006	23.75	14535.96
ABS	907	129.31	100%	Ses	0.2	12	30	132.45	0.002	0.00E+00	0.90	0.90	22.52	0.004	0.008	23.43	14340.93
ABS	625	89.06	60%	Ses	0.1	12	50	128.15	0.002	0.00E+00	0.87	0.87	21.79	0.004	0.006	22.67	13874.12
ABS	907	129.28	100%	Ses	0.15	12	50	119.88	0.002	0.00E+00	0.82	0.82	20.38	0.004	0.008	21.21	12981.20
ABS	504	71.88	20%	CEs	0.15	12	30	115.22	0.002	0.00E+00	0.78	0.79	19.59	0.004	0.005	20.38	12474.04
ABS	301	42.95	20%	Ses	0.1	12	30	114.58	0.002	0.00E+00	0.78	0.78	19.48	0.004	0.003	20.27	12404.40
ABS	503	71.64	20%	CEs	0.1	12	50	113.87	0.002	0.00E+00	0.78	0.78	19.36	0.004	0.005	20.14	12327.97
ABS	1706	243.04	100%	CEs	0.2	12	70	107.23	0.002	0.00E+00	0.73	0.73	18.23	0.004	0.015	18.98	11616.84
ABS	1146	163.33	60%	CEs	0.15	12	70	105.42	0.002	0.00E+00	0.72	0.72	17.92	0.004	0.010	18.66	11417.20
ABS	382	54.48	100%	D	0.15	12	50	99.37	0.002	0.00E+00	0.68	0.68	16.89	0.004	0.003	17.58	10758.38
ABS	382	54.4	60%	D	0.15	12	50	99.15	0.002	0.00E+00	0.68	0.68	16.86	0.004	0.003	17.54	10734.93
ABS	381	54.27	20%	D	0.15	12	50	98.98	0.002	0.00E+00	0.67	0.68	16.83	0.004	0.003	17.51	10716.90
ABS	1145	163.15	60%	CEs	0.2	12	50	97.42	0.002	0.00E+00	0.66	0.67	16.56	0.004	0.010	17.24	10551.58
ABS	382	54.38	100%	D	0.2	12	30	96.60	0.002	0.00E+00	0.66	0.66	16.42	0.004	0.003	17.09	10459.02

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
ABS	381	54.22	60%	D	0.2	12	30	96.37	0.002	0.00E+00	0.66	0.66	16.38	0.004	0.003	17.05	10433.77
ABS	380	54.1	20%	D	0.2	12	30	96.23	0.002	0.00E+00	0.66	0.66	16.36	0.004	0.003	17.03	10419.34
ABS	625	89.04	60%	Ses	0.1	12	70	95.68	0.002	0.00E+00	0.65	0.65	16.27	0.004	0.006	16.93	10361.17
ABS	624	88.88	60%	Ses	0.2	12	30	91.10	0.002	0.00E+00	0.62	0.62	15.49	0.004	0.006	16.12	9865.24
ABS	907	129.25	100%	Ses	0.15	12	70	88.58	0.002	0.00E+00	0.60	0.61	15.06	0.004	0.008	15.68	9594.49
ABS	503	71.64	20%	CEs	0.1	12	70	84.97	0.002	0.00E+00	0.58	0.58	14.44	0.004	0.005	15.03	9200.94
ABS	626	86.16	60%	Ses	0.15	12	50	83.63	0.002	0.00E+00	0.57	0.57	14.22	0.004	0.006	14.80	9057.35
ABS	907	129.28	100%	Ses	0.2	12	50	81.87	0.002	0.00E+00	0.56	0.56	13.92	0.004	0.008	14.49	8867.74
ABS	382	54.48	100%	D	0.15	12	70	81.62	0.002	0.00E+00	0.56	0.56	13.87	0.004	0.003	14.44	8837.80
ABS	382	54.4	60%	D	0.15	12	70	81.37	0.002	0.00E+00	0.55	0.56	13.83	0.004	0.003	14.40	8810.75
ABS	381	54.27	20%	D	0.15	12	70	81.13	0.002	0.00E+00	0.55	0.56	13.79	0.004	0.003	14.36	8785.50
ABS	501	71.44	20%	CEs	0.2	12	30	77.05	0.002	0.00E+00	0.53	0.53	13.10	0.004	0.005	13.63	8344.33
ABS	303	43.16	20%	Ses	0.15	12	30	74.87	0.002	0.00E+00	0.51	0.51	12.73	0.004	0.003	13.25	8107.00
ABS	301	42.94	20%	Ses	0.1	12	50	72.37	0.002	0.00E+00	0.49	0.50	12.30	0.004	0.003	12.80	7836.49
ABS	1145	163.11	60%	CEs	0.2	12	70	71.72	0.002	0.00E+00	0.49	0.49	12.19	0.004	0.010	12.70	7770.80
ABS	504	71.86	20%	CEs	0.15	12	50	71.23	0.002	0.00E+00	0.49	0.49	12.11	0.004	0.005	12.61	7714.98
ABS	382	54.38	100%	D	0.2	12	50	68.00	0.002	0.00E+00	0.46	0.47	11.56	0.004	0.003	12.03	7364.45
ABS	380	54.22	60%	D	0.2	12	50	67.78	0.002	0.00E+00	0.46	0.46	11.52	0.004	0.003	12.00	7341.00
ABS	379	53.97	20%	D	0.2	12	50	67.58	0.002	0.00E+00	0.46	0.46	11.49	0.004	0.003	11.96	7319.35
ABS	626	89.14	60%	Ses	0.15	12	70	62.35	0.002	0.00E+00	0.43	0.43	10.60	0.004	0.006	11.04	6754.46
ABS	111	15.77	100%	C	0.1	12	30	61.47	0.002	0.00E+00	0.42	0.42	10.45	0.004	0.001	10.88	6656.05
ABS	907	129.25	100%	Ses	0.2	12	70	60.78	0.002	0.00E+00	0.41	0.42	10.33	0.004	0.008	10.76	6586.49
ABS	108	15.33	60%	C	0.1	12	30	60.08	0.002	0.00E+00	0.41	0.41	10.21	0.004	0.001	10.63	6506.35
ABS	98	13.91	20%	C	0.1	12	30	57.17	0.002	0.00E+00	0.39	0.39	9.72	0.004	0.001	10.12	6190.71
ABS	624	88.86	60%	Ses	0.2	12	50	56.98	0.002	0.00E+00	0.39	0.39	9.69	0.004	0.006	10.09	6173.76
ABS	382	54.38	100%	D	0.2	12	70	56.57	0.002	0.00E+00	0.39	0.39	9.62	0.004	0.003	10.01	6127.35
ABS	380	54.22	60%	D	0.2	12	70	56.32	0.002	0.00E+00	0.38	0.39	9.57	0.004	0.003	9.97	6100.29

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
ABS	379	53.97	20%	D	0.2	12	70	56.07	0.002	0.00E+00	0.38	0.38	9.53	0.004	0.003	9.92	6073.23
ABS	301	42.93	20%	Ses	0.1	12	70	54.82	0.002	0.00E+00	0.37	0.38	9.32	0.004	0.003	9.70	5937.55
ABS	504	71.86	20%	CEs	0.15	12	70	53.17	0.002	0.00E+00	0.36	0.36	9.04	0.004	0.005	9.41	5760.13
ABS	91	13.04	20%	B	0.2	12	70	9.42	0.002	0.00E+00	0.07	0.07	1.60	0.004	0.001	1.67	1024.04
ABS	102	14.6	60%	B	0.2	12	70	10.12	0.002	0.00E+00	0.07	0.07	1.72	0.004	0.001	1.80	1099.85
ABS	298	42.52	20%	Ses	0.2	12	30	49.72	0.002	0.00E+00	0.34	0.34	8.45	0.004	0.003	8.80	5385.71
ABS	501	71.42	20%	CEs	0.2	12	50	48.08	0.002	0.00E+00	0.33	0.33	8.17	0.004	0.005	8.51	5210.09
ABS	104	14.84	100%	B	0.2	12	70	10.42	0.002	0.00E+00	0.07	0.07	1.77	0.004	0.001	1.85	1132.32
ABS	303	43.15	20%	Ses	0.15	12	50	47.40	0.002	0.00E+00	0.32	0.33	8.06	0.004	0.003	8.39	5135.07
ABS	105	15	100%	A	0.1	12	30	43.90	0.002	0.00E+00	0.30	0.30	7.46	0.004	0.001	7.77	4755.27
ABS	623	88.84	60%	Ses	0.2	12	70	42.82	0.002	0.00E+00	0.29	0.29	7.28	0.004	0.006	7.58	4640.90
ABS	111	15.77	100%	C	0.1	12	50	42.08	0.002	0.00E+00	0.29	0.29	7.15	0.004	0.001	7.45	4558.74
ABS	108	15.33	60%	C	0.1	12	50	41.18	0.002	0.00E+00	0.28	0.28	7.00	0.004	0.001	7.29	4461.34
ABS	94	13.46	60%	A	0.1	12	30	40.30	0.002	0.00E+00	0.28	0.28	6.85	0.004	0.001	7.13	4365.69
ABS	98	13.91	20%	C	0.1	12	50	39.30	0.002	0.00E+00	0.27	0.27	6.68	0.004	0.001	6.96	4257.51
ABS	82	11.73	20%	A	0.1	12	30	36.83	0.002	0.00E+00	0.25	0.25	6.26	0.004	0.001	6.52	3990.52
ABS	501	71.41	20%	CEs	0.2	12	70	36.05	0.002	0.00E+00	0.25	0.25	6.13	0.004	0.005	6.39	3908.07
ABS	303	43.14	20%	Ses	0.15	12	70	36.05	0.002	0.00E+00	0.25	0.25	6.13	0.004	0.003	6.38	3906.98
ABS	110	15.67	100%	C	0.15	12	30	35.93	0.002	0.00E+00	0.25	0.25	6.11	0.004	0.001	6.36	3893.29
ABS	107	15.23	60%	C	0.15	12	30	35.07	0.002	0.00E+00	0.24	0.24	5.96	0.004	0.001	6.21	3799.50
ABS	111	15.77	100%	C	0.1	12	70	34.33	0.002	0.00E+00	0.23	0.24	5.84	0.004	0.001	6.08	3720.18
ABS	108	15.33	60%	C	0.1	12	70	33.52	0.002	0.00E+00	0.23	0.23	5.70	0.004	0.001	5.93	3631.80
ABS	91	13.04	20%	B	0.2	12	50	11.93	0.002	0.00E+00	0.08	0.08	2.03	0.004	0.001	2.12	1296.35
ABS	97	13.82	20%	C	0.15	12	30	33.20	0.002	0.00E+00	0.23	0.23	5.64	0.004	0.001	5.88	3597.47
ABS	102	14.6	60%	B	0.2	12	50	12.72	0.002	0.00E+00	0.09	0.09	2.16	0.004	0.001	2.26	1381.17
ABS	298	42.51	20%	Ses	0.2	12	50	32.07	0.002	0.00E+00	0.22	0.22	5.45	0.004	0.003	5.68	3475.95
ABS	98	13.91	20%	C	0.1	12	70	31.85	0.002	0.00E+00	0.22	0.22	5.41	0.004	0.001	5.64	3451.41

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
ABS	105	15.01	100%	A	0.15	12	30	31.32	0.002	0.00E+00	0.21	0.22	5.32	0.004	0.001	5.55	3393.74
ABS	104	14.84	100%	B	0.2	12	50	13.03	0.002	0.00E+00	0.09	0.09	2.22	0.004	0.001	2.31	1415.44
ABS	91	13.03	20%	B	0.15	12	70	13.67	0.002	0.00E+00	0.09	0.10	2.32	0.004	0.001	2.42	1483.90
ABS	102	14.58	60%	B	0.15	12	70	14.62	0.002	0.00E+00	0.10	0.10	2.48	0.004	0.001	2.59	1586.75
ABS	95	13.54	60%	A	0.15	12	30	29.12	0.002	0.00E+00	0.20	0.20	4.95	0.004	0.001	5.16	3155.64
ABS	105	15	100%	A	0.1	12	50	28.27	0.002	0.00E+00	0.19	0.20	4.81	0.004	0.001	5.01	3063.72
ABS	104	14.78	100%	B	0.15	12	70	14.98	0.002	0.00E+00	0.10	0.11	2.55	0.004	0.001	2.66	1626.44
ABS	83	11.89	20%	A	0.15	12	30	27.02	0.002	0.00E+00	0.19	0.19	4.59	0.004	0.001	4.78	2928.35
ABS	94	13.46	60%	A	0.1	12	50	26.08	0.002	0.00E+00	0.18	0.18	4.43	0.004	0.001	4.62	2827.42
ABS	91	13.03	20%	B	0.15	12	50	17.48	0.002	0.00E+00	0.12	0.12	2.97	0.004	0.001	3.10	1896.87
ABS	91	13.04	20%	B	0.2	12	30	18.17	0.002	0.00E+00	0.12	0.13	3.09	0.004	0.001	3.22	1970.81
ABS	298	42.5	20%	Ses	0.2	12	70	24.78	0.002	0.00E+00	0.17	0.17	4.21	0.004	0.003	4.39	2687.88
ABS	110	15.67	100%	C	0.15	12	50	24.33	0.002	0.00E+00	0.17	0.17	4.14	0.004	0.001	4.31	2638.16
ABS	82	11.73	20%	A	0.1	12	50	24.02	0.002	0.00E+00	0.16	0.17	4.08	0.004	0.001	4.25	2603.74
ABS	110	15.67	100%	C	0.2	12	30	24.00	0.002	0.00E+00	0.16	0.17	4.08	0.004	0.001	4.25	2602.09
ABS	102	14.58	60%	B	0.15	12	50	18.62	0.002	0.00E+00	0.13	0.13	3.16	0.004	0.001	3.30	2019.56
ABS	107	15.23	60%	C	0.15	12	50	23.77	0.002	0.00E+00	0.16	0.17	4.04	0.004	0.001	4.21	2576.83
ABS	107	15.24	60%	C	0.2	12	30	23.40	0.002	0.00E+00	0.16	0.16	3.98	0.004	0.001	4.15	2537.15
ABS	97	13.82	20%	C	0.15	12	50	22.52	0.002	0.00E+00	0.15	0.16	3.83	0.004	0.001	3.99	2441.52
ABS	97	13.82	20%	C	0.2	12	30	22.08	0.002	0.00E+00	0.15	0.15	3.75	0.004	0.001	3.91	2394.63
ABS	105	15	100%	A	0.1	12	70	21.70	0.002	0.00E+00	0.15	0.15	3.69	0.004	0.001	3.85	2353.20
ABS	105	15.01	100%	A	0.2	12	30	20.80	0.002	0.00E+00	0.14	0.14	3.54	0.004	0.001	3.69	2255.82
ABS	110	15.67	100%	C	0.15	12	70	20.42	0.002	0.00E+00	0.14	0.14	3.47	0.004	0.001	3.62	2214.37
ABS	105	15.01	100%	A	0.15	12	50	20.25	0.002	0.00E+00	0.14	0.14	3.44	0.004	0.001	3.59	2196.31
ABS	94	13.46	60%	A	0.1	12	70	20.08	0.002	0.00E+00	0.14	0.14	3.41	0.004	0.001	3.56	2178.21
ABS	107	15.23	60%	C	0.15	12	70	19.88	0.002	0.00E+00	0.14	0.14	3.38	0.004	0.001	3.52	2156.64
ABS	104	14.78	100%	B	0.15	12	50	18.97	0.002	0.00E+00	0.13	0.13	3.22	0.004	0.001	3.36	2057.44

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
ABS	102	14.6	60%	B	0.2	12	30	19.45	0.002	0.00E+00	0.13	0.14	3.31	0.004	0.001	3.45	2109.73
ABS	94	13.32	60%	A	0.2	12	30	19.07	0.002	0.00E+00	0.13	0.13	3.24	0.004	0.001	3.38	2068.21
ABS	104	14.84	100%	B	0.2	12	30	19.87	0.002	0.00E+00	0.14	0.14	3.38	0.004	0.001	3.52	2154.82
ABS	95	13.54	60%	A	0.15	12	50	18.90	0.002	0.00E+00	0.13	0.13	3.21	0.004	0.001	3.35	2050.18
ABS	97	13.82	20%	C	0.15	12	70	18.77	0.002	0.00E+00	0.13	0.13	3.19	0.004	0.001	3.33	2035.76
ABS	92	13.06	20%	B	0.1	12	70	23.83	0.002	0.00E+00	0.16	0.17	4.05	0.004	0.001	4.22	2583.96
ABS	82	11.73	20%	A	0.1	12	70	18.55	0.002	0.00E+00	0.13	0.13	3.15	0.004	0.001	3.29	2012.24
ABS	103	14.63	60%	B	0.1	12	70	25.25	0.002	0.00E+00	0.17	0.18	4.29	0.004	0.001	4.47	2737.30
ABS	83	11.89	20%	A	0.15	12	50	17.62	0.002	0.00E+00	0.12	0.12	2.99	0.004	0.001	3.12	1911.25
ABS	104	14.84	100%	B	0.1	12	70	25.83	0.002	0.00E+00	0.18	0.18	4.39	0.004	0.001	4.58	2800.43
ABS	80	11.44	20%	A	0.2	12	30	17.40	0.002	0.00E+00	0.12	0.12	2.96	0.004	0.001	3.08	1887.79
ABS	110	15.67	100%	C	0.2	12	50	16.98	0.002	0.00E+00	0.12	0.12	2.89	0.004	0.001	3.01	1842.87
ABS	107	15.24	60%	C	0.2	12	50	16.57	0.002	0.00E+00	0.11	0.12	2.82	0.004	0.001	2.94	1797.77
ABS	97	13.82	20%	C	0.2	12	50	15.67	0.002	0.00E+00	0.11	0.11	2.66	0.004	0.001	2.78	1700.34
ABS	105	15.02	100%	A	0.15	12	70	15.60	0.002	0.00E+00	0.11	0.11	2.65	0.004	0.001	2.77	1693.17
ABS	91	13.03	20%	B	0.15	12	30	27.63	0.002	0.00E+00	0.19	0.19	4.70	0.004	0.001	4.89	2995.12
ABS	102	14.58	60%	B	0.15	12	30	29.52	0.002	0.00E+00	0.20	0.20	5.02	0.004	0.001	5.23	3198.96
ABS	95	13.53	60%	A	0.15	12	70	14.62	0.002	0.00E+00	0.10	0.10	2.48	0.004	0.001	2.59	1586.71
ABS	110	15.67	100%	C	0.2	12	70	14.48	0.002	0.00E+00	0.10	0.10	2.46	0.004	0.001	2.57	1572.37
ABS	107	15.24	60%	C	0.2	12	70	14.08	0.002	0.00E+00	0.10	0.10	2.39	0.004	0.001	2.50	1529.07
ABS	105	15.01	100%	A	0.2	12	50	13.85	0.002	0.00E+00	0.10	0.10	2.35	0.004	0.001	2.46	1503.81
ABS	104	14.78	100%	B	0.15	12	30	30.03	0.002	0.00E+00	0.21	0.21	5.11	0.004	0.001	5.32	3254.87
ABS	83	11.85	20%	A	0.15	12	70	13.65	0.002	0.00E+00	0.09	0.10	2.32	0.004	0.001	2.42	1482.05
ABS	97	13.82	20%	C	0.2	12	70	13.25	0.002	0.00E+00	0.09	0.09	2.25	0.004	0.001	2.35	1438.85
ABS	92	13.06	20%	B	0.1	12	50	30.90	0.002	0.00E+00	0.21	0.21	5.25	0.004	0.001	5.47	3348.58
ABS	94	13.32	60%	A	0.2	12	50	12.78	0.002	0.00E+00	0.09	0.09	2.17	0.004	0.001	2.27	1388.34
ABS	103	14.63	60%	B	0.1	12	50	32.63	0.002	0.00E+00	0.22	0.23	5.55	0.004	0.001	5.78	3536.19

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
ABS	104	14.84	100%	B	0.1	12	50	33.22	0.002	0.00E+00	0.23	0.23	5.65	0.004	0.001	5.88	3599.31
ABS	80	11.44	20%	A	0.2	12	50	11.78	0.002	0.00E+00	0.08	0.08	2.00	0.004	0.001	2.09	1280.06
ABS	105	15.02	100%	A	0.2	12	70	11.03	0.002	0.00E+00	0.08	0.08	1.88	0.004	0.001	1.96	1199.05
ABS	92	13.06	20%	B	0.1	12	30	47.53	0.002	0.00E+00	0.32	0.33	8.08	0.004	0.001	8.41	5148.33
ABS	93	13.32	60%	A	0.2	12	70	10.27	0.002	0.00E+00	0.07	0.07	1.75	0.004	0.001	1.82	1116.03
ABS	103	14.63	60%	B	0.1	12	30	50.50	0.002	0.00E+00	0.34	0.35	8.59	0.004	0.001	8.94	5469.39
ABS	80	11.39	20%	A	0.2	12	70	9.50	0.002	0.00E+00	0.07	0.07	1.62	0.004	0.001	1.69	1033.00
ABS	104	14.84	100%	B	0.1	12	30	51.37	0.002	0.00E+00	0.35	0.35	8.73	0.004	0.001	9.09	5563.17
PEEK	2117	255.25	100%	CEs	0.1	12	20	1101.57	0.002	6.67E-05	151.94	151.95	206.54	0.021	0.025	358.54	219424.73
PEEK	2117	255.25	100%	CEs	0.1	12	25	894.00	0.002	6.67E-05	123.34	123.34	167.63	0.021	0.025	291.01	178100.03
PEEK	2117	255.25	100%	CEs	0.1	12	30	755.63	0.002	6.67E-05	104.27	104.27	141.68	0.021	0.025	246.00	150552.43
PEEK	2117	255.25	100%	CEs	0.15	12	20	734.90	0.002	6.67E-05	101.41	101.42	137.79	0.021	0.025	239.26	146424.61
PEEK	1124	135.5	100%	Ses	0.1	12	20	583.13	0.002	6.67E-05	80.50	80.50	109.34	0.021	0.013	189.87	116202.08
PEEK	2117	255.25	100%	CEs	0.15	12	25	575.17	0.002	6.67E-05	79.40	79.40	107.84	0.021	0.025	187.29	114623.10
PEEK	2117	255.25	100%	CEs	0.2	12	20	551.55	0.002	6.67E-05	76.15	76.15	103.42	0.021	0.025	179.61	109921.23
PEEK	2117	255.25	100%	CEs	0.15	12	30	504.10	0.002	6.67E-05	69.61	69.61	94.52	0.021	0.025	164.17	100474.35
PEEK	1124	135.5	100%	Ses	0.1	12	25	473.63	0.002	6.67E-05	65.41	65.41	88.81	0.021	0.013	154.25	94401.59
PEEK	2117	255.25	100%	CEs	0.2	12	25	447.63	0.002	6.67E-05	61.82	61.83	83.93	0.021	0.025	145.80	89232.33
PEEK	1124	135.5	100%	Ses	0.1	12	30	400.63	0.002	6.67E-05	55.35	55.35	75.12	0.021	0.013	130.50	79867.93
PEEK	1357	163.63	60%	CEs	0.1	12	20	394.23	0.002	6.67E-05	54.47	54.47	73.92	0.021	0.016	128.42	78595.41
PEEK	1357	163.63	60%	CEs	0.1	12	25	389.87	0.002	6.67E-05	53.86	53.87	73.10	0.021	0.016	127.00	77726.05
PEEK	1124	135.5	100%	Ses	0.15	12	20	389.73	0.002	6.67E-05	53.85	53.85	73.08	0.021	0.013	126.96	77697.83
PEEK	1357	163.63	60%	CEs	0.1	12	30	386.95	0.002	6.67E-05	53.46	53.46	72.55	0.021	0.016	126.05	77145.36
PEEK	2117	255.25	100%	CEs	0.2	12	30	378.35	0.002	6.67E-05	52.28	52.28	70.94	0.021	0.025	123.27	75438.62
PEEK	1124	135.5	100%	Ses	0.15	12	25	305.40	0.002	6.67E-05	42.22	42.23	57.26	0.021	0.013	99.52	60907.80
PEEK	1124	135.5	100%	Ses	0.2	12	20	293.03	0.002	6.67E-05	40.52	40.52	54.94	0.021	0.013	95.50	58445.71
PEEK	1124	135.5	100%	Ses	0.15	12	30	267.75	0.002	6.67E-05	37.03	37.04	50.20	0.021	0.013	87.27	53412.02

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
PEEK	1358	163.71	60%	CEs	0.15	12	20	263.85	0.002	6.67E-05	36.50	36.50	49.47	0.021	0.016	86.01	52637.24
PEEK	1358	163.71	60%	CEs	0.15	12	25	260.28	0.002	6.67E-05	36.01	36.01	48.80	0.021	0.016	84.85	51927.15
PEEK	1358	163.71	60%	CEs	0.15	12	30	258.63	0.002	6.67E-05	35.78	35.78	48.49	0.021	0.016	84.31	51598.65
PEEK	1124	135.5	100%	Ses	0.2	12	25	238.00	0.002	6.67E-05	32.93	32.94	44.63	0.021	0.013	77.60	47489.05
PEEK	740	89.26	60%	Ses	0.1	12	20	226.78	0.002	6.67E-05	31.39	31.39	42.52	0.021	0.009	73.94	45253.16
PEEK	740	89.26	60%	Ses	0.1	12	25	219.88	0.002	6.67E-05	30.44	30.44	41.23	0.021	0.009	71.70	43879.43
PEEK	740	89.26	60%	Ses	0.1	12	30	215.28	0.002	6.67E-05	29.80	29.81	40.37	0.021	0.009	70.20	42963.61
PEEK	1124	135.5	100%	Ses	0.2	12	30	201.32	0.002	6.67E-05	27.88	27.88	37.75	0.021	0.013	65.66	40185.72
PEEK	1356	163.49	60%	CEs	0.2	12	20	197.35	0.002	6.67E-05	27.33	27.34	37.00	0.021	0.016	64.38	39397.66
PEEK	1356	163.49	60%	CEs	0.2	12	25	195.18	0.002	6.67E-05	27.03	27.04	36.60	0.021	0.016	63.67	38966.29
PEEK	1356	163.49	60%	CEs	0.2	12	30	193.72	0.002	6.67E-05	26.83	26.83	36.32	0.021	0.016	63.19	38674.29
PEEK	596	71.9	20%	CEs	0.1	12	20	187.22	0.002	6.67E-05	25.94	25.94	35.10	0.021	0.007	61.07	37374.75
PEEK	596	71.9	20%	CEs	0.1	12	25	182.85	0.002	6.67E-05	25.33	25.34	34.28	0.021	0.007	59.65	36505.39
PEEK	596	71.9	20%	CEs	0.1	12	30	179.93	0.002	6.67E-05	24.93	24.93	33.74	0.021	0.007	58.70	35924.71
PEEK	422	50.9	20%	D	0.2	12	30	69.28	0.002	6.67E-05	9.68	9.69	12.99	0.021	0.005	22.70	13894.01
PEEK	422	50.9	20%	D	0.2	12	25	69.35	0.002	6.67E-05	9.69	9.70	13.00	0.021	0.005	22.72	13907.29
PEEK	422	50.9	20%	D	0.2	12	20	69.43	0.002	6.67E-05	9.70	9.71	13.02	0.021	0.005	22.75	13923.88
PEEK	741	89.36	60%	Ses	0.15	12	20	152.78	0.002	6.67E-05	21.19	21.19	28.65	0.021	0.009	49.87	30520.42
PEEK	741	89.36	60%	Ses	0.15	12	25	147.22	0.002	6.67E-05	20.42	20.43	27.60	0.021	0.009	48.06	29412.14
PEEK	445	53.66	60%	D	0.2	12	30	73.22	0.002	6.67E-05	10.23	10.23	13.73	0.021	0.005	23.98	14677.27
PEEK	445	53.66	60%	D	0.2	12	25	73.27	0.002	6.67E-05	10.23	10.23	13.74	0.021	0.005	24.00	14687.23
PEEK	445	53.66	60%	D	0.2	12	20	73.35	0.002	6.67E-05	10.24	10.25	13.75	0.021	0.005	24.03	14703.82
PEEK	741	89.36	60%	Ses	0.15	12	30	144.57	0.002	6.67E-05	20.06	20.06	27.11	0.021	0.009	47.20	28884.55
PEEK	459	55.33	100%	D	0.2	12	30	77.02	0.002	6.67E-05	10.75	10.75	14.44	0.021	0.005	25.22	15433.92
PEEK	459	55.33	100%	D	0.2	12	25	79.10	0.002	6.67E-05	11.04	11.04	14.83	0.021	0.005	25.90	15848.69
PEEK	459	55.33	100%	D	0.2	12	20	82.23	0.002	6.67E-05	11.47	11.47	15.42	0.021	0.005	26.92	16472.51
PEEK	598	72.08	20%	CEs	0.15	12	20	125.95	0.002	6.67E-05	17.49	17.50	23.62	0.021	0.007	41.14	25177.11

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
PEEK	598	72.08	20%	CEs	0.15	12	25	122.40	0.002	6.67E-05	17.00	17.01	22.95	0.021	0.007	39.98	24470.34
PEEK	356	42.94	20%	Ses	0.1	12	20	122.15	0.002	6.67E-05	16.97	16.97	22.90	0.021	0.004	39.90	24418.83
PEEK	598	72.08	20%	CEs	0.15	12	30	120.73	0.002	6.67E-05	16.77	16.78	22.64	0.021	0.007	39.44	24138.52
PEEK	356	42.94	20%	Ses	0.1	12	25	115.25	0.002	6.67E-05	16.02	16.02	21.61	0.021	0.004	37.66	23045.10
PEEK	738	89.01	60%	Ses	0.2	12	20	113.88	0.002	6.67E-05	15.83	15.83	21.35	0.021	0.009	37.22	22775.75
PEEK	423	50.99	20%	D	0.15	12	30	92.45	0.002	6.67E-05	12.88	12.88	17.33	0.021	0.005	30.24	18506.30
PEEK	356	42.94	20%	Ses	0.1	12	30	110.65	0.002	6.67E-05	15.38	15.39	20.75	0.021	0.004	36.16	22129.28
PEEK	738	89.01	60%	Ses	0.2	12	25	110.43	0.002	6.67E-05	15.35	15.36	20.71	0.021	0.009	36.09	22088.88
PEEK	738	89.01	60%	Ses	0.2	12	30	108.12	0.002	6.67E-05	15.04	15.04	20.27	0.021	0.009	35.34	21627.65
PEEK	423	50.99	20%	D	0.15	12	25	92.50	0.002	6.67E-05	12.88	12.89	17.34	0.021	0.005	30.26	18516.26
PEEK	423	50.99	20%	D	0.15	12	20	92.58	0.002	6.67E-05	12.89	12.90	17.36	0.021	0.005	30.28	18532.85
PEEK	446	53.75	60%	D	0.15	12	30	97.65	0.002	6.67E-05	13.59	13.60	18.31	0.021	0.005	31.93	19541.74
PEEK	446	53.75	60%	D	0.15	12	25	97.72	0.002	6.67E-05	13.60	13.60	18.32	0.021	0.005	31.95	19555.01
PEEK	446	53.75	60%	D	0.15	12	20	97.80	0.002	6.67E-05	13.61	13.62	18.34	0.021	0.005	31.98	19571.60
PEEK	594	71.63	20%	CEs	0.2	12	20	93.68	0.002	6.67E-05	13.05	13.05	17.57	0.021	0.007	30.64	18753.07
PEEK	460	55.43	100%	D	0.15	12	30	104.92	0.002	6.67E-05	14.59	14.60	19.67	0.021	0.005	34.30	20988.57
PEEK	460	55.43	100%	D	0.15	12	25	107.05	0.002	6.67E-05	14.89	14.89	20.07	0.021	0.005	34.99	21413.30
PEEK	460	55.43	100%	D	0.15	12	20	111.82	0.002	6.67E-05	15.55	15.55	20.97	0.021	0.005	36.54	22362.30
PEEK	594	71.63	20%	CEs	0.2	12	25	91.52	0.002	6.67E-05	12.75	12.75	17.16	0.021	0.007	29.94	18321.71
PEEK	594	71.63	20%	CEs	0.2	12	30	90.05	0.002	6.67E-05	12.55	12.55	16.88	0.021	0.007	29.46	18029.71
PEEK	358	43.14	20%	Ses	0.15	12	20	83.17	0.002	6.67E-05	11.60	11.60	15.59	0.021	0.004	27.22	16657.61
PEEK	423	51.03	20%	D	0.1	12	30	138.27	0.002	6.67E-05	19.19	19.19	25.93	0.021	0.005	45.14	27628.00
PEEK	423	51.03	20%	D	0.1	12	25	138.32	0.002	6.67E-05	19.20	19.20	25.93	0.021	0.005	45.16	27637.95
PEEK	140	16.92	100%	C	0.1	12	20	77.75	0.002	6.67E-05	10.85	10.85	14.58	0.021	0.002	25.45	15577.63
PEEK	358	43.14	20%	Ses	0.15	12	25	77.60	0.002	6.67E-05	10.83	10.83	14.55	0.021	0.004	25.41	15549.33
PEEK	423	51.03	20%	D	0.1	12	20	138.42	0.002	6.67E-05	19.21	19.21	25.95	0.021	0.005	45.19	27657.86
PEEK	358	43.14	20%	Ses	0.15	12	30	74.95	0.002	6.67E-05	10.46	10.47	14.05	0.021	0.004	24.55	15021.74

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
PEEK	140	16.92	100%	C	0.1	12	25	74.42	0.002	6.67E-05	10.39	10.39	13.95	0.021	0.002	24.37	14914.00
PEEK	446	53.79	60%	D	0.1	12	30	146.08	0.002	6.67E-05	20.27	20.27	27.39	0.021	0.005	47.69	29184.39
PEEK	446	53.79	60%	D	0.1	12	25	146.13	0.002	6.67E-05	20.27	20.28	27.40	0.021	0.005	47.70	29194.35
PEEK	446	53.79	60%	D	0.1	12	20	146.23	0.002	6.67E-05	20.29	20.29	27.42	0.021	0.005	47.74	29214.26
PEEK	140	16.92	100%	C	0.1	12	30	72.18	0.002	6.67E-05	10.08	10.09	13.53	0.021	0.002	23.64	14469.36
PEEK	460	55.46	100%	D	0.1	12	30	157.05	0.002	6.67E-05	21.78	21.78	29.45	0.021	0.005	51.25	31367.86
PEEK	460	55.46	100%	D	0.1	12	25	161.15	0.002	6.67E-05	22.34	22.35	30.22	0.021	0.005	52.59	32184.14
PEEK	460	55.46	100%	D	0.1	12	20	167.33	0.002	6.67E-05	23.20	23.20	31.38	0.021	0.005	54.60	33415.18
PEEK	129	15.55	60%	C	0.1	12	20	68.10	0.002	6.67E-05	9.52	9.52	12.77	0.021	0.002	22.31	13656.32
PEEK	129	15.55	60%	C	0.1	12	25	68.07	0.002	6.67E-05	9.52	9.52	12.76	0.021	0.002	22.30	13649.69
PEEK	129	15.55	60%	C	0.1	12	30	68.03	0.002	6.67E-05	9.51	9.51	12.76	0.021	0.002	22.29	13643.05
PEEK	129	15.5	100%	A	0.1	12	20	63.17	0.002	6.67E-05	8.84	8.84	11.84	0.021	0.002	20.71	12674.14
PEEK	352	42.45	20%	Ses	0.2	12	20	61.30	0.002	6.67E-05	8.58	8.59	11.49	0.021	0.004	20.10	12304.10
PEEK	117	14.12	20%	C	0.1	12	20	60.15	0.002	6.67E-05	8.42	8.43	11.28	0.021	0.001	19.73	12073.46
PEEK	117	14.12	20%	C	0.1	12	25	60.12	0.002	6.67E-05	8.42	8.42	11.27	0.021	0.001	19.72	12066.83
PEEK	117	14.12	20%	C	0.1	12	30	60.08	0.002	6.67E-05	8.42	8.42	11.27	0.021	0.001	19.71	12060.19
PEEK	352	42.45	20%	Ses	0.2	12	25	57.83	0.002	6.67E-05	8.11	8.11	10.84	0.021	0.004	18.98	11613.92
PEEK	135	16.3	100%	B	0.1	12	20	56.32	0.002	6.67E-05	7.90	7.90	10.56	0.021	0.002	18.48	11310.41
PEEK	352	42.45	20%	Ses	0.2	12	30	55.53	0.002	6.67E-05	7.79	7.79	10.41	0.021	0.004	18.23	11156.01
PEEK	135	16.3	100%	B	0.1	12	25	52.60	0.002	6.67E-05	7.38	7.39	9.86	0.021	0.002	17.27	10570.45
PEEK	140	16.86	100%	C	0.15	12	20	52.43	0.002	6.67E-05	7.36	7.36	9.83	0.021	0.002	17.22	10537.31
PEEK	129	15.5	100%	A	0.1	12	25	52.02	0.002	6.67E-05	7.30	7.31	9.75	0.021	0.002	17.08	10454.27
PEEK	135	16.3	100%	B	0.1	12	30	50.12	0.002	6.67E-05	7.04	7.04	9.40	0.021	0.002	16.46	10076.04
PEEK	140	16.86	100%	C	0.15	12	25	49.87	0.002	6.67E-05	7.01	7.01	9.35	0.021	0.002	16.38	10026.31
PEEK	114	13.73	60%	A	0.1	12	20	49.52	0.002	6.67E-05	6.96	6.96	9.28	0.021	0.001	16.27	9956.44
PEEK	140	16.86	100%	C	0.15	12	30	48.15	0.002	6.67E-05	6.77	6.77	9.03	0.021	0.002	15.82	9684.53
PEEK	124	14.95	60%	B	0.1	12	20	47.10	0.002	6.67E-05	6.63	6.63	8.83	0.021	0.001	15.48	9475.37

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
PEEK	124	14.95	60%	B	0.1	12	25	46.33	0.002	6.67E-05	6.52	6.52	8.69	0.021	0.001	15.23	9322.74
PEEK	128	15.48	60%	C	0.15	12	20	46.05	0.002	6.67E-05	6.48	6.48	8.63	0.021	0.001	15.14	9266.36
PEEK	124	14.95	60%	B	0.1	12	30	45.82	0.002	6.67E-05	6.45	6.45	8.59	0.021	0.001	15.07	9219.87
PEEK	128	15.48	60%	C	0.15	12	25	45.68	0.002	6.67E-05	6.43	6.43	8.57	0.021	0.001	15.02	9193.35
PEEK	99	11.96	20%	A	0.1	12	20	45.47	0.002	6.67E-05	6.40	6.40	8.53	0.021	0.001	14.95	9150.01
PEEK	128	15.48	60%	C	0.15	12	30	45.43	0.002	6.67E-05	6.40	6.40	8.52	0.021	0.001	14.94	9143.58
PEEK	129	15.5	100%	A	0.1	12	30	44.58	0.002	6.67E-05	6.28	6.28	8.36	0.021	0.002	14.66	8974.36
PEEK	116	14	20%	C	0.15	12	20	42.92	0.002	6.67E-05	6.05	6.05	8.05	0.021	0.001	14.12	8642.45
PEEK	129	15.5	100%	A	0.15	12	20	42.90	0.002	6.67E-05	6.05	6.05	8.04	0.021	0.002	14.12	8639.22
PEEK	112	13.53	20%	B	0.1	12	20	42.75	0.002	6.67E-05	6.03	6.03	8.02	0.021	0.001	14.07	8609.24
PEEK	116	14	20%	C	0.15	12	25	42.53	0.002	6.67E-05	6.00	6.00	7.98	0.021	0.001	14.00	8566.13
PEEK	114	13.73	60%	A	0.1	12	25	42.30	0.002	6.67E-05	5.96	5.97	7.93	0.021	0.001	13.92	8519.66
PEEK	112	13.53	20%	B	0.1	12	25	42.23	0.002	6.67E-05	5.96	5.96	7.92	0.021	0.001	13.90	8506.38
PEEK	116	14	20%	C	0.15	12	30	42.12	0.002	6.67E-05	5.94	5.94	7.90	0.021	0.001	13.86	8483.18
PEEK	112	13.53	20%	B	0.1	12	30	41.87	0.002	6.67E-05	5.91	5.91	7.85	0.021	0.001	13.78	8433.38
PEEK	140	16.86	100%	C	0.2	12	20	39.15	0.002	6.67E-05	5.53	5.53	7.34	0.021	0.002	12.90	7892.71
PEEK	99	11.96	20%	A	0.1	12	25	38.23	0.002	6.67E-05	5.40	5.41	7.17	0.021	0.001	12.60	7709.92
PEEK	135	16.24	100%	B	0.15	12	20	37.60	0.002	6.67E-05	5.32	5.32	7.05	0.021	0.002	12.39	7584.08
PEEK	114	13.73	60%	A	0.1	12	30	37.48	0.002	6.67E-05	5.30	5.30	7.03	0.021	0.001	12.35	7560.71
PEEK	140	16.86	100%	C	0.2	12	25	37.40	0.002	6.67E-05	5.29	5.29	7.01	0.021	0.002	12.33	7544.30
PEEK	140	16.86	100%	C	0.2	12	30	36.12	0.002	6.67E-05	5.11	5.12	6.77	0.021	0.002	11.91	7288.80
PEEK	129	15.5	100%	A	0.15	12	25	35.32	0.002	6.67E-05	5.00	5.00	6.62	0.021	0.002	11.65	7129.45
PEEK	135	16.24	100%	B	0.15	12	25	34.95	0.002	6.67E-05	4.95	4.95	6.55	0.021	0.002	11.53	7056.49
PEEK	128	15.48	60%	C	0.2	12	20	34.48	0.002	6.67E-05	4.89	4.89	6.47	0.021	0.001	11.38	6963.53
PEEK	128	15.48	60%	C	0.2	12	25	34.20	0.002	6.67E-05	4.85	4.85	6.41	0.021	0.001	11.29	6907.12
PEEK	115	13.81	60%	A	0.15	12	20	34.20	0.002	6.67E-05	4.85	4.85	6.41	0.021	0.001	11.29	6907.03
PEEK	128	15.48	60%	C	0.2	12	30	34.02	0.002	6.67E-05	4.82	4.83	6.38	0.021	0.001	11.23	6870.62

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
PEEK	99	11.96	20%	A	0.1	12	30	33.40	0.002	6.67E-05	4.74	4.74	6.26	0.021	0.001	11.03	6747.64
PEEK	135	16.24	100%	B	0.15	12	30	33.02	0.002	6.67E-05	4.69	4.69	6.19	0.021	0.002	10.90	6671.58
PEEK	129	15.5	100%	A	0.2	12	20	32.75	0.002	6.67E-05	4.65	4.65	6.14	0.021	0.002	10.81	6618.45
PEEK	116	13.98	20%	C	0.2	12	20	32.13	0.002	6.67E-05	4.56	4.57	6.03	0.021	0.001	10.61	6495.58
PEEK	116	13.98	20%	C	0.2	12	25	31.85	0.002	6.67E-05	4.52	4.53	5.97	0.021	0.001	10.52	6439.17
PEEK	116	13.98	20%	C	0.2	12	30	31.67	0.002	6.67E-05	4.50	4.50	5.94	0.021	0.001	10.46	6402.67
PEEK	101	12.12	20%	A	0.15	12	20	31.63	0.002	6.67E-05	4.49	4.50	5.93	0.021	0.001	10.45	6395.93
PEEK	124	14.9	60%	B	0.15	12	20	31.48	0.002	6.67E-05	4.47	4.48	5.90	0.021	0.001	10.40	6366.23
PEEK	124	14.9	60%	B	0.15	12	25	30.95	0.002	6.67E-05	4.40	4.40	5.80	0.021	0.001	10.23	6260.05
PEEK	124	14.9	60%	B	0.15	12	30	30.58	0.002	6.67E-05	4.35	4.35	5.73	0.021	0.001	10.11	6187.05
PEEK	129	15.5	100%	A	0.15	12	30	30.25	0.002	6.67E-05	4.30	4.31	5.67	0.021	0.002	10.00	6120.72
PEEK	115	13.81	60%	A	0.15	12	25	29.12	0.002	6.67E-05	4.15	4.15	5.46	0.021	0.001	9.63	5894.98
PEEK	112	13.48	20%	B	0.15	12	20	28.93	0.002	6.67E-05	4.12	4.13	5.43	0.021	0.001	9.57	5858.46
PEEK	112	13.48	20%	B	0.15	12	25	28.40	0.002	6.67E-05	4.05	4.05	5.33	0.021	0.001	9.40	5752.28
PEEK	135	16.27	100%	B	0.2	12	20	28.37	0.002	6.67E-05	4.04	4.05	5.32	0.021	0.002	9.39	5745.81
PEEK	112	13.48	20%	B	0.15	12	30	28.03	0.002	6.67E-05	4.00	4.00	5.26	0.021	0.001	9.28	5679.28
PEEK	129	15.5	100%	A	0.2	12	25	26.95	0.002	6.67E-05	3.85	3.85	5.05	0.021	0.002	8.93	5463.72
PEEK	101	12.12	20%	A	0.15	12	25	26.55	0.002	6.67E-05	3.79	3.80	4.98	0.021	0.001	8.80	5383.88
PEEK	135	16.27	100%	B	0.2	12	25	26.37	0.002	6.67E-05	3.77	3.77	4.94	0.021	0.002	8.74	5347.63
PEEK	115	13.81	60%	A	0.15	12	30	25.73	0.002	6.67E-05	3.68	3.68	4.83	0.021	0.001	8.53	5221.39
PEEK	113	13.57	60%	A	0.2	12	20	25.32	0.002	6.67E-05	3.62	3.63	4.75	0.021	0.001	8.40	5138.42
PEEK	135	16.27	100%	B	0.2	12	30	25.03	0.002	6.67E-05	3.59	3.59	4.69	0.021	0.002	8.30	5082.17
PEEK	124	14.92	60%	B	0.2	12	20	24.72	0.002	6.67E-05	3.54	3.54	4.63	0.021	0.001	8.20	5019.05
PEEK	101	12.12	20%	A	0.15	12	30	24.15	0.002	6.67E-05	3.46	3.47	4.53	0.021	0.001	8.02	4906.06
PEEK	124	14.92	60%	B	0.2	12	25	23.32	0.002	6.67E-05	3.35	3.35	4.37	0.021	0.001	7.75	4740.32
PEEK	97	11.64	20%	A	0.2	12	20	23.10	0.002	6.67E-05	3.32	3.32	4.33	0.021	0.001	7.67	4696.99
PEEK	129	15.5	100%	A	0.2	12	30	23.08	0.002	6.67E-05	3.32	3.32	4.33	0.021	0.002	7.67	4693.90

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
PEEK	124	14.92	60%	B	0.2	12	30	23.05	0.002	6.67E-05	3.31	3.31	4.32	0.021	0.001	7.66	4687.23
PEEK	112	13.48	20%	B	0.2	12	20	21.78	0.002	6.67E-05	3.14	3.14	4.08	0.021	0.001	7.25	4434.96
PEEK	113	13.57	60%	A	0.2	12	25	21.65	0.002	6.67E-05	3.12	3.12	4.06	0.021	0.001	7.20	4408.42
PEEK	112	13.48	20%	B	0.2	12	25	21.38	0.002	6.67E-05	3.08	3.08	4.01	0.021	0.001	7.12	4355.32
PEEK	112	13.48	20%	B	0.2	12	30	21.10	0.002	6.67E-05	3.04	3.05	3.96	0.021	0.001	7.02	4298.91
PEEK	97	11.64	20%	A	0.2	12	25	19.45	0.002	6.67E-05	2.82	2.82	3.65	0.021	0.001	6.49	3970.31
PEEK	113	13.57	60%	A	0.2	12	30	19.22	0.002	6.67E-05	2.78	2.79	3.60	0.021	0.001	6.41	3923.97
PEEK	97	11.64	20%	A	0.2	12	30	17.00	0.002	6.67E-05	2.48	2.48	3.19	0.021	0.001	5.69	3482.53
PLA	1923	243.11	100%	CEs	0.1	12	30	437.75	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	74.42	0.004	0.014	74.44	45554.66
PLA	431	54.47	100%	D	0.1	12	30	329.62	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	56.03	0.004	0.003	56.04	34297.81
PLA	428	54.13	60%	D	0.1	12	30	328.92	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	55.92	0.004	0.003	55.92	34224.96
PLA	426	53.91	20%	D	0.1	12	30	328.58	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	55.86	0.004	0.003	55.87	34190.28
PLA	1291	163.26	60%	CEs	0.1	12	30	308.35	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	52.42	0.004	0.009	52.43	32089.06
PLA	1924	243.18	100%	CEs	0.15	12	30	278.30	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	47.31	0.004	0.014	47.33	28965.48
PLA	1923	243.1	100%	CEs	0.1	12	50	267.18	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	45.42	0.004	0.014	45.44	27808.90
PLA	1022	129.24	100%	Ses	0.1	12	30	247.95	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	42.15	0.004	0.007	42.16	25803.84
PLA	431	54.47	100%	D	0.1	12	50	218.18	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	37.09	0.004	0.003	37.10	22704.28
PLA	428	54.13	60%	D	0.1	12	50	217.53	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	36.98	0.004	0.003	36.99	22636.64
PLA	426	53.91	20%	D	0.1	12	50	217.13	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	36.91	0.004	0.003	36.92	22595.02
PLA	432	54.57	100%	D	0.15	12	30	198.27	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	33.71	0.004	0.003	33.71	20632.16
PLA	430	54.39	60%	D	0.15	12	30	197.95	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	33.65	0.004	0.003	33.66	20599.20
PLA	429	54.27	20%	D	0.15	12	30	197.82	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	33.63	0.004	0.003	33.64	20585.33
PLA	1923	243.07	100%	CEs	0.1	12	70	197.12	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	33.51	0.004	0.014	33.53	20519.16
PLA	1923	243.16	100%	CEs	0.2	12	30	196.32	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	33.37	0.004	0.014	33.39	20435.93
PLA	1293	163.42	60%	CEs	0.15	12	30	191.93	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	32.63	0.004	0.009	32.64	19977.08
PLA	1291	163.25	60%	CEs	0.1	12	50	188.58	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	32.06	0.004	0.009	32.07	19628.54
PLA	704	89.04	60%	Ses	0.1	12	30	182.72	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	31.06	0.004	0.005	31.07	19015.55

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
PLA	569	71.92	20%	CEs	0.1	12	30	179.02	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	30.43	0.004	0.004	30.44	18630.00
PLA	431	54.47	100%	D	0.1	12	70	177.13	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	30.11	0.004	0.003	30.12	18433.44
PLA	428	54.13	60%	D	0.1	12	70	176.60	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	30.02	0.004	0.003	30.03	18377.94
PLA	426	53.91	20%	D	0.1	12	70	176.10	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	29.94	0.004	0.003	29.94	18325.91
PLA	1923	243.14	100%	CEs	0.15	12	50	170.80	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	29.04	0.004	0.014	29.05	17781.18
PLA	1023	129.31	100%	Ses	0.15	12	30	157.20	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	26.72	0.004	0.007	26.74	16362.22
PLA	1022	129.24	100%	Ses	0.1	12	50	152.50	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	25.93	0.004	0.007	25.94	15873.23
PLA	1291	163.23	60%	CEs	0.1	12	70	139.97	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	23.79	0.004	0.009	23.81	14570.46
PLA	432	54.57	100%	D	0.15	12	50	131.67	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	22.38	0.004	0.003	22.39	13703.09
PLA	430	54.39	60%	D	0.15	12	50	131.35	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	22.33	0.004	0.003	22.34	13670.14
PLA	1291	163.2	60%	CEs	0.2	12	30	131.27	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	22.32	0.004	0.009	22.33	13665.31
PLA	429	54.27	20%	D	0.15	12	50	131.15	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	22.30	0.004	0.003	22.30	13649.33
PLA	1923	243.1	100%	CEs	0.15	12	70	126.10	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	21.44	0.004	0.014	21.46	13130.59
PLA	1923	243.1	100%	CEs	0.2	12	50	121.28	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	20.62	0.004	0.014	20.64	12629.46
PLA	1293	163.4	60%	CEs	0.15	12	50	118.40	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	20.13	0.004	0.009	20.14	12326.67
PLA	340	43.04	20%	Ses	0.1	12	30	117.62	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	19.99	0.004	0.002	20.00	12240.92
PLA	706	89.19	60%	Ses	0.15	12	30	113.73	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	19.33	0.004	0.005	19.34	11838.53
PLA	1022	129.22	100%	Ses	0.1	12	70	113.57	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	19.31	0.004	0.007	19.32	11822.60
PLA	704	89.03	60%	Ses	0.1	12	50	112.90	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	19.19	0.004	0.005	19.20	11751.82
PLA	569	71.91	20%	CEs	0.1	12	50	110.13	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	18.72	0.004	0.004	18.73	11463.38
PLA	1023	129.3	100%	Ses	0.2	12	30	109.90	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	18.68	0.004	0.007	18.69	11441.13
PLA	432	54.57	100%	D	0.15	12	70	107.22	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	18.23	0.004	0.003	18.23	11159.31
PLA	430	54.39	60%	D	0.15	12	70	106.87	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	18.17	0.004	0.003	18.17	11122.89
PLA	429	54.27	20%	D	0.15	12	70	106.60	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	18.12	0.004	0.003	18.13	11095.14
PLA	571	72.18	20%	CEs	0.15	12	30	105.67	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	17.96	0.004	0.004	17.97	10998.67
PLA	1023	129.29	100%	Ses	0.15	12	50	97.72	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	16.61	0.004	0.007	16.62	10173.57
PLA	1922	243.02	100%	CEs	0.2	12	70	89.67	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	15.24	0.004	0.014	15.26	9340.06

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
PLA	431	54.52	100%	D	0.2	12	30	88.65	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	15.07	0.004	0.003	15.08	9227.63
PLA	429	54.19	60%	D	0.2	12	30	88.28	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	15.01	0.004	0.003	15.02	9189.48
PLA	427	53.97	20%	D	0.2	12	30	88.13	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	14.98	0.004	0.003	14.99	9173.86
PLA	1292	163.37	60%	CEs	0.15	12	70	87.87	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	14.94	0.004	0.009	14.95	9149.98
PLA	704	89.02	60%	Ses	0.1	12	70	84.75	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	14.41	0.004	0.005	14.42	8823.10
PLA	569	71.9	20%	CEs	0.1	12	70	82.75	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	14.07	0.004	0.004	14.08	8614.41
PLA	1291	163.17	60%	CEs	0.2	12	50	81.63	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	13.88	0.004	0.009	13.89	8501.46
PLA	703	88.89	60%	Ses	0.2	12	30	77.00	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	13.09	0.004	0.005	13.10	8016.78
PLA	126	15.89	100%	C	0.1	12	30	73.63	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	12.52	0.004	0.001	12.52	7663.94
PLA	340	43.04	20%	Ses	0.1	12	50	73.33	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	12.47	0.004	0.002	12.47	7633.68
PLA	1023	129.27	100%	Ses	0.15	12	70	72.93	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	12.40	0.004	0.007	12.41	7595.11
PLA	122	15.4	60%	C	0.1	12	30	72.57	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	12.34	0.004	0.001	12.34	7552.95
PLA	705	89.18	60%	Ses	0.15	12	50	71.25	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	12.11	0.004	0.005	12.12	7418.56
PLA	110	13.97	20%	C	0.1	12	30	70.45	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	11.98	0.004	0.001	11.98	7332.67
PLA	343	43.3	20%	Ses	0.15	12	30	70.33	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	11.96	0.004	0.003	11.96	7321.58
PLA	1023	129.27	100%	Ses	0.2	12	50	69.12	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	11.75	0.004	0.007	11.76	7198.03
PLA	569	71.96	20%	CEs	0.2	12	30	66.40	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	11.29	0.004	0.004	11.30	6913.36
PLA	571	72.16	20%	CEs	0.15	12	50	65.78	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	11.18	0.004	0.004	11.19	6849.21
PLA	431	54.52	100%	D	0.2	12	50	65.02	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	11.05	0.004	0.003	11.06	6768.82
PLA	429	54.19	60%	D	0.2	12	50	64.68	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	11.00	0.004	0.003	11.00	6734.13
PLA	427	53.97	20%	D	0.2	12	50	64.48	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	10.96	0.004	0.003	10.97	6713.32
PLA	124	15.68	100%	B	0.1	12	30	63.12	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	10.73	0.004	0.001	10.73	6569.78
PLA	117	14.75	60%	B	0.1	12	30	60.95	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	10.36	0.004	0.001	10.37	6344.32
PLA	1290	163.11	60%	CEs	0.2	12	70	60.82	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	10.34	0.004	0.009	10.35	6335.69
PLA	103	13.06	20%	B	0.1	12	30	58.77	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	9.99	0.004	0.001	10.00	6117.11
PLA	340	43.03	20%	Ses	0.1	12	70	55.92	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	9.51	0.004	0.002	9.51	5821.65
PLA	431	54.52	100%	D	0.2	12	70	55.23	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	9.39	0.004	0.003	9.40	5750.96

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
PLA	429	54.19	60%	D	0.2	12	70	54.87	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	9.33	0.004	0.003	9.33	5712.81
PLA	427	53.97	20%	D	0.2	12	70	54.62	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	9.28	0.004	0.003	9.29	5686.79
PLA	705	89.17	60%	Ses	0.15	12	70	53.67	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	9.12	0.004	0.005	9.13	5589.19
PLA	1022	129.23	100%	Ses	0.2	12	70	51.92	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	8.83	0.004	0.007	8.84	5408.54
PLA	118	14.97	100%	A	0.1	12	30	50.50	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	8.59	0.004	0.001	8.59	5257.11
PLA	571	72.16	20%	CEs	0.15	12	70	49.55	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	8.42	0.004	0.004	8.43	5160.29
PLA	703	88.87	60%	Ses	0.2	12	50	49.17	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	8.36	0.004	0.005	8.37	5121.00
PLA	126	15.89	100%	C	0.1	12	50	48.80	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	8.30	0.004	0.001	8.30	5080.28
PLA	106	13.45	60%	A	0.1	12	30	48.07	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	8.17	0.004	0.001	8.18	5003.89
PLA	122	15.4	60%	C	0.1	12	50	47.92	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	8.15	0.004	0.001	8.15	4988.36
PLA	110	13.97	20%	C	0.1	12	50	46.30	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	7.87	0.004	0.001	7.88	4820.11
PLA	93	11.72	20%	A	0.1	12	30	45.60	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	7.75	0.004	0.001	7.76	4747.20
PLA	342	43.29	20%	Ses	0.15	12	50	44.83	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	7.62	0.004	0.002	7.63	4668.55
PLA	339	42.88	20%	Ses	0.2	12	30	44.30	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	7.53	0.004	0.002	7.54	4613.05
PLA	569	71.94	20%	CEs	0.2	12	50	42.13	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	7.16	0.004	0.004	7.17	4388.66
PLA	125	15.8	100%	C	0.15	12	30	40.67	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	6.91	0.004	0.001	6.92	4234.08
PLA	124	15.68	100%	B	0.1	12	50	40.27	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	6.85	0.004	0.001	6.85	4192.46
PLA	126	15.89	100%	C	0.1	12	70	40.05	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	6.81	0.004	0.001	6.81	4169.93
PLA	121	15.31	60%	C	0.15	12	30	39.95	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	6.79	0.004	0.001	6.80	4159.50
PLA	122	15.4	60%	C	0.1	12	70	39.20	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	6.66	0.004	0.001	6.67	4081.48
PLA	110	13.88	20%	C	0.15	12	30	38.53	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	6.55	0.004	0.001	6.56	4012.06
PLA	117	14.75	60%	B	0.1	12	50	38.32	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	6.51	0.004	0.001	6.52	3989.55
PLA	110	13.97	20%	C	0.1	12	70	37.53	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	6.38	0.004	0.001	6.39	3908.02
PLA	703	88.84	60%	Ses	0.2	12	70	37.32	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	6.34	0.004	0.005	6.35	3888.13
PLA	103	13.06	20%	B	0.1	12	50	36.85	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	6.26	0.004	0.001	6.27	3836.90
PLA	342	43.29	20%	Ses	0.15	12	70	34.42	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	5.85	0.004	0.002	5.86	3584.80
PLA	124	15.63	100%	B	0.15	12	30	34.25	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	5.82	0.004	0.001	5.83	3566.49

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
PLA	116	14.71	60%	B	0.15	12	30	32.85	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	5.58	0.004	0.001	5.59	3420.80
PLA	124	15.68	100%	B	0.1	12	70	32.10	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	5.46	0.004	0.001	5.46	3342.80
PLA	569	71.92	20%	CEs	0.2	12	70	31.98	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	5.44	0.004	0.004	5.45	3332.65
PLA	118	14.97	100%	A	0.1	12	50	31.70	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	5.39	0.004	0.001	5.39	3301.16
PLA	103	13.05	20%	B	0.15	12	30	31.42	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	5.34	0.004	0.001	5.35	3271.61
PLA	119	15	100%	A	0.15	12	30	30.60	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	5.20	0.004	0.001	5.21	3186.72
PLA	106	13.45	60%	A	0.1	12	50	30.22	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	5.14	0.004	0.001	5.14	3146.78
PLA	117	14.75	60%	B	0.1	12	70	30.13	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	5.12	0.004	0.001	5.13	3138.16
PLA	339	42.87	20%	Ses	0.2	12	50	29.17	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	4.96	0.004	0.002	4.96	3038.58
PLA	107	13.55	60%	A	0.15	12	30	29.05	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	4.94	0.004	0.001	4.94	3025.40
PLA	103	13.06	20%	B	0.1	12	70	28.68	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	4.88	0.004	0.001	4.88	2987.24
PLA	93	11.72	20%	A	0.1	12	50	28.68	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	4.88	0.004	0.001	4.88	2987.19
PLA	125	15.8	100%	C	0.15	12	50	27.82	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	4.73	0.004	0.001	4.73	2897.17
PLA	94	11.9	20%	A	0.15	12	30	27.47	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	4.67	0.004	0.001	4.67	2860.62
PLA	121	15.31	60%	C	0.15	12	50	27.22	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	4.63	0.004	0.001	4.63	2834.73
PLA	110	13.88	20%	C	0.15	12	50	26.15	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	4.45	0.004	0.001	4.45	2723.70
PLA	118	14.97	100%	A	0.1	12	70	24.40	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	4.15	0.004	0.001	4.15	2541.67
PLA	125	15.8	100%	C	0.15	12	70	23.33	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.97	0.004	0.001	3.97	2430.72
PLA	106	13.45	60%	A	0.1	12	70	23.33	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.97	0.004	0.001	3.97	2430.64
PLA	339	42.86	20%	Ses	0.2	12	70	22.77	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.87	0.004	0.002	3.88	2372.72
PLA	121	15.31	60%	C	0.15	12	70	22.77	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.87	0.004	0.001	3.88	2371.75
PLA	124	15.63	100%	B	0.15	12	50	22.33	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.80	0.004	0.001	3.80	2326.68
PLA	93	11.72	20%	A	0.1	12	70	22.18	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.77	0.004	0.001	3.78	2310.93
PLA	125	15.81	100%	C	0.2	12	30	22.12	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.76	0.004	0.001	3.76	2304.14
PLA	110	13.88	20%	C	0.15	12	70	21.65	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.68	0.004	0.001	3.69	2255.52
PLA	121	15.32	60%	C	0.2	12	30	21.58	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.67	0.004	0.001	3.67	2248.63
PLA	116	14.71	60%	B	0.15	12	50	21.08	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.58	0.004	0.001	3.59	2196.59

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
PLA	110	13.8	20%	C	0.2	12	30	20.52	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.49	0.004	0.001	3.49	2137.61
PLA	103	13.05	20%	B	0.15	12	50	20.10	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.42	0.004	0.001	3.42	2094.23
PLA	119	15	100%	A	0.15	12	50	19.87	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.38	0.004	0.001	3.38	2070.02
PLA	119	15	100%	A	0.2	12	30	19.63	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.34	0.004	0.001	3.34	2045.75
PLA	107	13.55	60%	A	0.15	12	50	18.92	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.22	0.004	0.001	3.22	1971.13
PLA	124	15.67	100%	B	0.2	12	30	18.73	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.18	0.004	0.001	3.19	1952.13
PLA	106	13.34	60%	A	0.2	12	30	18.30	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.11	0.004	0.001	3.12	1906.97
PLA	124	15.63	100%	B	0.15	12	70	18.07	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.07	0.004	0.001	3.08	1882.77
PLA	94	11.9	20%	A	0.15	12	50	17.95	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.05	0.004	0.001	3.06	1870.50
PLA	117	14.74	60%	B	0.2	12	30	17.67	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	3.00	0.004	0.001	3.01	1841.13
PLA	91	11.45	20%	A	0.2	12	30	16.95	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.88	0.004	0.001	2.89	1766.45
PLA	116	14.71	60%	B	0.15	12	70	16.78	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.85	0.004	0.001	2.86	1749.22
PLA	104	13.15	20%	B	0.2	12	30	16.65	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.83	0.004	0.001	2.84	1735.29
PLA	125	15.81	100%	C	0.2	12	50	16.05	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.73	0.004	0.001	2.73	1672.96
PLA	103	13.05	20%	B	0.15	12	70	15.82	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.69	0.004	0.001	2.69	1648.59
PLA	121	15.32	60%	C	0.2	12	50	15.60	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.65	0.004	0.001	2.66	1626.13
PLA	119	15	100%	A	0.15	12	70	15.37	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.61	0.004	0.001	2.62	1601.84
PLA	110	13.88	20%	C	0.2	12	50	14.80	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.52	0.004	0.001	2.52	1542.85
PLA	107	13.55	60%	A	0.15	12	70	14.67	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.49	0.004	0.001	2.50	1528.96
PLA	94	11.9	20%	A	0.15	12	70	13.95	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.37	0.004	0.001	2.38	1454.34
PLA	125	15.81	100%	C	0.2	12	70	13.85	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.35	0.004	0.001	2.36	1444.08
PLA	121	15.32	60%	C	0.2	12	70	13.42	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.28	0.004	0.001	2.29	1398.97
PLA	119	15	100%	A	0.2	12	50	13.38	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.28	0.004	0.001	2.28	1395.50
PLA	124	15.67	100%	B	0.2	12	50	12.75	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.17	0.004	0.001	2.17	1329.63
PLA	110	13.88	20%	C	0.2	12	70	12.58	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.14	0.004	0.001	2.14	1312.23
PLA	106	13.34	60%	A	0.2	12	50	12.57	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.14	0.004	0.001	2.14	1310.47
PLA	117	14.74	60%	B	0.2	12	50	11.78	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	2.00	0.004	0.001	2.01	1229.02

Anexos

Material	Masa por bandeja	Filamento metros	% de relleno	Posición de la pieza	Altura de capa	P x bandeja	Velocidad de impresión	T. Impresión	E_cama (kwh)	E_camara (kwh)	E_manten er (kwh)	E_caltot	E_mov	E_enfriamiento	E_materia l	E_total (kWh)	Co2 eq. (kg)
PLA	91	11.45	20%	A	0.2	12	50	11.73	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	1.99	0.004	0.001	2.00	1223.71
PLA	104	13.15	20%	B	0.2	12	50	11.10	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	1.89	0.004	0.001	1.89	1157.87
PLA	119	15	100%	A	0.2	12	70	10.65	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	1.81	0.004	0.001	1.82	1111.12
PLA	124	15.67	100%	B	0.2	12	70	10.55	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	1.79	0.004	0.001	1.80	1100.74
PLA	106	13.34	60%	A	0.2	12	70	10.05	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	1.71	0.004	0.001	1.71	1048.64
PLA	117	14.74	60%	B	0.2	12	70	9.57	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	1.63	0.004	0.001	1.63	998.40
PLA	91	11.45	20%	A	0.2	12	70	9.43	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	1.60	0.004	0.001	1.61	984.41
PLA	104	13.15	20%	B	0.2	12	70	8.88	0.000	0.00E+00	0.00	0.00	1.51	0.004	0.001	1.52	927.25

- A. Descripción y resultado de las simulaciones para validar el modelo para el cálculo del CO₂ equivalente por pieza y material.

SIMULACIÓN DE LOTE DE ESPECÍMENES EN LA POSICIÓN A

La distribución de los especímenes en la posición A en la Figura 49 y la descripción de las propiedades particulares de impresión utilizadas para este lote en la Tabla 15.

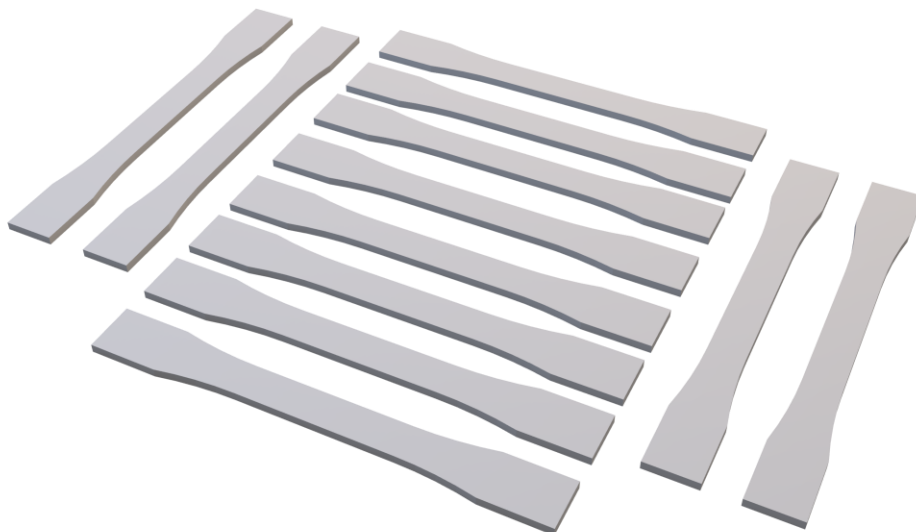


Figura 49. Distribución del lote en la posición A en la bandeja de impresión (2da simulación)

Tabla 15. Propiedades de impresión utilizadas en el espécimen en la posición A (2da simulación)

Descripción	Propiedades de impresión
Estrategia de relleno	Rejillas
Estructura de soporte	Ninguna
Mallado de la estructura de soporte	N/A
Ángulo de voladizo	N/A
Adhesión al plato de impresión	Ninguna
Mallado de la estructura de soporte	N/A

*N/A = no aplica

El primer material simulado es el PLA. Luego de simular por cada altura de capa, velocidad de impresión, porcentaje de relleno los resultados se pueden observar en la Figura 50.

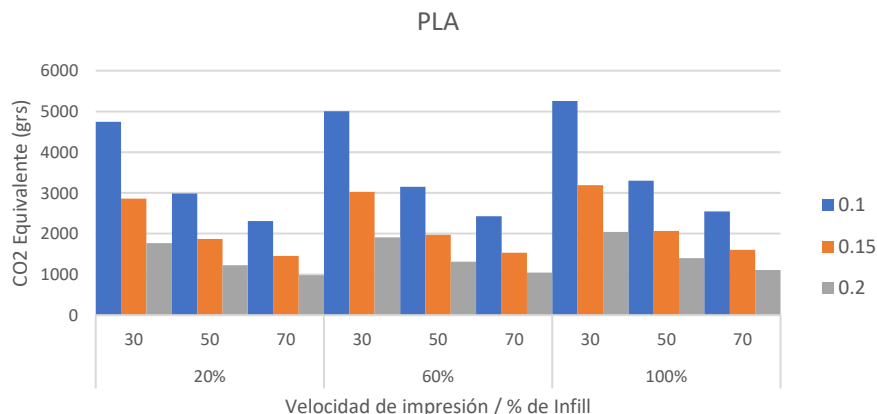


Figura 50. Emisiones de CO₂ equivalente del lote del espécimen en la posición A fabricado con PLA por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

Como se puede observar, en todos los casos, la altura de capa de 0.1 mm es la que produce más emisiones en las simulaciones. El mejor de los escenarios, en cuanto a emisiones de CO₂ equivalente, es a una altura de capa de 0.2 mm, velocidad de impresión de 70 mm/s y 20% de relleno, tal y como se esperaba.

A continuación, se muestra un análisis de la energía promedio, principal fuente de las emisiones de CO₂ equivalente, por cada juego de parámetros simulado. El primer parámetro escogido son las velocidades de impresión. (ver Tabla 16)

Tabla 16. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PLA en la posición A del espécimen.

Velocidad	30 mm/s	50 mm/s	70 mm/s
E_{promedio} kWh	5.41	3.50	2.72
entre 30 y 50	-35.31%		
entre 50 y 70	-22.12%		
entre 30 y 70	-49.62%		

A mayor velocidad de impresión, menor es la energía invertida en el proceso. Lo anterior puede ocurrir por el tiempo de operación de la impresora. Aproximadamente, un 50% más de energía entre la mínima velocidad de impresión (30 mm/s) y la máxima (70mm/s).

El segundo parámetro analizado es la altura de capa. En la Tabla 17 se puede ver la variación porcentual de la energía promedio por altura de capa.

Tabla 17. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PLA en la posición A del espécimen.

Altura de capa	0.1 mm	0.15 mm	0.2 mm
E_{promedio} kWh	5.76	3.55	2.32
entre 0.1 y 0.15	-38.32%		
entre 0.15 y 0.2	-34.63%		
entre 0.1 y 0.2	-59.68%		

Con los resultados, se puede interpretar que a mayor altura de capa menor el consumo energético. Lo anterior podría estar relacionado con el menor tiempo de operación de la impresora, ya que a una altura de capa mayor menores son los recorridos de la boquilla que extruye el filamento. Entre una altura de capa de 0.1 mm y una altura de capa de 0.2 mm la diferencia porcentual de la energía promedio es aproximadamente un 60%.

El tercer parámetro analizado el porcentaje de relleno. En la Tabla 18 la variación porcentual de la energía promedio por variaciones en el porcentaje de relleno de la pieza.

Tabla 18. Comparación porcentual de la energía promedio (kWh) por cada % de relleno con PLA en la posición A del espécimen

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio} kWh	3.67	3.88	4.09
entre 20% y 60%	-5.46%		
entre 60% y 100%	-5.06%		
entre 20% y 100%	-10.24%		

Entre mayor es el porcentaje de relleno mayor es la energía invertida en el proceso, sin embargo, el cambio promedio es de tan sólo 5% cada 40% de aumento de relleno. Esto es debido al poco relleno que requiere la pieza simulada. Comparado con los cambios porcentuales al variar otros parámetros, como la altura de capa y la velocidad, se podría considerar que, la pieza en esta posición, el porcentaje de relleno es poco representativo en el aumento del consumo energético, por ende, las emisiones de CO₂ equivalente.

Por otro lado, al analizar la fabricación, de los especímenes en la posición A, con material ABS los resultados se pueden resumir en la Figura 51.

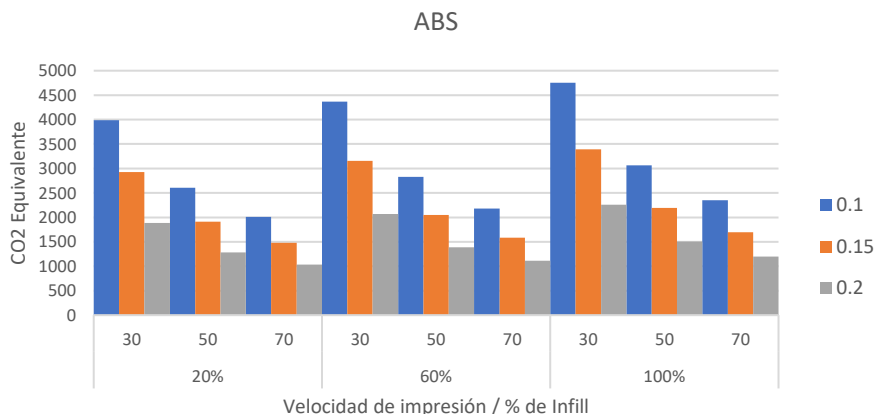


Figura 51. Emisiones de CO₂ equivalente del lote del espécimen en la posición A fabricado con ABS por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

Al igual que con el PLA, el comportamiento de las emisiones de CO₂ equivalente fabricando con ABS, es similar. Mayores emisiones en altura de capa de 0.1 mm y velocidad de impresión de 30 mm/s.

A continuación, se presenta un análisis por cada parámetro considerado y los cambios porcentuales producidos en la energía promedio, principal fuente de emisiones de CO₂. El primer parámetro analizado es la velocidad. En la Tabla 19 se recogen las variaciones porcentuales de la energía promedio ante cambios en la velocidad de impresión.

Tabla 19. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con ABS en la posición A del espécimen.

Velocidad	30 mm/s	50 mm/s	70 mm/s
E_{promedio} kWh	5.23	3.42	2.66
entre 30 y 50	-34.64%		
entre 50 y 70	-22.16%		
entre 30 y 70	-49.12%		

A mayor velocidad de impresión, menor es la energía invertida en el proceso. Lo anterior puede ocurrir por el tiempo de operación de la impresora. Aproximadamente, un 50% más de energía entre la mínima velocidad de impresión (30 mm/s) y la máxima (70mm/s).

El segundo parámetro analizado es la altura de capa. En la Tabla 20 la variación porcentual de la energía promedio ante cambios en la altura de capa.

Tabla 20. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con ABS en la posición A del espécimen.

Altura de capa	0.1 mm	0.15 mm	0.2 mm
Epromedio kWh	5.11	3.70	2.49
entre 0.1 y 0.15	-27.54%		
entre 0.15 y 0.2	-32.68%		
entre 0.1 y 0.2	-51.22%		

Al igual que con el PLA se mantiene la tendencia de a mayor altura de capa menor la energía promedio.

El último parámetro por analizar es el porcentaje de relleno y su efecto en la energía promedio para la fabricación de las piezas simuladas. Los resultados en la Tabla 21.

Tabla 21. Comparación porcentual de la energía promedio (kWh) por cada % de relleno con ABS en la posición A del espécimen

% de relleno	20%	60%	100%
Epromedio kWh	3.47	3.76	4.07
entre 20% y 60%	7.75%		
entre 60% y 100%	7.48%		
entre 20% y 100%	14.66%		

Al igual que con el PLA, la diferencia porcentual entre los porcentajes de relleno es menor del 10%.

Por el comportamiento similar entre el PLA y el ABS en la Figura 52 se propone una comparativa entre las energías calculadas para la fabricación de los especímenes en la posición A; principal fuente de las emisiones de CO₂ del proceso.

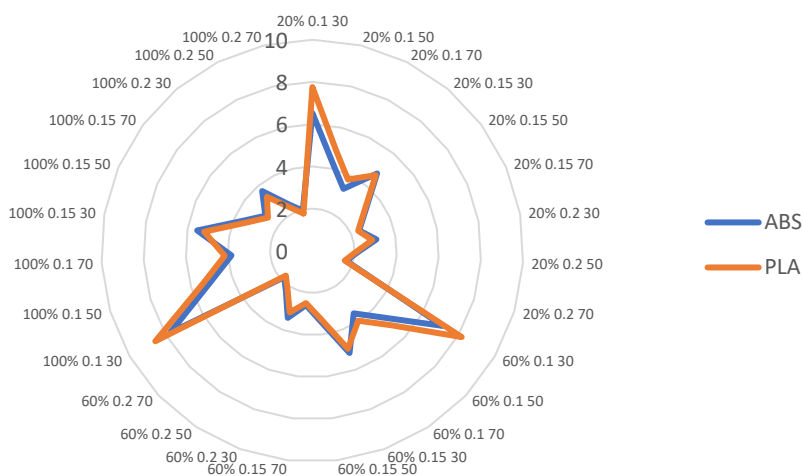


Figura 52 Comparativa de las energías calculadas entre el PLA y el ABS en la fabricación de los especímenes en la posición A

Al simular la impresión del lote de especímenes en la posición A con el material PEEK los hallazgos se pueden resumir a continuación. En la Figura 53 las emisiones de CO₂ equivalente calculadas con el modelo propuesto considerando las velocidades de impresión, alturas de capa y porcentaje de relleno.

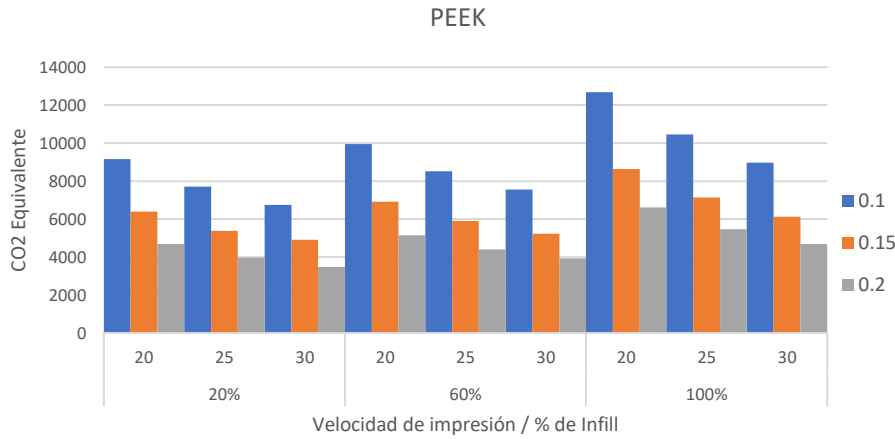


Figura 53. Emisiones de CO₂ equivalente del lote del espécimen en la posición A fabricado con PEEK por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

Al igual que con el ABS y el PLA, en el lote simulado con PEEK a menor altura de capa y menor velocidad, mayor serán las emisiones. A diferencia del ABS y el PLA, al simular con el PEEK las emisiones de CO₂ equivalente son 40% más que con respecto al peor escenario con PLA y un 37% más con respecto al peor escenario con ABS.

A continuación, un análisis por cada parámetro y su efecto en la energía promedio, fuente principal de las emisiones de CO₂ equivalente. Primero, la velocidad de impresión y su variación en la energía promedio ante cambios de velocidad. (ver Tabla 22)

Tabla 22. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PEEK en la posición A del espécimen

Velocidad	20mm/s	25mm/s	30mm/s
E_{promedio kWh}	12.74	10.70	9.37
entre 30 y 50	16.02%		
entre 50 y 70	12.39%		
entre 30 y 70	26.43%		

Por especificaciones del PEEK las velocidades de impresión son distintas al ABS y al PLA. Ante los cambios de velocidad el porcentaje de variación de la energía promedio es entre el 12% y el 16%. Comparado con el ABS, por ejemplo, el cambio de velocidad es cuatro veces

mayor que la variación de velocidad en PEEK y el porcentaje de variación de energía promedio es de entre el 22% y el 35%.

Continuando con el análisis por parámetro, en la Tabla 23 la variación de la energía promedio ante cambios en la altura de capa.

Tabla 23. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PEEK en la posición A del espécimen

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio} kWh	14.84	10.27	7.69
entre 0.1 y 0.15	-30.76%		
entre 0.15 y 0.2	-25.09%		
entre 0.1 y 0.2	-48.14%		

Cuanto mayor es la altura de capa simulada menor es la energía promedio invertida para fabricar el lote, lo cual es consistente con los resultados del mismo lote con ABS y PLA. Por otro lado, las energías promedio para cada altura de capa son más del doble de las obtenidas con el PLA y el ABS.

El último parámetro es el porcentaje de relleno presentado en la Tabla 24.

Tabla 24 Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PEEK en la posición A del espécimen

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio} kWh	9.52	10.44	12.85
entre 20% y 60%	8.84%		
entre 60% y 100%	18.71%		
entre 20% y 100%	25.89%		

El porcentaje de relleno varía entre un 8% y un 18% aproximadamente con respecto a las variaciones de porcentaje de relleno propuestas.

En general las emisiones de CO₂ equivalente calculadas entre los tres tipos de materiales para el lote de especímenes en la posición A es proporcionalmente similar, a pesar de, las diferencias entre las velocidades de impresión escogidas para la simulación.

A continuación, los resultados del lote de especímenes simulado en la posición B.

SIMULACIÓN DE LOTE DE ESPECÍMENES EN LA POSICIÓN B

El detalle de la distribución del lote de 12 piezas de especímenes en la posición B se presenta en la Figura 54.

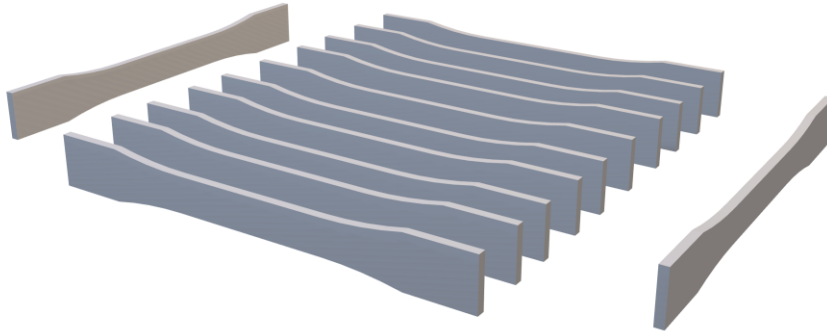


Figura 54. Distribución del lote en la posición B en la bandeja de impresión (2da simulación)

Descripción de las propiedades de impresión utilizadas en la simulación en la Tabla 25.

Tabla 25. Propiedades de impresión utilizadas en el espécimen en la posición B (2da simulación)

Descripción	Propiedades de impresión
Estrategia de relleno	Rejillas
Estructura de soporte	Si
Mallado de la estructura de soporte	Rejilla
Ángulo de voladizo	60°
Adhesión al plato de impresión	Ninguna
Mallado de la estructura de soporte	Rejilla

Para comparar cada parámetro simulado y su efecto en las emisiones de CO₂ equivalente se presentan con cada material empezando por el PLA. (ver Figura 55)

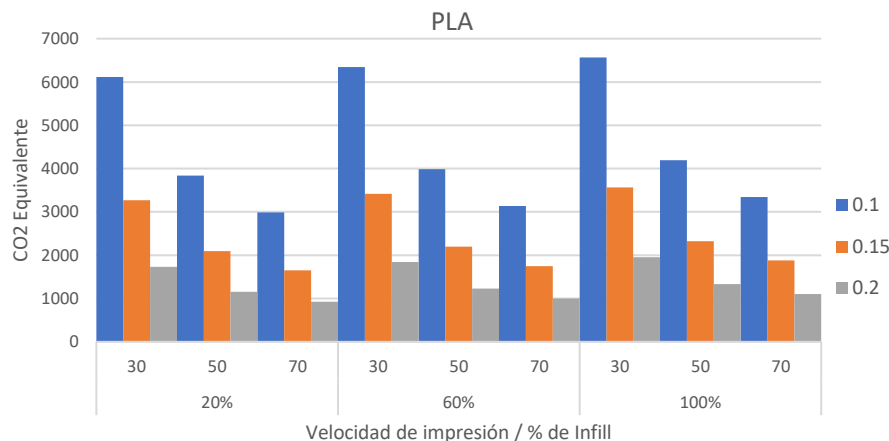


Figura 55. Emisiones de CO2 equivalente del lote del espécimen en la posición B fabricado con PLA por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

Con respecto al lote de especímenes en la posición A con el mismo material, la distribución de las emisiones por parámetro es igual:

- a menor altura de capa, mayores emisiones
- a menor velocidad, mayores emisiones
- a mayor porcentaje de relleno, mayores emisiones

Por otro lado, las emisiones calculadas son un 20% más con respecto a las mismas condiciones de impresión del lote de especímenes en la posición A. La menor emisión de CO₂ equivalente calculada encontrada se da cuando la velocidad de impresión es de 70 mm/s, el porcentaje de relleno es del 20% y la altura de capa es de 0.2 mm. Con una diferencia proporcional de un 86% menos con respecto a la mayor emisión calculada con el mismo lote y posición de pieza.

Seguidamente, un análisis de cada parámetro considerado en la simulación del modelo propuesto, empezando por la velocidad de impresión y su variación porcentual ante cambios de velocidad de impresión. (ver Tabla 26)

Tabla 26. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PLA en la posición B del espécimen

Velocidad	30mm/s	50mm/s	70mm/s
E_{promedio} kWh	6.32	4.06	3.23
entre 30 y 50	-35.80%		
entre 50 y 70	-20.48%		
entre 30 y 70	-48.95%		

Debido al aumento generalizado en las emisiones, la energía promedio utilizada ante cambios de velocidad de impresión son de 15% aproximadamente con respecto al lote de especímenes en la posición A. Los saltos porcentuales ante cambios de velocidad se corresponden con los resultados del lote de especímenes en la posición A.

Continuando la presentación de resultados de las simulaciones, se presentan los hallazgos en la Tabla 27 de los cambios en la energía promedio por cambios en la altura de capa para el lote de especímenes en la posición B.

Tabla 27. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PLA en la posición B del espécimen

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio} kWh	7.37	4.02	2.23
entre 0.1 y 0.15	-45.32%		
entre 0.15 y 0.2	-44.62%		
entre 0.1 y 0.2	-69.71%		

Los saltos porcentuales de la energía promedio ante cambios en la altura de capa son un 8% promedio mayor que los hallados en el lote de especímenes en la posición A. Además del aumento no proporcional de la energía promedio por cada altura de capa. Para una altura de capa de 0.1mm el aumento en el lote B sobre el lote A es de 22% aproximadamente, mientras que para la altura de capa de 0.2mm, la variación es de 4% aproximadamente siendo la energía promedio del lote A mayor que en el lote B.

El último parámetro por presentar para el PLA en el lote B es el porcentaje de relleno. (ver Tabla 28)

Tabla 28. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PLA en la posición B del espécimen

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio} kWh	4.32	4.52	4.77
entre 20% y 60%	4.54%		
entre 60% y 100%	5.16%		
entre 20% y 100%	9.47%		

La variación porcentual de la energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno es similar al lote de especímenes en la posición A. Las variaciones porcentuales de la energía promedio son de alrededor del 5% ante cambios en el porcentaje de relleno. Comportamiento

similar hallado en los especímenes en la posición A, sin embargo, la energía promedio es de alrededor del 15% más en el lote B que los especímenes en la posición A.

Continuando con la presentación de los resultados, los efectos de la simulación del lote de especímenes en la posición B con el ABS como material de fabricación. En la Figura 56 se muestran las emisiones de CO₂ equivalente para cada parámetro de impresión considerado utilizando el ABS como material de fabricación.

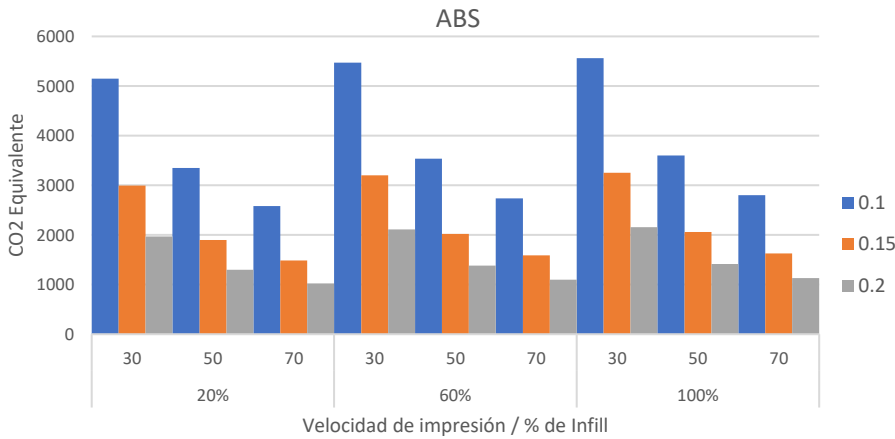


Figura 56. Emisiones de CO₂ equivalente del lote del espécimen en la posición B fabricado con ABS por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

El comportamiento de las emisiones es similar al PLA y a los resultados hallados en la simulación de los especímenes en la posición A. Por otro lado, las emisiones con ABS son un 15% menos que las emisiones halladas con PLA en el peor de los escenarios simulados (mínima velocidad, mayor porcentaje de relleno y mínima altura de capa). Entre la máxima emisión y la mínima emisión hallada existe una diferencia de un 81% en el mismo lote de especímenes en la posición B y con ABS.

En adelante, se presenta un análisis por cada parámetro considerado en la simulación y la variación producida en la energía promedio ante cambios en cada parámetro. El primer parámetro por presentar es la velocidad de impresión (ver Tabla 29)

Tabla 29. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con ABS en la posición B del espécimen

Velocidad	30mm/s	50mm/s	70mm/s
E_{promedio} kWh	5.78	3.73	2.92
entre 30 y 50	-35.51%		
entre 50 y 70	-21.78%		
entre 30 y 70	-49.55%		

La variación porcentual ante cambios de velocidad de impresión es similar que, en el PLA, sin embargo, la energía promedio invertida en la fabricación utilizando ABS es de alrededor de un 8% menos que con el PLA. Por ende, en vez de aumentar las emisiones, disminuyen con el ABS en la posición B del lote de especímenes.

A continuación, la variación porcentual de la energía promedio ante cambio en la altura de capa (ver Tabla 30)

Tabla 30. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con ABS en la posición B del espécimen

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio kWh}	6.32	3.66	2.47
entre 0.1 y 0.15	-42.16%		
entre 0.15 y 0.2	-32.48%		
entre 0.1 y 0.2	-60.95%		

Las variaciones porcentuales de energía promedio por cambios en la altura de capa con el ABS son similares a las presentadas en el PLA. Sin embargo, en magnitudes las energías promedio son diferentes. Para una altura de capa de 0.1mm el ABS consume un 15% menos energía. En el caso de una altura de capa de 0.15mm la diferencia porcentual con el ABS es de un 9% menos. Y para una altura de capa de 0.2mm la variación es de un 10% siendo, a diferencia de las alturas de capa de 0.1mm y 0.15mm, mayor la energía en las piezas fabricadas con ABS.

El tercer parámetro por presentar es la variación porcentual ante cambios en la energía promedio por el porcentaje de relleno. (ver Tabla 31)

Tabla 31. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con ABS en la posición B del espécimen

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio kWh}	3.95	4.20	4.29
entre 20% y 60%	6.01%		
entre 60% y 100%	1.97%		
entre 20% y 100%	7.86%		

Las variaciones porcentuales de la energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno son distintas a las presentadas en PLA y en la anterior posición del lote de especímenes. Además, las magnitudes de las energías promedio para los tres rellenos son inferiores en los fabricados con ABS, que los fabricados en PLA. Por ejemplo, para un porcentaje de relleno

de 20% al fabricar con ABS el consumo promedio de energía calculado es un 8% menos que al fabricar con PLA. Estas variaciones llegan hasta un 10%.

A continuación, la Figura 57 es utilizada para comparar la energía utilizada para fabricar el lote de especímenes en la posición B por cada parámetro considerado en la simulación, fabricado tanto en PLA como en ABS.

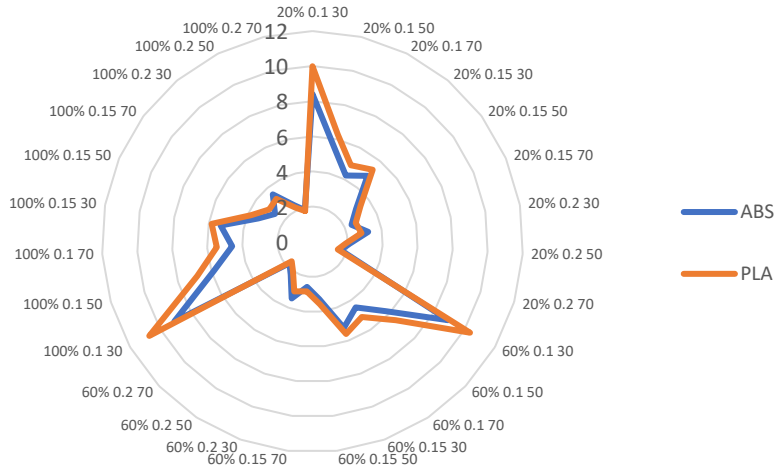


Figura 57. Comparativa de las energías calculadas entre el PLA y el ABS en la fabricación de los especímenes en la posición B

Como se puede observar en la mayoría de las situaciones simuladas, el PLA presenta un mayor consumo energético en comparación con el ABS. Esto es consistente con los resultados obtenidos al analizar los resultados de energía promedio con cada parámetro de impresión utilizado en la simulación.

Seguidamente, y para terminar con los hallazgos del lote de especímenes en la posición B, los resultados de las emisiones calculadas utilizando el PEEK como material de fabricación. (ver Figura 58)

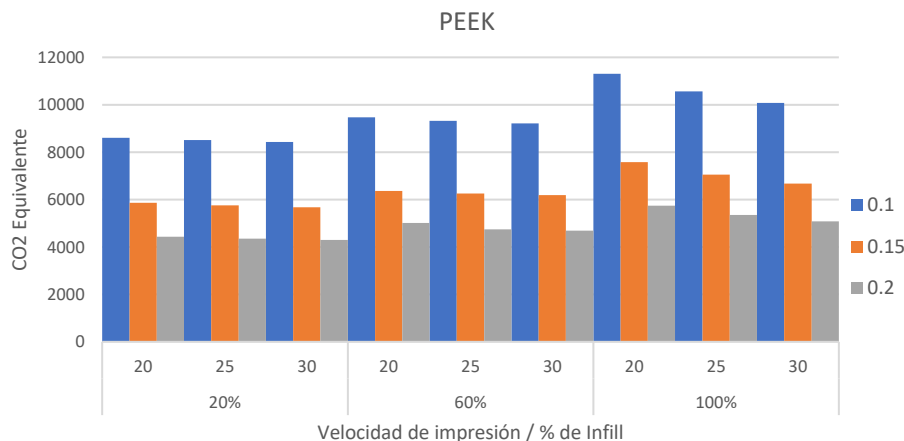


Figura 58. Emisiones de CO2 equivalente del lote del espécimen en la posición B fabricado con PEEK por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

Al igual que con los lotes simulados con PLA y ABS ante menor altura de capa, mayor las emisiones; ante mayor velocidad, menor las emisiones y a mayor porcentaje de relleno mayor las emisiones. A diferencia de los lotes simulados con PLA y ABS, el lote simulado con PEEK presenta mayores emisiones proporcionalmente. Con respecto a la peor situación hallada utilizando PLA, en PEEK es aproximadamente un 42% más y con respecto al lote simulado con ABS un 51% más. El escenario con el mínimo de emisiones calculadas con PEEK se da cuando la altura de capa es 0.2mm, a una velocidad de 30mm/s y un porcentaje de relleno del 20%. La diferencia porcentual entre el escenario que presenta más emisiones y el escenario con menos emisiones es de alrededor del 62%.

A continuación, un análisis de los resultados por cada parámetro escogido para la simulación y su efecto en la energía promedio. El primer parámetro presentado es la velocidad. (ver Tabla 32)

Tabla 32. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PEEK en la posición B del espécimen

Velocidad	20mm/s	25mm/s	30mm/s
E_{promedio} kWh	11.69	11.24	10.95
entre 30 y 50	-3.87%		
entre 50 y 70	-2.55%		
entre 30 y 70			-6.32%

A diferencia de los saltos porcentuales presentados con el PEEK en la posición A del espécimen, la variación en la energía promedio es inferior al 4% ante cambios de velocidad en la posición B. Sin embargo, la energía promedio es un 8% menos con el mismo material en la posición A del lote de especímenes con la misma velocidad de 20mm/s. Por otro lado,

para velocidades de 25mm/s y 30mm/s la energía promedio del lote simulado en la posición B es de 5% y 14%, respectivamente, más que el lote de especímenes simulado en la posición A. La energía promedio utilizando el PEEK para la fabricación es más de la mitad de lo utilizado para fabricar con PLA y ABS.

El siguiente parámetro por presentar en la altura de capa y su efecto en la energía promedio calculada. (ver Tabla 33)

Tabla 33. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PEEK en la posición B del espécimen

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio kWh}	15.53	10.42	7.94
entre 0.1 y 0.15	-32.87%		
entre 0.15 y 0.2	-23.87%		
entre 0.1 y 0.2	-48.89%		

Los saltos de la energía promedio ante cambios en la altura de capa son similares a los hallados en la energía promedio con el lote de especímenes en la posición A. Por otro lado, es mayor la energía promedio calculada en el lote de especímenes en la posición B que la energía promedio en el lote de especímenes en la posición A. Aproximadamente, la diferencia porcentual del lote de especímenes en la posición B con respecto al lote de especímenes en la posición A, es de entre un 1% a un 4% entre las alturas de capa seleccionadas con el mismo material. Comparando la energía promedio de la misma posición del lote en PLA y ABS, fabricar en PEEK es en promedio un 64% y 62%, respectivamente, mayor la energía calculada, considerando las mismas alturas de capa.

Por último, la variación porcentual de la energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno. (ver Tabla 34)

Tabla 34. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PEEK en la posición B del espécimen

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio kWh}	10.15	11.12	12.61
entre 20% y 60%	8.73%		
entre 60% y 100%	11.76%		
entre 20% y 100%	19.46%		

Las variaciones porcentuales de energía promedio debido a cambios en el porcentaje de relleno son similares a las halladas en el lote de especímenes en la posición A. En orden de

magnitud, en comparación con el lote de especímenes en la posición A, con porcentaje de relleno del 20% y 60%, son 6% mayores en el lote de piezas en la posición B. Por otro lado, con un porcentaje de relleno del 100% es 2% menor. Al comparar los resultados con otros materiales el aumento en la energía promedio es de más de más del 60% con respecto al PLA y al ABS.

SIMULACIÓN DE LOTE DE ESPECÍMENES EN LA POSICIÓN C

La distribución del lote de especímenes en la bandeja de impresión se detalla en la Figura 59. Por su posición fue considerado el uso de material de soporte que será tomado en cuenta en la presentación de resultados. En la Tabla 35 la descripción de las propiedades de impresión utilizadas en la simulación.

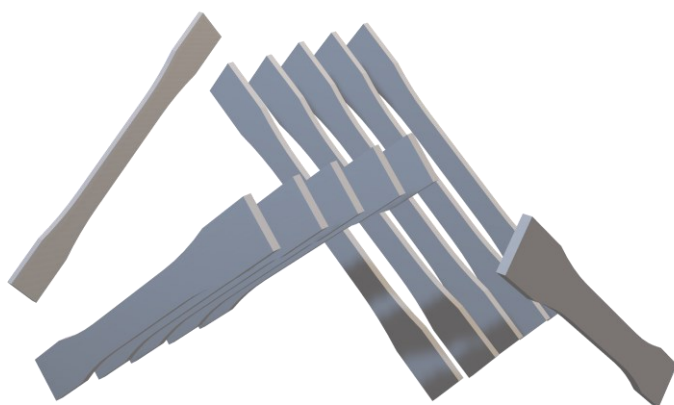


Figura 59. Distribución del lote en la posición C en la bandeja de impresión (2da simulación)

Tabla 35. Propiedades de impresión utilizadas en el espécimen en la posición C (2da simulación)

Descripción	Propiedades de impresión
Estrategia de relleno	Rejillas
Estructura de soporte	Si
Mallado de la estructura de soporte	Rejilla
Ángulo de voladizo	60°
Adhesión al plato de impresión	Ninguna
Mallado de la estructura de soporte	Rejilla

Una comparativa de todas las emisiones de CO₂ equivalente por cada parámetro de impresión utilizado en la simulación, es presentado en la Figura 60.

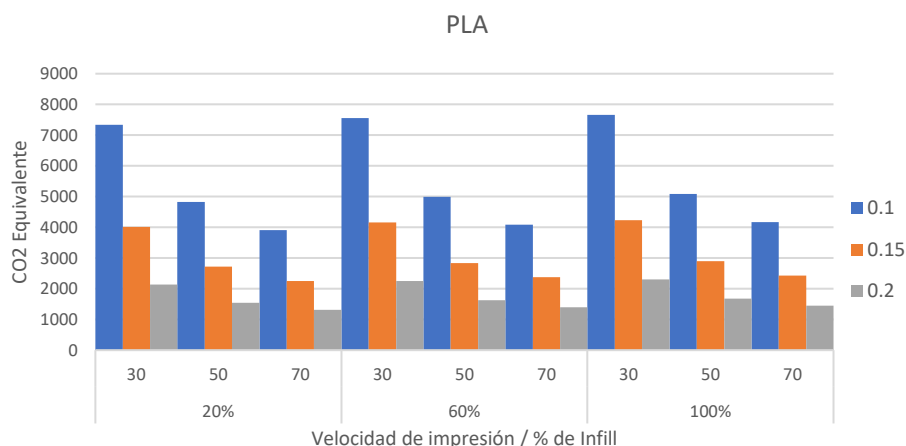


Figura 60. Emisiones de CO₂ equivalente del lote del espécimen en la posición C fabricado con PLA por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

Los resultados son consistentes con los hallados en las anteriores simulaciones, a menor altura de capa, mayores emisiones; a menor velocidad, mayores las emisiones y a mayor porcentaje de relleno, mayor las emisiones.

Seguidamente, un análisis de los resultados de la energía promedio invertida por cada parámetro de impresión utilizado en la simulación. El primer parámetro en presentar es el resultado de la variación porcentual de la energía promedio por cambios en la velocidad de impresión, resumidos en la Tabla 36.

Tabla 36. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PLA en la posición C del espécimen

Velocidad	30mm/s	50mm/s	70mm/s
E_{promedio} kWh	7.56	5.12	4.24
entre 30 y 50	-32.32%		
entre 50 y 70	-17.08%		
entre 30 y 70	-43.88%		

El aumento de las emisiones de CO₂ equivalente es un 16% mayor en los especímenes en la posición C que con respecto a los especímenes en la posición B. Las variaciones porcentuales ante cambios en la velocidad son similares a los hallados en los especímenes en las posiciones A y B.

El siguiente parámetro por analizar es la altura de capa. Las variaciones porcentuales entre los cambios de altura de capa se presentan en la Tabla 37.

Tabla 37. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PLA en la posición C del espécimen

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio} kWh	9.01	5.07	2.85
entre 0.1 y 0.15	-43.71%		
entre 0.15 y 0.2	-43.81%		
entre 0.1 y 0.2	-68.37%		

Las variaciones en energía promedio ante cambios de altura de capa son similares a los hallados en los especímenes en las posiciones A y B.

Por último, los hallazgos relacionados a variaciones en energía promedio debido a cambios en los porcentajes de relleno resumidos en la Tabla 38.

Tabla 38. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PLA en la posición C del espécimen

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio} kWh	5.46	5.68	5.79
entre 20% y 60%	3.90%		
entre 60% y 100%	1.99%		
entre 20% y 100%	5.81%		

El espécimen, a pesar de tener las mismas dimensiones, las variaciones de energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno, en el espécimen en la posición B, es el doble de los hallados en el espécimen en la posición C.

A continuación, los resultados de las emisiones de CO₂ equivalente calculadas con el espécimen en la posición C, utilizando el ABS como material para la fabricación y utilizando todos los parámetros considerados en la simulación. (ver Figura 61)

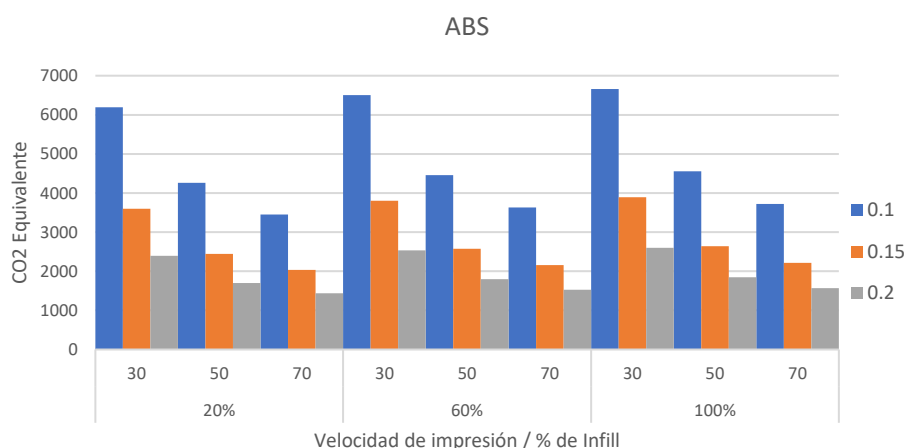


Figura 61. Emisiones de CO2 equivalente del lote del espécimen en la posición C fabricado con ABS por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

Se puede observar el mismo comportamiento, con todos los parámetros considerados, de todas las simulaciones. Se observa un aumento promedio de emisiones de CO₂ equivalente de, en promedio, un 7% menos que el PLA en la misma posición del espécimen y en promedio un 20% más que en el espécimen en la posición B con el ABS. La diferencia entre el mínimo valor de emisiones y el máximo valor de emisiones es de 8 veces más.

A continuación, un análisis por cada parámetro simulado, empezando por la variación de la energía promedio, principal fuente de emisiones, ante cambios en la velocidad de impresión. (ver Tabla 39)

Tabla 39. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con ABS en la posición C del espécimen

Velocidad	30mm/s	50mm/s	70mm/s
E_{promedio} kWh	6.93	4.77	3.95
entre 30 y 50	-31.18%		
entre 50 y 70	-17.22%		
entre 30 y 70	-43.03%		

Las variaciones de energía promedio ante cambios de velocidad es similar a los hallados en el espécimen en la posición B y al PLA en la posición C del espécimen.

Seguidamente, en la Tabla 40, las variaciones de energía promedio ante cambios de alturas de capa simulados.

Tabla 40. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con ABS en la posición C del espécimen

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio} kWh	7.88	4.60	3.16
entre 0.1 y 0.15	-41.63%		
entre 0.15 y 0.2	-31.31%		
entre 0.1 y 0.2	-59.90%		

Las variaciones de energía promedio ante cambios de altura de capa son similares a los encontrados en el espécimen en la posición B. Incluso a los hallados en el PLA, sin embargo, en promedio, la energía promedio es 14% mayor que la energía promedio del espécimen en la posición B con ABS.

El último parámetro por presentar es el porcentaje de relleno y la variación de la energía promedio. (ver Tabla 41)

Tabla 41. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con ABS en la posición C del espécimen

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio} kWh	4.99	5.26	5.39
entre 20% y 60%	5.13%		
entre 60% y 100%	2.36%		
entre 20% y 100%	7.37%		

Las variaciones de energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno son similares a los hallados en el espécimen en la posición B. Con respecto al lote de especímenes simulados con PLA en la posición C, el lote simulado con ABS, consume en promedio un 15% menos energía.

A continuación, un gráfico para comparar las energías calculadas a partir de los parámetros de impresión simulados para el lote de especímenes en la posición C y los materiales PLA y ABS. (ver Figura 62)

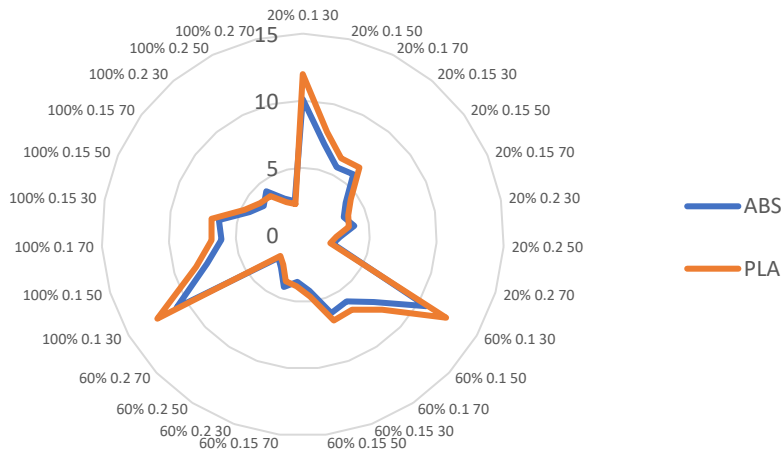


Figura 62. Comparativa de las energías calculadas entre el PLA y el ABS en la fabricación de los especímenes en la posición C

Como es posible observar, la energía calculada es en su mayoría mayor en los lotes simulados con PLA que con ABS. Por tanto, la emisión de CO₂ equivalente será mayor en este lote simulado con PLA.

A continuación, se presentan los resultados utilizando el PEEK como material de fabricación, en la simulación del lote de especímenes en la posición C. El primer hallazgo presentado son las emisiones de CO₂ equivalente a partir del lote simulado con PEEK. (ver Figura 63)

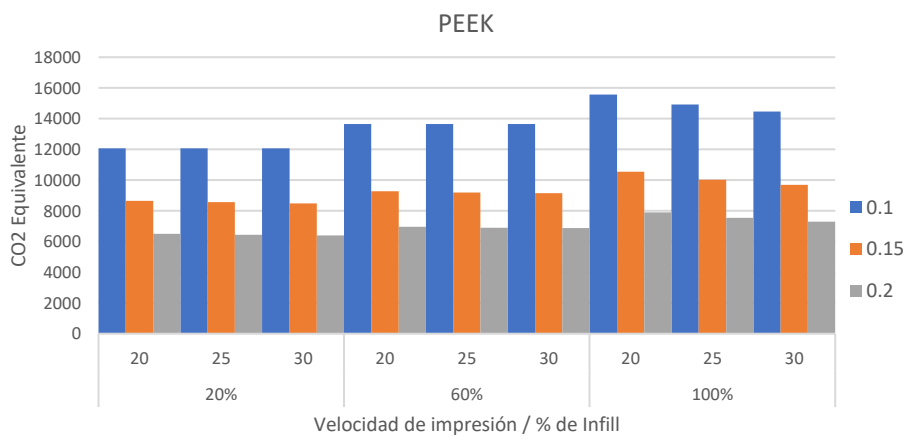


Figura 63. Emisiones de CO₂ equivalente del lote del espécimen en la posición C fabricado con PEEK por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

Similar a lo hallado hasta el momento, en el porcentaje de relleno de 100% las emisiones siguen el mismo patrón; a menor altura de capa, mayor las emisiones calculadas; a menor velocidad, mayores las emisiones calculadas y a mayor porcentaje de relleno, mayor serán las emisiones calculadas. Sin embargo, para los porcentajes de relleno de 20% y 60% está distribución de las emisiones por parámetro simulado no es similar.

Se presenta a continuación, los resultados de energía promedio para cada parámetro, empezando por la variación de la velocidad y los cambios en la energía promedio. (ver Tabla 42)

Tabla 42. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PEEK en la posición C del espécimen

Velocidad	20mm/s	25mm/s	30mm/s
E_{promedio} kWh	16.54	16.21	15.99
entre 30 y 50	-1.97%		
entre 50 y 70	-1.41%		
entre 30 y 70	-3.36%		

En comparación con el lote de especímenes en la posición B, las variaciones de energía promedio ante cambios en la velocidad son inferiores, casi un 2% menos en algunas velocidades.

Seguidamente, se presentan los resultados de las variaciones de energía promedio ante cambios en la altura de capa. (ver Tabla 43)

Tabla 43. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PEEK en la posición C del espécimen

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio} kWh	22.17	15.17	11.40
entre 0.1 y 0.15	-31.58%		
entre 0.15 y 0.2	-24.82%		
entre 0.1 y 0.2	-48.57%		

En la posición C del espécimen los resultados de los saltos de las energías promedios ante cambios en la altura de capa son similares a los hallados con el mismo material en la posición B.

El último parámetro por presentar son las variaciones de energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno. (ver Tabla 44)

Tabla 44. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PEEK en la posición C del espécimen

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio} kWh	14.75	16.21	17.78
entre 20% y 60%	9.03%		
entre 60% y 100%	8.82%		
entre 20% y 100%	17.06%		

En comparación con los resultados hallados con el mismo material y el espécimen en la posición B, los saltos de energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno son inferiores, casi un 2%.

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones con los distintos parámetros en el lote de especímenes en la posición D.

SIMULACIÓN DE LOTE DE ESPECÍMENES EN LA POSICIÓN D

La distribución del lote de especímenes en la posición D se pueden observar en la Figura 64. Al igual que en los especímenes en las posiciones B y C, fue considerado el uso de material de soporte. Las propiedades de impresión utilizadas en la simulación se presentan en la Tabla 45.

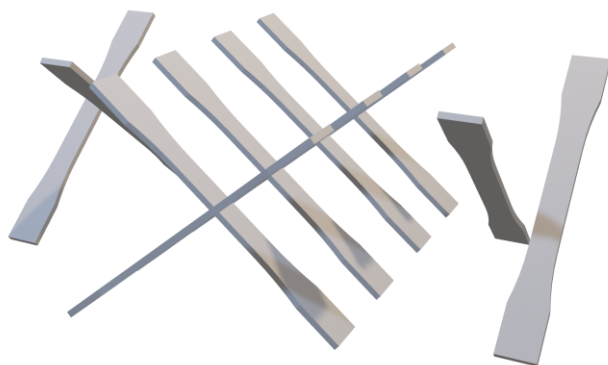


Figura 64. Distribución del lote en la posición D en la bandeja de impresión (2da simulación)

Tabla 45. Propiedades de impresión utilizadas en el espécimen en la posición D (2da simulación)

Descripción	Propiedades de impresión
Estrategia de relleno	Rejillas
Estructura de soporte	Si
Mallado de la estructura de soporte	Rejilla
Ángulo de voladizo	40°
Adhesión al plato de impresión	Ninguna
Mallado de la estructura de soporte	Rejilla

Para comparar las emisiones de CO₂ equivalente por cada parámetro de impresión utilizado en la simulación del lote de especímenes en la posición D, se presenta en la Figura 65 las emisiones utilizando los datos del PLA como material de fabricación.

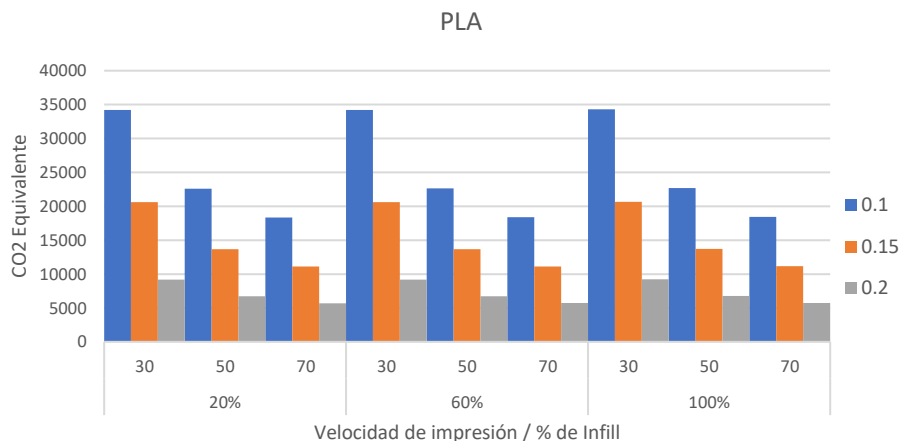


Figura 65. Emisiones de CO₂ equivalente del lote del espécimen en la posición D fabricado con PLA por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

Los resultados de emisiones de CO₂ equivalente son similares en los parámetros de altura de capa y velocidad. Sin embargo, en los porcentajes de relleno no hay diferencias significativas. Para establecer la magnitud de los cambios y similitudes por parámetro, a continuación, se presentan los resultados de la energía promedio por parámetro simulados.

Para empezar la presentación de resultados por parámetro, en la Tabla 46 se muestran las variaciones de energía promedio antes cambios en la velocidad de la impresora.

Tabla 46. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PLA en la posición D del espécimen

Velocidad	30mm/s	50mm/s	70mm/s
E_{promedio} kWh	34.88	23.45	19.18
entre 30 y 50	-32.76%		
entre 50 y 70	-18.20%		
entre 30 y 70	-45.00%		

Las variaciones de energía promedio ante cambios de velocidad de impresión son similares a los hallados en los especímenes en las posiciones A, B y C. Por otro lado, el aumento en la energía promedio con respecto a los especímenes en la posición C, la energía promedio es 5 veces mayor en los especímenes en la posición D.

Continuando con la presentación de resultados, se presentan en la Tabla 47 los resultados de las variaciones de la energía promedio ante cambios en la altura de capa.

Tabla 47. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PLA en la posición D del espécimen

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio kWh}	40.99	24.73	11.79
entre 0.1 y 0.15	-39.67%		
entre 0.15 y 0.2	-52.31%		
entre 0.1 y 0.2	-71.23%		

Los resultados de las variaciones de energía promedio ante cambios de altura de capa en el lote de especímenes en la posición D es similar a los hallados en los especímenes en la posición C.

A continuación, los resultados de las variaciones en la energía promedio por cambios en el porcentaje de relleno. (ver Tabla 48)

Tabla 48. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PLA en la posición D del espécimen

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio kWh}	25.78	25.83	25.90
entre 20% y 60%	0.18%		
entre 60% y 100%	0.29%		
entre 20% y 100%	0.46%		

Las variaciones de energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno en el lote de especímenes en la posición D son inferiores a 0.3%. En otras palabras, las variaciones de energía promedio al cambiar los porcentajes de relleno son casi imperceptibles en esta posición del espécimen. Por ende, los parámetros de velocidad y altura de capa son los que definen las emisiones de CO₂ equivalente en esta posición del espécimen.

Seguidamente, los resultados de las emisiones de CO₂ equivalente calculadas con el espécimen en la posición D utilizando los datos del material ABS para la simulación. (ver Figura 66)

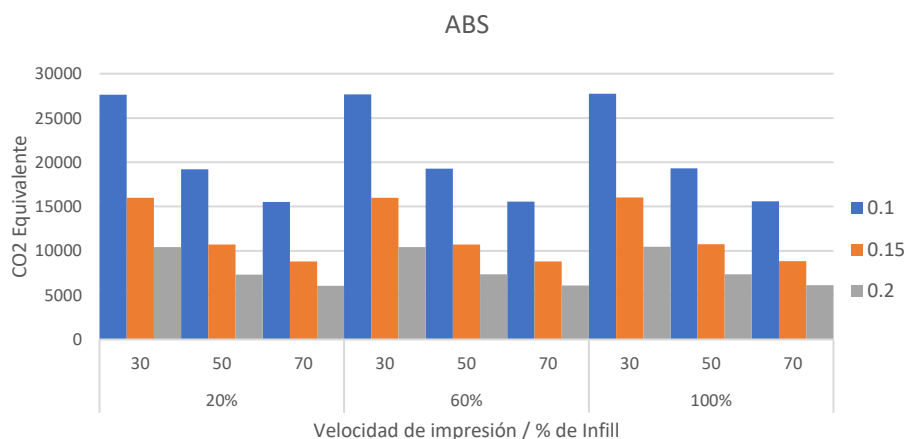


Figura 66. Emisiones de CO2 equivalente del lote del espécimen en la posición D fabricado con ABS por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

En general los datos de emisiones con respecto a los parámetros de impresión simulados se corresponden con los presentados hasta este momento. En cuanto a la magnitud de las emisiones el lote de especímenes en la posición D representan aproximadamente un 76% más que las emisiones calculadas con el mismo material en la posición C del espécimen. Además, con respecto al PLA en la misma posición del espécimen, las emisiones calculadas con el espécimen en la posición D representa un 1.2 veces menos emisiones.

A continuación, un análisis por cada parámetro simulado en el lote de especímenes en la posición D, empezando por las variaciones de energía promedio ante cambios en la velocidad de impresión. (ver Tabla 49)

Tabla 49. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con ABS en la posición D del espécimen

Velocidad	30mm/s	50mm/s	70mm/s
E_{promedio} kWh	29.48	20.34	16.60
entre 30 y 50	-31.00%		
entre 50 y 70	-18.42%		
entre 30 y 70	-43.71%		

Los saltos de energía promedio ante cambios de velocidad son similares a los hallados en la simulación del lote de especímenes en la posición C, incluso con los resultados con PLA. Por otro lado, las variaciones de energía promedio ante cambios en la velocidad de impresión son 4.2 veces más que las halladas en el lote de especímenes en la posición C con el mismo material.

Seguidamente, se presentan los resultados de las variaciones de energía promedio ante cambios en la altura de capa para el lote de especímenes en la posición D. (ver Tabla 50)

Tabla 50. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con ABS en la posición D del espécimen

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio kWh}	34.04	19.37	13.01
entre 0.1 y 0.15	-43.11%		
entre 0.15 y 0.2	-32.85%		
entre 0.1 y 0.2	-61.80%		

Los saltos de las variaciones de energía promedio ante cambios en la altura de capa son similares a los hallados en el lote de especímenes en la posición C. Sin embargo, las magnitudes siguen siendo 4.2 veces mayores en el lote de especímenes en la posición D que en el lote de especímenes en la posición C.

Por último, para este material, en la Tabla 51 los resultados de las variaciones de energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno.

Tabla 51. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con ABS en la posición D del espécimen

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio kWh}	22.09	22.14	22.19
entre 20% y 60%	0.22%		
entre 60% y 100%	0.25%		
entre 20% y 100%	0.46%		

Similar a los datos hallados en el mismo lote de especímenes en la posición D simulado con los datos del PLA, los porcentajes de variación ante cambios de porcentaje de relleno son similares a los hallados utilizando los datos del ABS en la simulación. Por ende, se mantienen los parámetros de altura de capa y velocidad como los determinantes en las emisiones de CO₂ equivalente en este lote de especímenes.

A continuación, en la Figura 67 una comparativa de los resultados de energía calculada, con respecto a todos los parámetros simulados con la información de los materiales PLA y ABS.

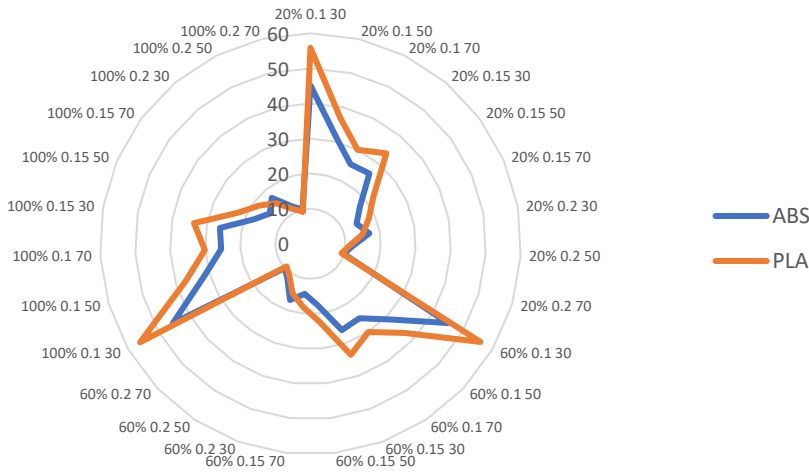


Figura 67. Comparativa de las energías calculadas entre el PLA y el ABS en la fabricación de los especímenes en la posición D

Como es posible observar al igual que los lotes de especímenes simulados en las posiciones A, B y C es necesaria más energía en el proceso de impresión con PLA que en el proceso de impresión con ABS, esta diferencia se acentúa en el lote de especímenes en la posición D.

A continuación, se presentan los resultados utilizando los datos del PEEK como material de fabricación en la simulación del lote de especímenes en la posición D. Primero se presentan los resultados de las emisiones de CO₂ equivalente en la Figura 68.

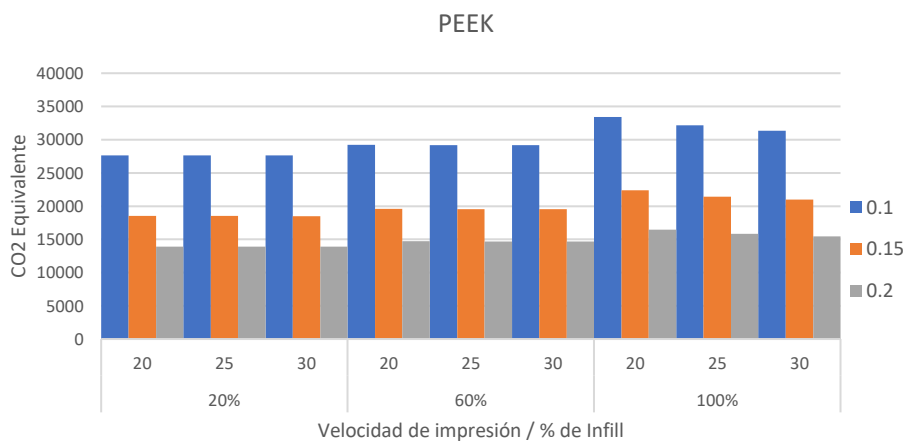


Figura 68. Emisiones de CO₂ equivalente del lote del espécimen en la posición D fabricado con PEEK por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

Al igual que con los datos simulados del PEEK en la posición C del lote de especímenes, a un porcentaje de relleno del 100%, las emisiones de CO₂ equivalente son similares a los hallados en los lotes anteriores. Sin embargo, en los porcentajes de relleno del 20% y del 60% son parecidos a los hallados anteriormente con los datos del PLA y el ABS.

Al comparar el escenario con los mayores datos de emisión de CO₂ equivalente con el escenario con menores datos de emisiones de CO₂ equivalente, la diferencia porcentual es de 58%.

Para profundizar el análisis, a continuación, se presentan los resultados de las variaciones de energía promedio ante cambios en los parámetros de impresión simulados, empezando por la velocidad de impresión. (ver Tabla 52)

Tabla 52. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PEEK en la posición D del espécimen

Velocidad	20mm/s	25mm/s	30mm/s
E_{promedio} kWh	35.56	35.03	34.72
entre 30 y 50	-1.49%		
entre 50 y 70		-0.89%	
entre 30 y 70			-2.37%

En comparación con los resultados de las variaciones de energía promedio ante cambios en la velocidad de impresión del lote de especímenes en la posición C son similares los porcentajes entre los saltos de velocidad. Sin embargo, la energía promedio en el lote de especímenes en la posición D es más de dos veces la energía promedio en el lote de especímenes en la posición C.

El siguiente parámetro por presentar, es la variación de energía promedio ante cambios en la altura de capa. (ver Tabla 53)

Tabla 53. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PEEK en la posición D del espécimen

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio} kWh	48.56	32.50	24.25
entre 0.1 y 0.15	-33.08%		
entre 0.15 y 0.2		-25.39%	
entre 0.1 y 0.2			-50.07%

Los saltos entre alturas de capa de las variaciones de energía promedio en este lote son similares a los hallados en el lote de especímenes en la posición C.

A continuación, las variaciones de energía promedio debido a cambios en el porcentaje de relleno y los saltos porcentuales entre estos cambios. (ver Tabla 54)

Tabla 54. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PEEK en la posición D del espécimen

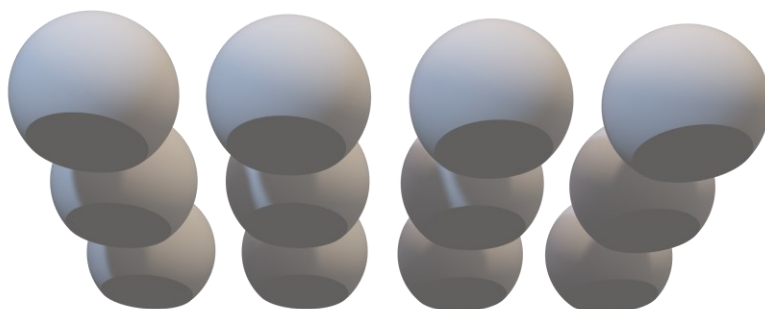
% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio kWh}	32.72	34.56	38.03
entre 20% y 60%	5.32%		
entre 60% y 100%	9.14%		
entre 20% y 100%	13.98%		

Los saltos porcentuales de la energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno son similares a los hallados en el lote de especímenes en la posición C con los datos del PEEK. Sin embargo, en el porcentaje de relleno del 20% los datos sugieren que no hay mucha variación entre fabricar el lote de especímenes en la posición D con 20% o 60% de relleno.

A continuación, se presentan los resultados de las simulaciones con los distintos parámetros en el lote de piezas CEs.

SIMULACIÓN DE LOTE DE PIEZAS CEs

Debido al poco relleno de los especímenes se propone simular el modelo con geometrías con un volumen considerable para comprobar la efectividad del modelo. La distribución de las 12 piezas tipo CEs en la bandeja de impresión, se muestran en la Figura 69. La pieza CEs es una esfera cortada a 45% de la tangente de su circunferencia. En la Tabla 55 se presentan las propiedades de impresión utilizadas en la simulación.

**Figura 69.** Distribución del lote de piezas CEs (2da simulación)**Tabla 55.** Propiedades de impresión utilizadas en la pieza CEs (2da simulación)

Descripción	Propiedades de impresión
Estrategia de relleno	Rejillas
Estructura de soporte	Si
Mallado de la estructura de soporte	Rejilla
Ángulo de voladizo	60°
Adhesión al plato de impresión	Ninguna
Mallado de la estructura de soporte	Rejilla

Al simular el lote de piezas CEs se propone un ángulo de voladizo de 60° para evitar material de soporte y sólo considerar el volumen en la evaluación del modelo.

Para comparar las emisiones de CO₂ equivalente del lote de piezas CEs, se presenta inicialmente las emisiones calculadas a partir de los datos del PLA. (ver Figura 70)

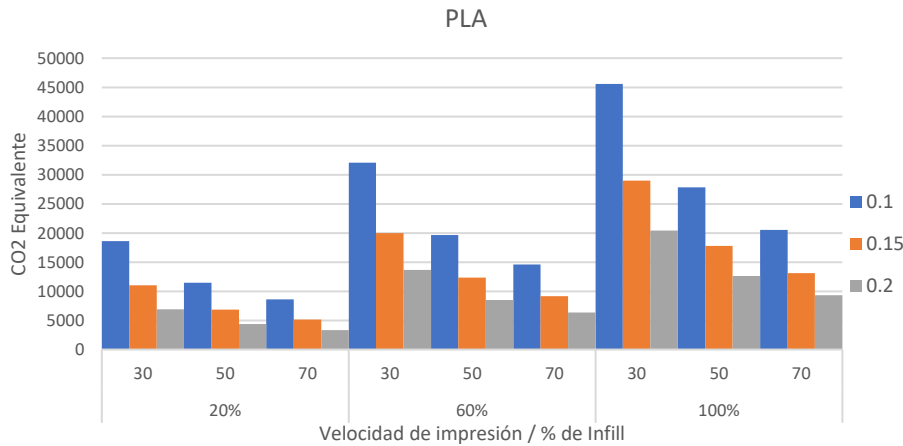


Figura 70. Emisiones de CO₂ equivalente del lote de piezas CEs fabricado con PLA por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno

La diferencia entre porcentajes de relleno es notoria en comparación con los especímenes anteriores, aun así, mantienen la misma tendencia; a menor altura de capa, mayor las emisiones; a mayor velocidad de impresión, menor las emisiones y a mayor porcentaje de relleno, mayor las emisiones. El peor escenario de emisiones calculadas de CO₂ equivalente se da cuando la altura de capa es de 0.1mm, la velocidad de impresión es de 30 mm/s y el porcentaje de relleno es igual al 100%. El escenario simulado con el mínimo valor calculado de emisiones se da con una altura de capa de 0.2mm, velocidad de impresión de 70 mm/s y porcentaje de relleno del 20%. El peor escenario de emisiones es casi 14 veces más que el mínimo valor calculado de emisiones de CO₂ equivalente calculado en el modelo propuesto.

A continuación, un análisis por parámetro de impresión, empezando por la variación de la energía promedio por cambios en la velocidad de impresión. (ver Tabla 56)

Tabla 56. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PLA para la pieza CEs

Velocidad	30mm/s	50mm/s	70mm/s
E_{promedio} kWh	35.81	22.04	16.37
entre 30 y 50	-38.46%		
entre 50 y 70	-25.72%		
entre 30 y 70	-54.29%		

El porcentaje de variación coincide con los hallados en los lotes de especímenes. A excepción de los especímenes simulados tomando en consideración los datos del PEEK como material de fabricación.

Seguidamente, la variación de la energía promedio ante cambios en la altura de capa. (ver Tabla 57)

Tabla 57. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PLA para la pieza CEs

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio} kWh	36.11	22.57	15.53
entre 0.1 y 0.15	-37.48%		
entre 0.15 y 0.2	-31.20%		
entre 0.1 y 0.2	-56.99%		

Los saltos porcentuales de la energía promedio ante cambios en la altura de capa son similares con los encontrados en los especímenes en todas las posiciones y materiales simulados.

Por último, las variaciones de energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno. (ver Tabla 58)

Tabla 58. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PLA para la pieza CEs

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio} kWh	13.87	24.74	35.62
entre 20% y 60%	43.96%		
entre 60% y 100%	30.55%		
entre 20% y 100%	61.08%		

Los saltos de energía promedio calculada no se corresponden con ningún otro hallado hasta el momento en esta tesis. En algunas circunstancias simuladas, los saltos son inferiores al 1% (con el PLA y el ABS) y en otras simulaciones con el PEEK llegan hasta un máximo de 10%.

A continuación, los resultados de las emisiones halladas al simular la pieza CEs utilizando los datos del ABS como material de fabricación. (ver Figura 71)

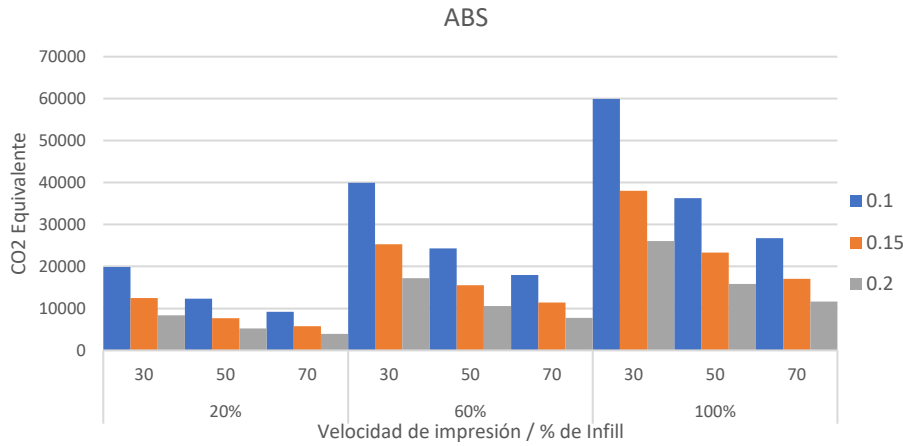


Figura 71. Emisiones de CO2 equivalente del lote de piezas CEs fabricado con ABS por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno

Los resultados hallados con los datos del ABS son similares a los hallados con los datos del PLA. Sin embargo, la diferencia porcentual entre ambos materiales es de, en promedio, un 90%, siendo los resultados de las simulaciones con ABS mayores que los resultados de las simulaciones con el PLA.

A continuación, los resultados de las energías promedio calculados con los distintos parámetros por separado, empezando por las variaciones de energía promedio antes cambios en la velocidad de impresión. (ver Tabla 59)

Tabla 59. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con ABS para la pieza CEs

Velocidad	30mm/s	50mm/s	70mm/s
E_{promedio} kWh	44.86	27.43	20.24
entre 30 y 50	-38.86%		
entre 50 y 70	-26.22%		
entre 30 y 70	-54.89%		

Los resultados son similares a los hallados en los resultados de energía promedio con variaciones de velocidad en las diferentes posiciones del espécimen. Y similar a los resultados de energía promedio calculados utilizando los datos del PLA como material de fabricación para la pieza CEs.

Seguidamente, los resultados de las variaciones de energía promedio ante cambios en la altura de capa. (ver Tabla 60)

Tabla 60. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con ABS para la pieza CEs

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio} kWh	44.77	28.41	19.34
entre 0.1 y 0.15	-36.53%		
entre 0.15 y 0.2	-31.92%		
entre 0.1 y 0.2	-56.79%		

Los resultados son similares a los hallados en los especímenes en todas las posiciones. Además, son similares a los saltos de energía promedio utilizando el PLA como material de fabricación.

Por último, Las variaciones porcentuales de la energía promedio antes cambios en el porcentaje de relleno. (ver Tabla 61)

Tabla 61. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con ABS para la pieza CEs

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio} kWh	15.40	30.86	46.27
entre 20% y 60%	50.09%		
entre 60% y 100%	33.32%		
entre 20% y 100%	66.72%		

Los saltos porcentuales de variación de energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno, son similares a los hallados en la misma pieza simulada con los datos del PLA como material de fabricación.

A continuación, una comparación de la energía calculada, de todos los escenarios simulados con los materiales PLA y ABS. (ver Figura 72)

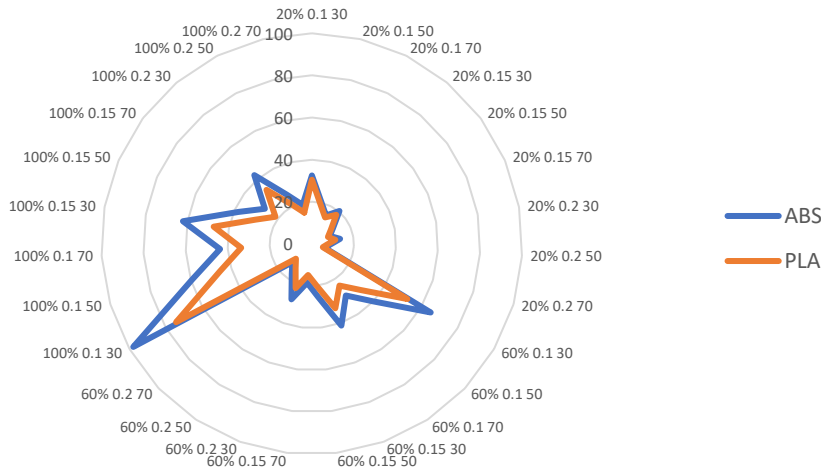


Figura 72. Comparativa de las energías calculadas entre el PLA y el ABS en la fabricación de las piezas CEs

Se puede observar en todos los casos, para las piezas CEs, La energía calculada, con los datos del ABS como material de construcción, es mayor que la energía calculada con los datos del PLA. En algunos casos la diferencia de energía calculada es 17 veces mayor en ABS que en PLA, por ende, las emisiones de CO₂ equivalente son mayores en ABS que en PLA.

Continuando con el análisis de las simulaciones de la pieza CEs, en la Figura 73 se presentan las emisiones de CO₂ equivalente calculadas con los datos del PEEK como material de construcción.

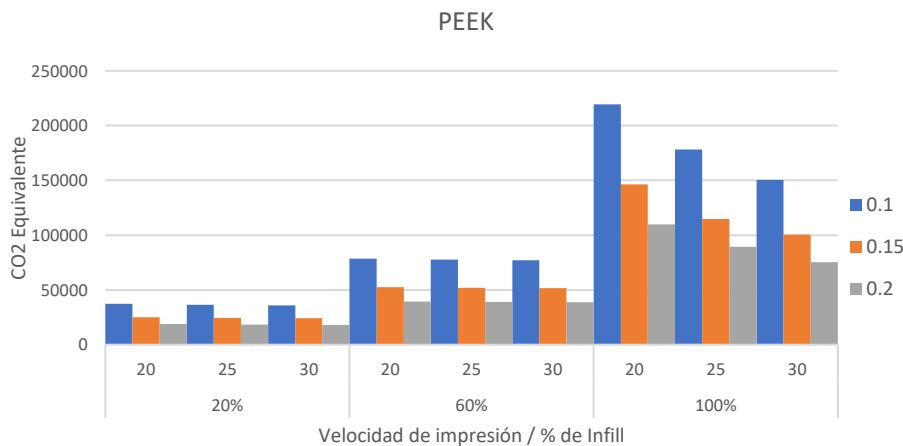


Figura 73. Emisiones de CO₂ equivalente del lote de piezas CEs fabricado con PEEK por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

Las emisiones de CO₂ calculadas son similares a las halladas en las simulaciones utilizando los datos del PLA y el ABS como material de fabricación. Sin embargo, existe una diferencia importante en la magnitud de los valores máximos y mínimos de las emisiones calculadas.

Por un lado, con respecto al PLA, 79% más emisiones con PEEK y con respecto al ABS, 73% más emisiones con PEEK, en el mismo lote de piezas CEs.

A continuación, se presentan los resultados de las variaciones de energía promedio ante cambios en las tres variables de impresión, empezando por la velocidad de impresión. (ver Tabla 62)

Tabla 62. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PEEK en la pieza CEs

Velocidad	20mm/s	25mm/s	30mm/s
E_{promedio} kWh	132.12	114.36	103.84
entre 30 y 50	-13.44%		
entre 50 y 70	-9.19%		
entre 30 y 70	-21.40%		

Los saltos porcentuales de la energía promedio ante cambios en la velocidad de impresión son distintos a los encontrados en el mismo lote de piezas CEs, con los datos del PLA y ABS como materiales utilizados en la fabricación. Por otro lado, comparado con los lotes de especímenes en las distintas posiciones en promedio la magnitud de la energía promedio es casi 4 veces mayor con el lote de piezas CEs.

A continuación, las variaciones de energía promedio calculadas con los distintos valores de altura de capa. (ver Tabla 63)

Tabla 63. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PEEK de la pieza CEs

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio} kWh	161.83	107.38	81.11
entre 0.1 y 0.15	-33.64%		
entre 0.15 y 0.2	-24.47%		
entre 0.1 y 0.2	-49.88%		

Los porcentajes de variación de la energía promedio ante cambios en la altura de capa son similares a los hallados en el PLA, el ABS y en los lotes de especímenes que utilizan los datos del PEEK como material de fabricación.

Por último, las variaciones de energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno. (ver Tabla 64)

Tabla 64. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PEEK para la pieza CEs

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio kWh}	43.34	91.99	214.99
entre 20% y 60%	52.89%		
entre 60% y 100%	57.21%		
entre 20% y 100%	79.84%		

Los saltos porcentuales de energía promedio ante cambio en el porcentaje de relleno son mayores a los encontrados con otros materiales en el mismo lote de piezas. Con respecto al mismo material, comparado con los lotes de especímenes, los saltos porcentuales, ante cambios en el porcentaje de relleno, son 10 veces mayores en el lote de piezas CEs.

A continuación, los resultados de las simulaciones con el lote de piezas Ses.

SIMULACIÓN DE LOTE DE PIEZAS Ses

Las simulaciones con el lote de piezas CEs permiten evaluar el modelo en un escenario extremo de un volumen esférico, por otro lado, los especímenes, permitieron evaluar el modelo en un escenario de lote de piezas con poco volumen. En la Figura 74 se muestra la distribución del lote de 12 piezas tipo Ses en la bandeja de impresión, pieza que permite evaluar el modelo en un escenario de volumen intermedio. La pieza tipo Ses es una semiesfera cortada por la mitad del diámetro sobre el eje x. En la Tabla 65 se presentan las propiedades de impresión utilizadas en la simulación.

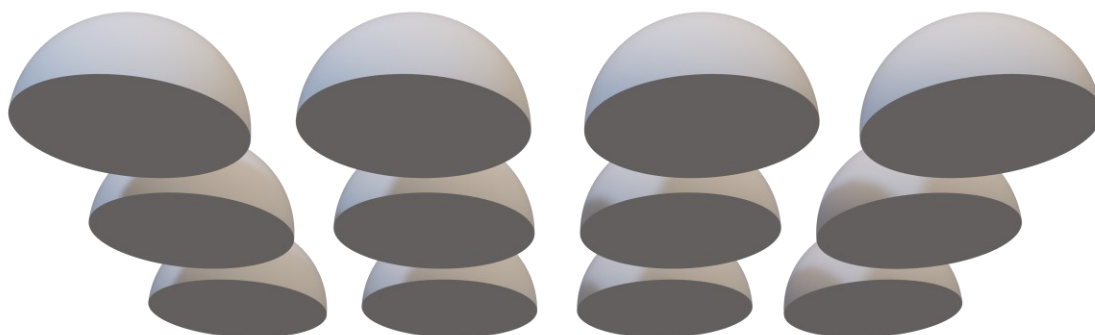


Figura 74. Distribución del lote de piezas Ses (2da simulación)

Tabla 65. Propiedades de impresión utilizadas en la pieza Ses (2da simulación)

Descripción	Propiedades de impresión
Estrategia de relleno	Rejillas
Estructura de soporte	Si

Descripción	Propiedades de impresión
Mallado de la estructura de soporte	Rejilla
Ángulo de voladizo	60°
Adhesión al plato de impresión	Ninguna
Mallado de la estructura de soporte	Rejilla

Para comparar las emisiones de CO₂ equivalente calculadas con las distintas variables, se presentan las emisiones por material utilizado en las simulaciones, empezando por el PLA. (ver Figura 75)

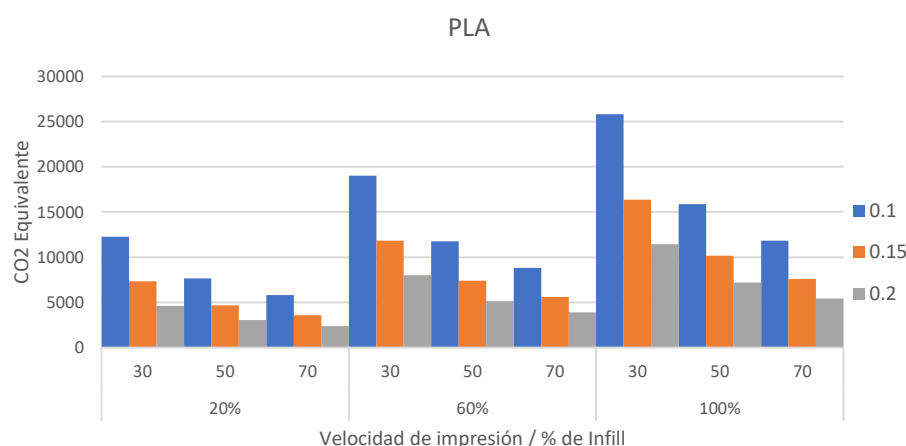


Figura 75. Emisiones de CO₂ equivalente del lote de piezas Ses fabricado con PLA por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno

Las emisiones de CO₂ equivalente se corresponden con lo hasta ahora encontrado entre los distintos lotes de especímenes y en el lote de piezas CEs. Sin embargo, en comparación con el lote de piezas CEs simulados utilizando los datos del PLA, las emisiones son aproximadamente un 43% menos en el lote de piezas Ses con PLA. Por otro lado, con los lotes de especímenes en las posiciones A, B y C, las emisiones son en promedio un 75% mayores en el lote de piezas Ses. Y en el lote de especímenes en la posición D son un 25% menos las emisiones en el lote de piezas Ses.

Para comparar el efecto de los distintos parámetros en las emisiones, en adelante se presentan las variaciones de energía promedio, principal fuente de las emisiones de CO₂ equivalente, por cambios en los distintos parámetros simulados. El primer parámetro escogido para el análisis son los saltos porcentuales de variación de la energía promedio debido a cambios en la velocidad de impresión. (ver Tabla 66)

Tabla 66. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PLA para la pieza Ses

Velocidad	30mm/s	50mm/s	70mm/s
E_{promedio} kWh	21.18	13.23	9.97
entre 30 y 50	-37.53%		
entre 50 y 70	-24.66%		
entre 30 y 70	-52.93%		

Los saltos porcentuales de energía promedio ante cambios de velocidad de impresión son similares a los hallados en el lote de piezas CEs con los datos del PLA simulados.

A continuación, la variación de energía promedio ante cambios en la altura de capa. (ver Tabla 67)

Tabla 67. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PLA para la pieza Ses

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio} kWh	21.57	13.54	9.28
entre 0.1 y 0.15	-37.24%		
entre 0.15 y 0.2	-31.46%		
entre 0.1 y 0.2	-56.98%		

Los saltos porcentuales de la energía promedio ante cambios en la altura de capa en el lote de piezas Ses son similares a los hallados en todas las simulaciones propuestas y materiales simulados.

Por último, las variaciones de energía promedio ante cambios en el porcentaje de relleno. (ver Tabla 68)

Tabla 68. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PLA para la pieza Ses

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio} kWh	9.31	14.79	20.28
entre 20% y 60%	37.03%		
entre 60% y 100%	27.06%		
entre 20% y 100%	54.07%		

Los saltos de energía promedio por cambios en el porcentaje de relleno son cerca de 5% en promedio inferiores con los hallados en el lote de piezas CEs. Por tanto, hay una disminución en las emisiones debido a este parámetro.

A continuación, los resultados de las emisiones de CO₂ equivalentes halladas en las simulaciones del lote de piezas Ses utilizando los datos del ABS como material para la fabricación de las piezas. (ver Figura 76)

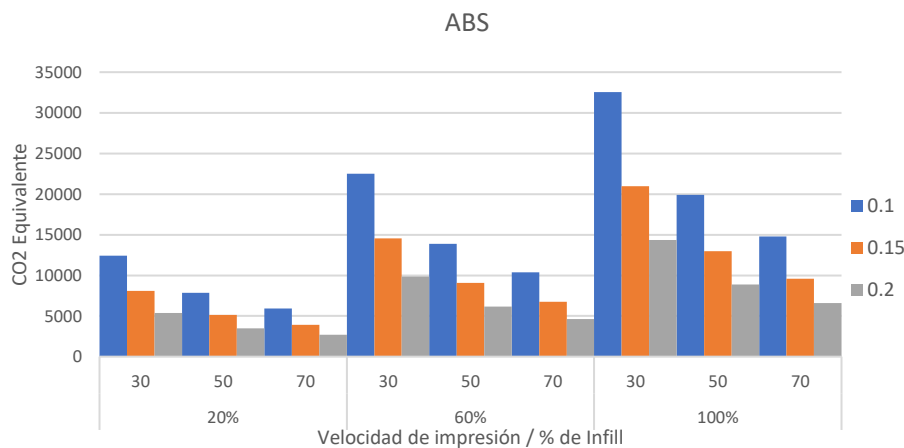


Figura 76. Emisiones de CO₂ equivalente del lote de piezas Ses fabricado con ABS por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno

Las emisiones calculadas del lote de piezas Ses, utilizando el ABS como material para la fabricación, es casi la mitad de las emisiones calculadas para el lote de piezas CEs, con el mismo material. Con respecto a las emisiones calculadas con el PLA los resultados indican que, en el lote de piezas Ses, con el ABS es en promedio un 20% mayor los valores de emisiones que con el PLA.

A continuación, los resultados de las variaciones de energía promedio ante cambios en las variables de la simulación, empezando por la velocidad de impresión. (ver Tabla 69)

Tabla 69. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con ABS para la pieza Ses

Velocidad	30mm/s	50mm/s	70mm/s
E_{promedio kWh}	25.54	15.85	11.85
entre 30 y 50	-37.93%		
entre 50 y 70	-25.26%		
entre 30 y 70	-53.61%		

Las variaciones en la energía promedio debido a cambios en la velocidad de impresión son similares a los hallados en todos los lotes simulados.

Seguidamente, las variaciones de energía promedio debido a cambios en la altura de capa. (ver Tabla 70)

Tabla 70. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con ABS para la pieza Ses

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio} kWh	25.44	16.53	11.26
entre 0.1 y 0.15	-35.05%		
entre 0.15 y 0.2	-31.87%		
entre 0.1 y 0.2	-55.74%		

Las variaciones de energía promedio son similares a los hallados en el lote de piezas tipo CEs con los datos del material ABS.

Por último, las variaciones de energía promedio debido a cambios en el porcentaje de relleno. (ver Tabla 71)

Tabla 71. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con ABS para la pieza SEs

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio} kWh	9.96	17.75	25.52
entre 20% y 60%	43.86%		
entre 60% y 100%	30.47%		
entre 20% y 100%	60.96%		

Al igual que con los resultados obtenidos en este lote de piezas con el PLA como material de fabricación, el porcentaje de relleno en el lote de piezas Ses en la simulación con ABS, es en promedio un 5% inferior a las magnitudes de energía promedio obtenidas con el lote de piezas CEs.

A continuación, una comparación de las energías calculadas con todas las combinaciones de parámetros y escenarios simulados con los materiales PLA y ABS (ver Figura 77)

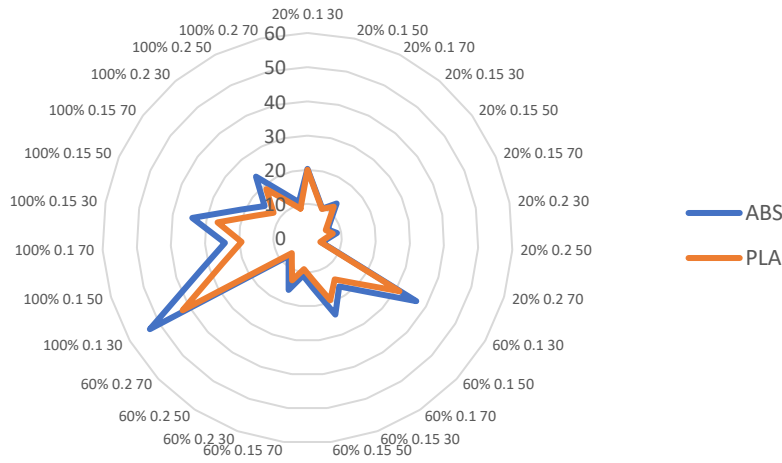


Figura 77. Comparativa de las energías calculadas entre el PLA y el ABS en la fabricación de las piezas Ses

Al igual que con el lote de piezas CEs, la energía calculada con el lote de piezas Ses es mayor en los escenarios simulados donde el ABS es el material de fabricación.

A continuación, los resultados de emisiones calculadas utilizando los datos del PEEK como material de fabricación. (ver Figura 78)

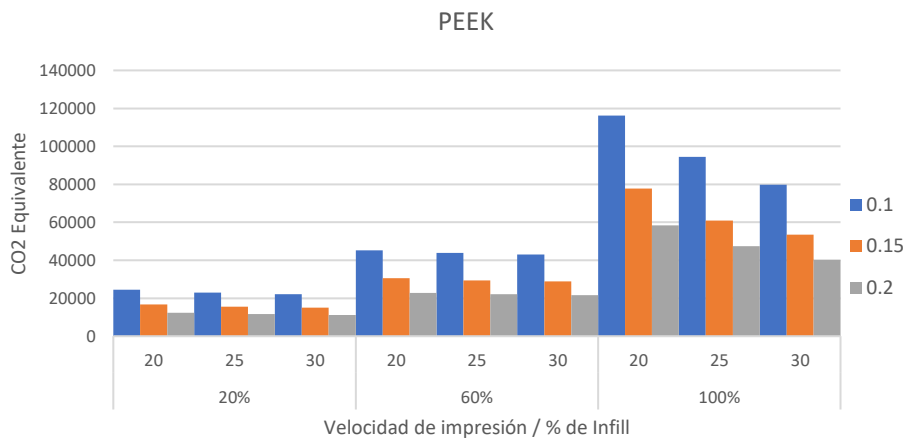


Figura 78. Emisiones de CO₂ equivalente del lote de piezas Ses fabricado con PEEK por altura de capa, velocidad de impresión y porcentaje de relleno.

Las emisiones de CO₂ equivalente calculadas para el lote de piezas Ses coinciden con los hallados en el lote de piezas CEs, relacionados al PEEK. Sin embargo, las magnitudes de las emisiones calculadas en el lote de piezas CEs son casi el dos veces las magnitudes de emisiones del lote de piezas Ses.

A continuación, se presentan los resultados por parámetros simulados para el lote de piezas Ses y sus variaciones de energía promedio debido al cambio de estos parámetros, empezando por la velocidad de impresión. (ver Tabla 72)

Tabla 72. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada velocidad de impresión con PEEK en la pieza Ses

Velocidad	20mm/s	25mm/s	30mm/s
E_{promedio} kWh	73.40	63.25	57.24
entre 30 y 50	-13.82%		
entre 50 y 70	-9.51%		
entre 30 y 70	-22.02%		

Los saltos porcentuales de energía promedio calculada ante cambios en la velocidad de impresión son similares a los hallados en todos los lotes simulados. La magnitud de la energía promedio del lote de piezas Ses es casi la mitad de la energía promedio calculada en el lote de piezas CEs con los datos del PEEK como material de fabricación.

A continuación, se presentan las variaciones de energía promedio ante cambios en la altura de capa para el lote de piezas Ses. (ver Tabla 73)

Tabla 73. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada altura de capa con PEEK de la pieza Ses

Altura de capa	0.1mm	0.15mm	0.2mm
E_{promedio} kWh	89.35	59.56	44.96
entre 0.1 y 0.15	-33.34%		
entre 0.15 y 0.2	-24.50%		
entre 0.1 y 0.2	-49.67%		

Los saltos de energía promedio calculada ante cambios en la altura de capa del lote de piezas Ses, se corresponden con los hallados en el lote de piezas CEs. Al igual que las magnitudes de la energía promedio calculada.

Por último, las variaciones de energía promedio calculada ante cambios en el porcentaje de relleno. (ver Tabla 74)

Tabla 74. Comparación porcentual de las energías promedio (kWh) por cada % de relleno con PEEK para la pieza Ses

% de relleno	20%	60%	100%
E_{promedio} kWh	27.58	52.18	114.13
entre 20% y 60%	47.15%		
entre 60% y 100%	54.28%		
entre 20% y 100%	75.84%		

Las variaciones de energía promedio calculada por cambios en el porcentaje de relleno, porcentualmente son similares a las halladas en el lote simulado de piezas CEs. Por otro lado, al igual que las variaciones de energía promedio ante cambios en la velocidad y la altura de capa, en el porcentaje de relleno la magnitud de la energía promedio es casi la mitad en el lote de piezas Ses con respecto al lote de piezas CEs.