



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

# ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE FACTORES, CARACTERIZACIÓN E IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO EN UN PROCESO DE MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

Autor

Belén Serrano Morella

Director/es

Pilar Lambán Castillo  
Mario Enrique Hernandez Korner

Escuela de ingeniería y arquitectura  
2020

# RESUMEN

La fabricación aditiva busca hacerse un hueco en la industria del futuro, por ello, cada vez se desarrollan más proyectos e investigaciones sobre este tipo de tecnología. La reducción de tiempos de fabricación, el rendimiento de material junto con un ahorro de los costes de almacenamiento son los principales beneficios de la impresión 3D.

La sostenibilidad de la impresión 3D es un de los asuntos que más atención está recibiendo ya que todavía no hay un análisis cuantitativo del rendimiento ambiental de la fabricación aditiva.

El presente trabajo tiene como objetivo analizar la influencia de los factores del modelado por deposición fundida (FDM), a través de un estudio bibliográfico exhaustivo llegando a proponer un modelo que caracterice la huella de carbono del proceso FDM en la impresora Ultimaker 5S, además de planear una ecuación para el cálculo del consumo energético total durante el proceso de impresión hasta el tratamiento de acabado.

La huella de carbono asociada a este proceso de impresión no se centrará únicamente en la energía consumida durante el proceso de producción si no que también contemplará los impactos de producción de los materiales a estudiar como materia prima para la impresión.

Por tanto, a partir de los resultados obtenidos mediante la simulación de varias probetas en el software de simulación "Cura" se podrá hacer un estudio comparativo del impacto que implica cada uno de los materiales escogidos impresos con diferentes parámetros de impresión con el fin de facilitar la elección del material más sostenible, desde su obtención como materia prima hasta proceso final de acabado de la pieza.

# ABSTRACT

Additive manufacturing seeks to gain a foothold in the industry of the future, therefore, more and more projects and research are being developed on this type of technology. Reduced manufacturing times, material throughput, apart from the savings in storage costs are the main benefits of 3D printing.

The sustainability of 3D printing is one of the issues that is receiving the most attention as there is still no quantitative analysis of the environmental performance of additive manufacturing.

The present work aims to analyze the influence of the factors of fused deposition modeling (FDM), through an exhaustive bibliographic study, proposing a model that characterizes the carbon footprint of the FDM process in the Ultimaker 5S printer, in addition to generate an equation to calculate the total energy consumption during the printing process until the finishing treatment.

The carbon footprint associated with this printing process will not only focus on the energy consumed during the production process but will also consider the production impacts of the materials to be studied as raw material for printing.

Therefore, based on the results obtained by simulating several test tubes in the simulation software "Cura", a comparative study of the impact implied by each of the chosen materials printed with different printing parameters can be made in order to facilitate the choice of the most sustainable material, from its obtaining as raw material to the final finishing process of the piece.

# Tabla de contenido

<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>5</b>
<b>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVO Y ALCANCE DEL PROYECTO.....	1
<b>CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>3</b>
2.1 TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA.....	3
2.2 MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM).....	4
2.2.1 <i>Parámetros de funcionamiento en el modelado por deposición fundida.....</i>	<i>6</i>
2.2.1.1 Orientación de pieza o construcción.....	6
2.2.1.2 Altura o grosor de capa.....	6
2.2.1.3 Ángulo de impresión.....	7
2.2.1.4 Velocidad de impresión.....	7
2.2.1.5 Aire entre capas.....	8
2.2.1.6 Temperatura de extrusión.....	8
2.2.1.7 Diámetro de la boquilla.....	8
2.2.2 <i>Materiales y aplicaciones de la tecnología FDM.....</i>	<i>9</i>
2.3 SOSTENIBILIDAD EN LA FABRICACIÓN ADITIVA.....	14
2.4 ECONOMÍA CIRCULAR EN PROCESOS DE FABRICACIÓN ADITIVA.....	17
2.5 RENDIMIENTO ENERGÉTICO.....	18
2.6 ESPECIFICACIONES DE LA IMPRESORA ULTIMAKER 5S.....	20
2.7 SOFTWARE DE IMPRESIÓN (CURA).....	22
2.8 DIMENSIONES DE LA PROBETA SEGÚN ASTM D638.....	23
<b>CAPITULO 3: METODOLOGÍA DE CÁLCULO .....</b>	<b>27</b>
3.1 CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO.....	27
3.2 CALCULO DE LA HUELLA DE CARBONO.....	32
<b>CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>	<b>34</b>

4.1	CASOS DE ESTUDIO.....	34
4.2	RESULTADOS DE CONSUMO ENERGÉTICO Y ENERGÍA TOTAL PRIMARIA .....	38
4.2.1	PLA.....	38
4.2.2	ABS.....	41
4.2.3	TPU.....	42
4.2.4	PETG.....	42
4.2.5	PP.....	43
4.3	ANÁLISIS GLOBAL CON CONSUMO ENERGÉTICO TOTAL .....	44
4.4	RESULTADOS DE LA HUELLA DE CARBONO .....	48
4.4.1	PLA.....	48
4.4.2	ABS.....	49
4.4.3	TPU.....	50
4.4.4	PETG.....	50
4.4.5	PP.....	51
4.4	ANÁLISIS GLOBAL DE LA HUELLA DE CARBONO .....	52
	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>56</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>59</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>TABLA 1.</b>	TIPOS DE TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D. [5].....	3
<b>TABLA 2.</b>	TABLA COMPARATIVA DE LOS MATERIALES A ESTUDIAR .....	14
<b>TABLA 3.</b>	VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA (TABLA ADAPTADA DE [28]) .....	15
<b>TABLA 4.</b>	TABLA DE PROPIEDADES DE LA IMPRESORA Y SU FUNCIONAMIENTO [33].....	21
<b>TABLA 5.</b>	CONSTANTES DE LOS MATERIALES CON SUS RESPECTIVAS REFERENCIAS. ....	31
<b>TABLA 6.</b>	TABLA CON LAS CONSTANTES DE LOS MATERIALES. [37] .....	33
<b>TABLA 7.</b>	VELOCIDAD DE IMPRESIÓN PARA CADA MATERIAL.....	34
<b>TABLA 8.</b>	ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA PARA PROBETAS DE PLA.....	39

<b>TABLA 9.</b> ENERGÍA PRIMARIA TOTAL REQUERIDA PARA PROBETA DE PLA .....	40
<b>TABLA 10.</b> ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA PARA PROBETAS DE ABS .....	41
<b>TABLA 11.</b> ENERGÍA TOTAL PRIMARIA REQUERIDA PARA PROBETA DE ABS .....	41
<b>TABLA 12.</b> ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA PARA PROBETA DE TPU .....	42
<b>TABLA 13.</b> ENERGÍA PRIMARIA TOTAL REQUERIDA PARA PROBETA DE TPU.....	42
<b>TABLA 14.</b> ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA PARA PROBETA PETG.....	42
<b>TABLA 15.</b> ENERGÍA PRIMARIO TOTAL REQUERIDA PARA PROBETA DE PETG .....	43
<b>TABLA 16.</b> ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA PARA PROBETA PP .....	43
<b>TABLA 17.</b> ENERGÍA PRIMARIA TOTAL REQUERIDA PARA PROBETA DE PP .....	43
<b>TABLA 18.</b> IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO DE LAS PROBETAS DE PLA.....	49
<b>TABLA 19.</b> IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO DE LAS PROBETAS DE ABS .....	49
<b>TABLA 20.</b> IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO DE LAS PROBETAS DE TPU .....	50
<b>TABLA 21.</b> IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO DE LAS PROBETAS DE PETG. ....	50
<b>TABLA 22.</b> IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO DE LAS PROBETAS DE PP .....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> CLASIFICACIÓN DE FABRICACIÓN ADITIVA. [2].....	4
<b>FIGURA 2.</b> DIAGRAMA REPRESENTATIVO DEL PROCESO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA. [9].....	5
<b>FIGURA 3.</b> REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ORIENTACIÓN DE LA CONSTRUCCIÓN. [10] .....	6
<b>FIGURA 4.</b> REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DE LA ALTURA DE CAPA. [10].....	7
<b>FIGURA 5.</b> ILUSTRACIÓN GRÁFICA DEL ÁNGULO DE IMPRESIÓN. [10] .....	7
<b>FIGURA 6.</b> BOBINA DE FILAMENTO PARA LAS IMPRESORAS 3D DE DYNAMICAL MATERIALS.....	9
<b>FIGURA 7.</b> PIEZA PROTOTIPO IMPRESA CON PLA.[13].....	10
<b>FIGURA 8.</b> PIEZA DE ABS PROCESADA POR UNA IMPRESORA FDM. ....	11
<b>FIGURA 9.</b> PIEZAS DE PETG.[14],[15] .....	12
<b>FIGURA 10.</b> BOTELLA IMPRESA DE PP POR ULTIMAKER. [17] .....	12

<b>FIGURA 11.</b> CARCASA DE MÓVIL IMPRESA CON TPU .....	13
<b>FIGURA 12.</b> PERSPECTIVA DEL CICLO DE VIDA PARA IDENTIFICAR LOS BENEFICIOS DE SOSTENIBILIDAD DE LA FABRICACIÓN ADITIVA. [28]. .....	18
<b>FIGURA 13.</b> DIAGRAMA DE SEC EN PROCESOS DE IMPRESIÓN 3D.[4] .....	19
<b>FIGURA 14.</b> ULTIMAKER 5S.....	21
<b>FIGURA 15.</b> PANEL DE AJUSTE DE PARÁMETROS PARA CURA .....	22
<b>FIGURA 16.</b> PROBETA IMPRESA POR EL SIMULADOR CURA CON EL TIEMPO DE IMPRESIÓN Y MASA DE MATERIAL CON ORIENTACIÓN X. ....	23
<b>FIGURA 17.</b> PROBETA IMPRESA POR EL SIMULADOR CURA CON EL TIEMPO DE IMPRESIÓN Y MASA DE MATERIAL CON ORIENTACIÓN Z. ....	23
<b>FIGURA 18.</b> DIMENSIONES Y MEDIDAS DE LA PROBETA TIPO 1. ....	24
<b>FIGURA 19.</b> ESQUEMA DE LOS PARÁMETROS DE IMPRESIÓN DE CADA MATERIAL PARA SU SIMULACIÓN. ....	35
<b>FIGURA 20.</b> PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA LA SIMULACIÓN DE PLA. ....	36
<b>FIGURA 21.</b> PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA LA SIMULACIÓN DE ABS.....	36
<b>FIGURA 22.</b> PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA LA SIMULACIÓN DE TPU.....	37
<b>FIGURA 23.</b> PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA LA SIMULACIÓN PARA PETG.....	37
<b>FIGURA 24.</b> PARÁMETROS DE IMPRESIÓN PARA LA SIMULACIÓN DE PP. ....	37
<b>FIGURA 25.</b> REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PL, ABS, TPU Y PP PARA CASO DE ORIENTACION X Y v=30MM/S .....	45
<b>FIGURA 26.</b> REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PL, ABS, TPU Y PP PARA CASO DE ORIENTACIÓN Z Y v=30MM/S .....	45
<b>FIGURA 27.</b> REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PL, ABS, PETG PARA CASO DE ORIENTACIÓN X Y v=90MM/S	46
<b>FIGURA 28.</b> REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PL, ABS, PETG PARA CASO DE ORIENTACIÓN Z Y v=90MM/S	46
<b>FIGURA 29.</b> REPRESENTACIÓN GRÁFICA DEL PL, ABS, TPU Y PP PARA CASO DE ORIENTACIÓN X Y v=45 MM/S. ....	47
<b>FIGURA 30.</b> ENERGÍA TOTAL CONSUMIDA PARA PROBETAS DE PLA, ABS, TPU, PETG Y PP CON ORIENTACIÓN X Y Z.....	48
<b>FIGURA 31.</b> IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO PARA PROBETAS DE PLA, ABS, TPU Y PP CON ORIENTACIÓN X Y Z.....	52

<b>FIGURA 32.</b> IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO PARA PROBETAS DE PLA, ABS, TPU Y PP CON ORIENTACIÓN X Y Z.....	53
<b>FIGURA 33.</b> IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO PARA PROBETAS DE PLA, ABS, Y PETG CON ORIENTACIÓN X Y Z.....	53
<b>FIGURA 34.</b> IMPACTO DE LA HUELLA DE CARBONO PARA PROBETAS DE PLA, ABS, TPU, PETG Y PP CON ORIENTACIÓN X Y Z.....	54

# CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Objetivo y alcance del proyecto

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis del impacto ambiental en un proceso de modelado por deposición fundida, o FDM por sus siglas en inglés, desde el proceso de obtención de los materiales usados para la impresión hasta el momento de impresión y su posterior tratamiento de acabado.

Para ello, se ha realizado un trabajo de literatura para conocer el estado del arte del modelado por deposición fundida, su caracterización, los materiales compatibles con este tipo de tecnología, además de establecer todas las variables y parámetros necesarios para establecer la huella de carbono asociada al proceso.

Dada la situación que se ha tenido con la pandemia por el COVID, en este trabajo la generación de piezas en una impresora a disposición del Departamento de Ingeniería de Diseño y Fabricación en el que trabajan e investigan directores se ha sustituido por un estudio teórico en el que se han simulado diferentes situaciones con el fin de poder alcanzar el objetivo establecido.

Para simulación de impresión se ha escogido un modelo de impresora concreto similar a la que hay en el departamento y un software en el que se realizarán las simulaciones.

Posteriormente se han analizado y contemplado materiales que comúnmente se emplean en el modelado por deposición fundida, así como los posibles materiales a utilizar por la impresora seleccionada y por el software de simulación escogido.

La impresora seleccionada ha sido Ultimaker 5S y con el software compatible Cura.

Y los materiales finalmente escogidos han sido el Ácido poliláctico (PLA), Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), Poliuretano termoplástico (TPU), tereftalato de polietileno glicol (PETG) y polipropileno (PP).

Se busca simular la impresión de una probeta cuyas dimensiones se contemplan en la norma ASTM D638 con el fin de realizar una comparación del impacto en la huella de los diferentes materiales y situaciones planteadas y disponer información que posibilite escoger el material con mayor eficiencia ecológica.

Para el cálculo de la huella de carbono de los materiales se ha seguido la metodología propuesta por Runze Huang en el artículo “An eco-design for additive manufacturing framework based on energy performance assessment” publicada en la revista Additive Manufacturing. [1]

Previamente al cálculo de la huella de carbono se propone una ecuación de cálculo adaptada del consumo energético total debido a que será una variable significativa dentro de la ecuación para el cálculo del impacto ambiental.

La ecuación de energía total consumida viene definida por las metodologías seguidas en “Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing” [2] y Energy efficiency optimization for ecological 3D printing based on multi-layer customization” [3] y “Investigation of Energy Requirements and Environmental Performance for Additive Manufacturing Processes” [4].

## CAPITULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 Tecnologías de fabricación aditiva

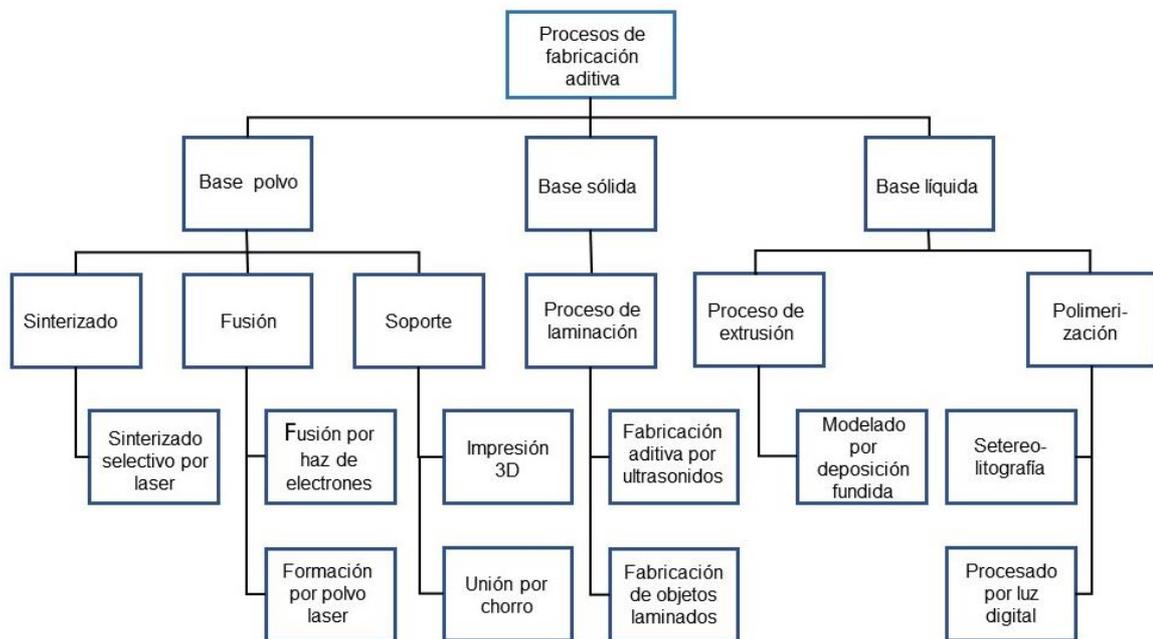
La impresión 3D también conocida como fabricación aditiva es una tecnología que consiste en el modelado y creación de objetos tridimensionales en secuencia mediante la superposición de material en capas finas, del orden de micras, hasta conseguir la forma previamente diseñada.

La fabricación aditiva se ha considerado una tecnología prometedora con mayor eficiencia de recursos y mejores beneficios ecológicos en los sistemas de producción ya que una de las ventajas clave de este proceso de fabricación es que los componentes e incluso los ensamblajes completos vienen directamente derivados de los modelos CAD sin la necesidad de planificar el proceso antes de la fabricación, suponiendo así una ventaja en el ahorro de los costes.

Existe una amplia variedad de tecnologías disponibles para la impresión 3D y principalmente se diferencian en cómo se aporta el material, el tipo de dicho material y la fuente de energía empleada. En esta tabla se muestran las diferentes tecnologías adaptadas para la fabricación aditiva, aunque en este trabajo nos vamos a centrar en proceso de modelado por deposición fundida.

**Tabla 1.** Tipos de tecnologías de impresión 3D. [5]

Aporte de material	Tecnología	Material
<b>Extrusión</b>	Modelado por deposición fundida (FDM)	Termoplásticos como PLA, ABS, HDPE TPU
<b>Hilado</b>	Fabricación por haz de electrones (EBF)	Aleaciones
<b>Granulado</b>	Sinterizado directo de metal por láser (DMLS)	Aleaciones
	Fusión por haz de electrones	Aleaciones de titanio
	Sinterizado selectivo por calor (SHS)	Polvo termoplástico
	Sinterizado selectivo por láser (SLS)	Termoplásticos, polvos metálicos y cerámicos
<b>Laminado</b>	Laminado de capas (LOM)	Papel, papel de aluminio, capa de plástico
<b>Fotoquímicos</b>	Esteolitografía	Fotopolímero



**Figura 1.** Clasificación de fabricación aditiva. [2]

## 2.2 Modelado por deposición fundida (FDM)

El modelado por deposición fundida es una tecnología de impresión 3D más conocida como FDM por sus siglas en inglés Fused Deposition Modeling (también FFF Fused Filament Fabrication), fue desarrollada por S. Scott Crump a finales de 1980 y comercializada en 1990 por Stratasys (EE. UU.), una empresa de la cual él fue parte de su fundación.

Este proceso de fabricación lo constituyen tres elementos principales:

- Una placa o cama de impresión en la que se imprime la pieza
- Una bobina de filamento que sirve como material de impresión
- Una cabeza de extrusión

El modelado por deposición fundida se basa en la succión y fundición de un filamento de polímero por encima de la temperatura de transición vítrea. El filamento es suministrado por una bobina para ser depositado directamente mediante un cabezal que funde el hilo y lo coloca de forma precisa capa por capa sobre la cama de impresión hasta conseguir la estructura tridimensional previamente diseñada. [6]

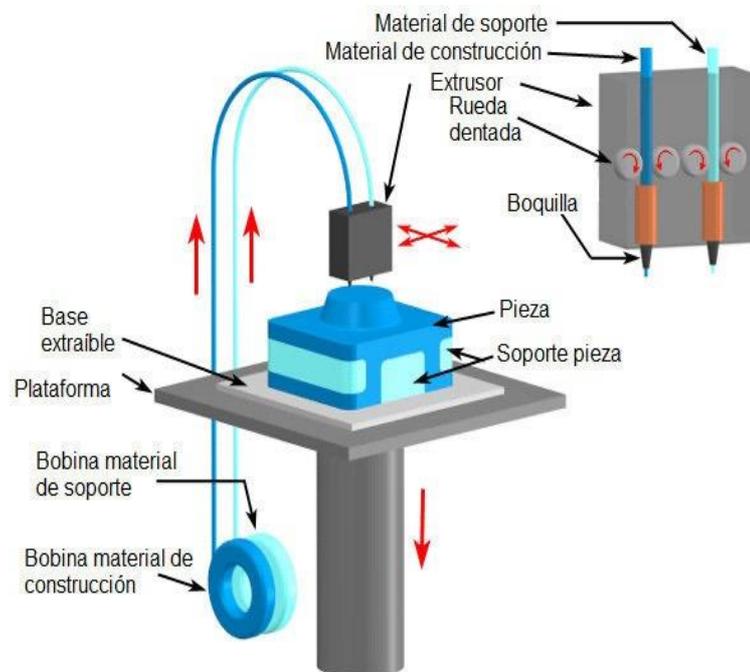
También se han desarrollado máquinas con dos boquillas, como es el caso de la Ultimaker 5S, una para el material de la pieza y la otra para el material de soporte que es

más económico y se desprende de la pieza sin dañar su superficie. El equipo FDM tiene un tamaño compacto y el costo de mantenimiento es bajo. Sin embargo, FDM tiene algunas desventajas, por ejemplo, la línea de costura entre capas, los soportes requeridos y la delaminación causada por la fluctuación de temperatura.[7]

Las principales ventajas que ofrece el proceso FDM es que utiliza materiales estandarizados y muy duraderos, además de la estabilidad de sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo y la calidad de las piezas. Los materiales termoplásticos son adecuados para prototipos funcionales detallados, herramientas de fabricación duraderas y piezas de volumen reducido

Aparte, del bajo costo, la simplicidad del proceso junto con la mayor velocidad de impresión son los beneficios más significativos del proceso por deposición fundida frente a otros tipos de tecnologías, ya que no se requiere el uso de herramientas ni accesorios.

Por el contrario, existe una limitación importante en los parámetros que afectan directamente a la construcción del componente y todavía no se dispone de suficientes trabajos de literatura con un análisis exhaustivo de todos estos parámetros.[8]



**Figura 2.** Diagrama representativo del proceso por deposición fundida. [9]

### 2.2.1 Parámetros de funcionamiento en el modelado por deposición fundida

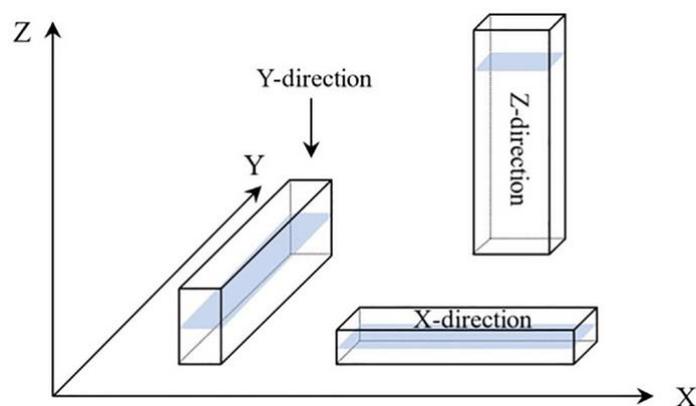
La técnica de modelo por deposición fundida tiene múltiples parámetros de procesamiento, que afectan la calidad de la pieza, las propiedades mecánicas, el tiempo de construcción y la precisión dimensional pero la tarea mas importante a tener en cuenta durante el proceso de impresión es fusionar la capa siguiente antes de que se solidifique la capa anterior para conseguir una correcta fusión entre las capas, ya que si no podría tener un gran impacto en las propiedades mecánicas de la pieza final. [8]

A continuación, se van a definir los parámetros a tener en cuenta en el proceso de modelo por deposición fundida. [10]

#### 2.2.1.1 Orientación de pieza o construcción

Describe la forma en que el componente dado es ajustado en la plataforma de construcción respecto a los tres ejes principales X, Y y Z.

Esta orientación definida previamente y el comportamiento que se obtendrá al fabricar una pieza mediante FDM será de carácter anisótropo. Esto quiere decir que la orientación y la dirección de la impresión es otro punto clave para la optimización del comportamiento de las propiedades mecánicas de la pieza final, ya que su propiedad de anisotropía le permite presentar diferentes propiedades según la dirección de impresión. ([11], [4]). Por ejemplo, en un artículo publicado por Ashtankar se observó que la resistencia a la tracción puede reducirse hasta un 60% si la orientación de construcción varía un máximo de 90 grados.



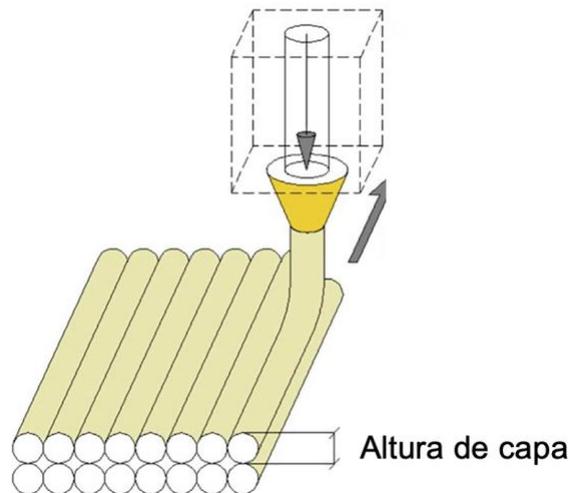
**Figura 3.** Representación gráfica de la orientación de la construcción. [10]

#### 2.2.1.2 Altura o grosor de capa

Se le conoce como la cantidad de material depositado a lo largo del eje vertical de la máquina FDM en una sola pasada. La altura de la deposición del material siempre será menor que el diámetro de la boquilla de la extrusora.

Este parámetro depende del tipo del material y del diámetro del punto de la boquilla.

Estudios experimentales demuestran que la altura de la capa juega un papel inevitable en la flexión y propiedades de impacto del componente fabricado. Consiguiendo un espesor mínimo que da lugar a buenas propiedades al impacto además de reducir la rugosidad de la superficie final de la pieza.

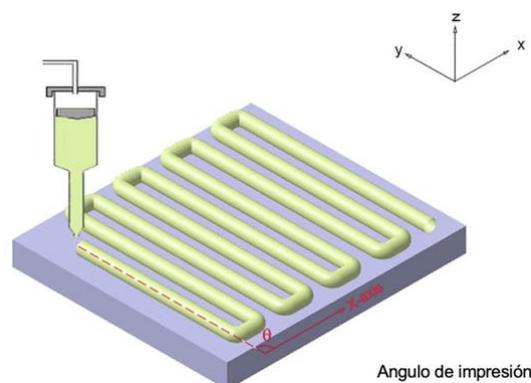


**Figura 4.** Representación esquemática de la altura de capa. [10]

### 2.2.1.3 Ángulo de impresión

Indica la dirección de deposición del material a lo largo del área de construcción en el eje x en la máquina FDM. En general, el ángulo puede variar de 0 a 90 grados.

También es un parámetro importante en la influencia de las propiedades mecánicas.



**Figura 5.** Ilustración gráfica del ángulo de impresión. [10]

### 2.2.1.4 Velocidad de impresión

Es la velocidad de desplazamiento de la boquilla de construcción mientras se deposita material en la plataforma de construcción a lo largo del plano de XY. El tiempo de impresión del componente depende directamente de la velocidad de impresión. La velocidad de

impresión también tiene un impacto dominante sobre la deformación del componente de construcción. Esto es porque la cantidad significativa de tensión residual que se produce durante la deposición de material como resultado de una extrusión más rápida del proceso.

Sin embargo, el efecto de la velocidad de impresión se considera insignificante al imprimir capas más delgadas.

#### *2.2.1.5 Aire entre capas*

Es el intervalo entre las capas impresas contiguas, este valor puede ser positivo, negativo o cero. En espacios de aire positivos da lugar a una estructura poco compacta donde la construcción rápida del componente dado es esencial. Se utiliza un espacio de aire negativo cuando necesitamos una estructura más densa y cuando el tiempo no es una limitación.

#### *2.2.1.6 Temperatura de extrusión*

Es la temperatura que se mantiene dentro de la boquilla de calentamiento antes de que el material se extruya y deposite.

Este valor afecta a la viscosidad del material utilizado para imprimir, afectando así mismo a las características de la pieza. Es conveniente mantener siempre una temperatura óptima ya que puede aumentar o disminuir la fluidez del material del filamento que a su vez podría afectar el componente.

#### *2.2.1.7 Diámetro de la boquilla*

Es el diámetro de la punta de la boquilla extrusora. El diámetro de la boquilla también tiene un gran efecto en el tiempo de extrusión. A mayor diámetro de boquilla, menor es el tiempo necesario para completar la extrusión. También está comprobado que el diámetro de la boquilla tiene un gran efecto sobre el error geométrico.

También hay más parámetros como es el patrón de relleno, la densidad de relleno, el ancho de trama y el ancho de contorno, pero este trabajo se centra en definir los parámetros que estén directamente relacionados con el tiempo de impresión, ya éste será un factor significativo a la hora de calcular el consumo energético de una misma pieza con diferentes materiales.

Para ello se plantearán diferentes escenarios manteniendo el ancho de capa constante, en este caso 20 micras, ya que será la opción más óptima para obtener la menor rugosidad posible. Partiendo de este dato se proponen dos orientaciones de impresión para cada material, dentro de esto diferentes velocidades de impresión para concluir la opción óptima.

### 2.2.2 Materiales y aplicaciones de la tecnología FDM

La impresión 3D por deposición fundida es compatible con una amplia variedad de biopolímeros termoplásticos como el PLA y ABS, y también de policarbonato como, PET, PS, ASA, PVA, nylon, ULTEM y muchos filamentos compuestos que estén basados en metal, piedra y madera. Esto ofrece interesantes propiedades mecánicas tales como conductividad, biocompatibilidad, resistencia a temperaturas o condiciones extremas.

El material empleado es un filamento enrollado en una bobina y según la impresora puede ser de un diámetro u otro, los más comunes son de 3 mm, 2,85 mm y 1,75 mm. Por este motivo se dice que las impresoras 3D se basan en el método FFF (Fabricación por Filamento Fundido) donde el filamento es calentado por el extrusor y a través de la boquilla es depositado capa a capa en una plataforma que alcanza la temperatura adecuada según el material hasta formar la pieza final.



**Figura 6.** Bobina de filamento para las impresoras 3D de Dynamical Materials

El **PLA** o ácido poliláctico  $(C_3H_4O_2)_n$  es uno de los materiales que ofrece mayor facilidad de impresión es por eso que es uno de los materiales más usados para la impresión 3D ideal para aplicaciones relacionadas con la estabilidad dimensional, ya apenas genera contracciones superficiales y capas. Su condición biodegradable debido a su origen natural basado en maíz, trigo, patata o caña de azúcar facilita su descomposición en moléculas simples al entrar en contacto con el agua u óxidos de carbono. [9]

Así mismo, el PLA es resistente al agua, humedad y no es tóxico (“food safe”).

Sus principales aplicaciones son para el prototipado de nuevos diseños con el fin de comprobar geometrías en diseño industrial y desarrollo de productos, en la arquitectura sirve como diseño y fabricación de maquetas de gran resolución para proyectos de arquitectura e interiorismo, y también en elementos que van a estar en contacto con comida o bebida.

En cambio, al carecer de buenas características mecánicas, no es válido para aplicaciones de ingeniería que exijan mucho esfuerzo. [12]



Figura 7. Pieza prototipo impresa con PLA.[13]

El **ABS** o es un polímero compuesto por tres bloques, acrilonitrilo, butadieno y estireno por lo que se le denomina terpolímero. Cada uno de los tres bloques aporta características distintas.

El acrilonitrilo rigidez, resistencia a agentes químicos y a la abrasión, dureza y estabilidad a altas temperaturas. El butadieno le aporta tenacidad a la temperatura cuando ésta es especialmente baja y resistencia a impacto; y el estireno, resistencia mecánica, rigidez, brillo y dureza. Este conjunto de propiedades hace que sea un material ampliamente utilizado en carcasas (vehículos, electrodomésticos, electrónica o juguetes) para todo tipo de productos, gracias a su gran tenacidad ([12], [9]).



**Figura 8.** Pieza de ABS procesada por una impresora FDM.

El **PETG** o  $C_{14}H_{22}$  es un copolímero también empleado en la tecnología FDM, su aparición es debida a la combinación del PET con glicol, mejorando las interesantes propiedades del PET con un proceso de glicolizado.

Este material es duro, transparente, presenta resistencia química sin olor y fácil de imprimir con una gran resistencia al impacto, muy flexible y apenas se contrae. Combina las características del ABS y PLA, también es hidrofóbico, no le afecta el efecto warping y es “food safe”.

El PETG tiene tanto aplicaciones mecánicas en la fabricación de elementos de transmisión como engranajes, o bien en elementos de iluminación como carcasas gracias a su carácter translúcido. Sirve asimismo para la fabricación de envases para alimentos y bebidas, y en el sector de la automoción se emplea para el diseño de piezas y carcasas para toda la estructura del vehículo.



**Figura 9.** Piezas de PETG.[14],[15]

El **PP** o polipropileno ( $C_3H_6$ ) es un polímero termoplástico que se caracteriza por tener una alta resistencia química a los disolventes, y a la abrasión y gran ligereza.

Sus piezas destacan por su resistencia al impacto, resistencia a la fatiga, es por eso que se aplica para la fabricación de bisagras, además tiene una relativa rigidez y flexibilidad, aunque como inconveniente es que tiene una alta sensibilidad a los rayos UV y poca resistencia a altas temperaturas.

Sus aplicaciones principales son en la industria de embalaje, en automoción, y en equipos eléctricos y electrodomésticos por su capacidad de aislante térmico.[16]



**Figura 10.** Botella impresa de PP por Ultimaker. [17]

El **TPU** o poliuretano termoplástico es característico por su resistencia al desgaste y a la abrasión, aunque no soporta altas temperaturas. Se trata de un material con una flexibilidad y durabilidad muy elevadas, capaz de resistir fuerzas de compresión y tracción mucho mayores que sus homólogos más comunes, el PLA y el ABS.

Además, tienen una cohesión de capa bastante avanzada que consigue una homogeneidad mecánica excelente en las piezas fabricadas, haciendo éstas sean isotrópica.[18]

Entre sus múltiples aplicaciones destacan la fabricación de prótesis, plantillas ortopédicas y aplicaciones de contacto con el cuerpo.

Su capacidad de amortiguación hace que sea útil para la reducción de vibraciones como puede ser en las ruedas de vehículos. También sirve para juntas de sellado o bien para carcasas de elementos electrónicos de uso cotidiano.[19]



**Figura 11.** Carcasa de móvil impresa con TPU

Cada uno de estos materiales ha sido escogido porque cada uno de ellos tiene unas características diversas que permitan analizar de forma completa cómo afectan sus características al proceso de impresión.

En el caso del ABS y el PLA son los filamentos más empleados para la impresión 3D debido a su estabilidad y su amplia variedad de aplicaciones de prototipado.

Mientras que el PETG combina las virtudes del PLA y el ABS juntos, es de interés su simulación para conseguir piezas con buenas propiedades mecánicas. Aparte el PETG es el material que tiene mayor punto de fusión respecto al resto de los materiales mencionados por lo cual también se podrá observar su influencia sobre el consumo energético total y por consiguiente su impacto en la huella de carbono. Además, el PETG es de fácil impresión.

El TPU en cambio se caracteriza por su bajo valor del módulo elástico comparado con el resto de los materiales.

Y el PP sobresale sobre el resto de los materiales por su difícil impresión en la tecnología 3D.

Tabla 2. Tabla comparativa de los materiales a estudiar

Material	Dificultad de impresión [20]	Temperatura de fusión (K)	Modulo elástico (MPa) [21]
PLA	Baja	433 <sup>[22]</sup>	3861
ABS	Media	473 <sup>[23]</sup>	2300
TPU	Alta	490 <sup>[21]</sup>	150
PETG	Baja	513 <sup>[24]</sup>	2050
PP	Alta <sup>[25]</sup>	358 <sup>[21]</sup>	

### 2.3 Sostenibilidad en la fabricación aditiva

Una de las cuestiones que más atención está recibiendo en áreas académicas y de investigación son los asuntos de sostenibilidad y energía en la impresión 3D. Estudios recientes indican que los beneficios ecológicos pueden considerarse de manera más crítica, sobre todo en términos de rendimiento energético y si los parámetros de funcionamiento no están bien diseñados el impacto ambiental puede ser significativo.

En relación con los estudios correspondientes a la cuantificación del consumo energético en diferentes procesos de fabricación aditiva se demuestra que los diferentes consumos de energía específicos en los procesos pueden ser de uno o dos órdenes de magnitud superior a los procesos convencionales de corte o fundición.

Los beneficios ecológicos de la fabricación aditiva se pueden garantizar mediante la aplicación de enfoques innovadores de diseño ecológico.

Para evaluar el desempeño sostenible de un proceso es necesario utilizar una serie métricas. Chen [26] propone una lista de indicadores de sostenibilidad para procesos de fabricación aditiva, aunque estos se centran en todas las actividades de fabricación y la empresa de forma integral:

- Índice de sostenibilidad Dow Jones para evaluar la sostenibilidad de la empresa, la mayoría a la parte económica de la sostenibilidad.
- Métricas de GM para la fabricación sostenible desarrolladas para la industria del automóvil.
- Marco de informes GRI desarrollado para evaluar la empresa y la fábrica.

Pero estos índices no se consideran prácticos para evaluar las implicaciones de la sostenibilidad en la fabricación aditiva.

Para abordar este reto, el presente trabajo propone un nuevo marco holístico de diseño ecológico para la fabricación aditiva, en concreto en el modelado por deposición fundida, basado en la evaluación del rendimiento energético (EPA, Energy performance assessment). Comparado con los enfoques existentes que utilizan la evaluación del ciclo de vida (LCA, life cycle assessment) para cuantificar y minimizar el impacto ambiental de la fabricación aditiva en este trabajo se reemplaza LCA por EPA, como un enfoque prometedor para analizar y minimizar el impacto de la huella de carbono en el modelo por deposición fundida.

Al evaluar la sostenibilidad de un proceso de fabricación aditiva y de cualquier proceso de fabricación, se analiza todo el ciclo de vida del producto para concluir con certeza el impacto medioambiental que este genera.

Sin embargo, el impacto ambiental real del proceso de fabricación es solo uno de los muchos impactos asociados con el ciclo de vida del producto. Este trabajo se centra en evaluar el impacto durante el proceso de fabricación.

Aunque todavía no hay datos concretos comparativos de productos de fabricación aditiva frente los de fabricación tradicional en términos de consumo energético, cadena de suministro y sostenibilidad durante todo el ciclo de vida, la eficiencia energética, así como el costo y la disponibilidad energética tienen un efecto fundamental en la competitividad y la salud económica de los fabricantes. [27]

A continuación, se enumeran en la *Tabla 3* una serie de ventajas de la fabricación aditiva que son relevantes para una fabricación sostenible frente a los retos y desventajas:

**Tabla 3.** Ventajas y desventajas de la fabricación aditiva. (tabla adaptada de [28])

Ventajas	Desventajas y retos
<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>La naturaleza de los procesos de AM (fabricación aditiva) es una construcción basado en la superposición de material en diferentes capas y depositando material solo donde sea necesario, esto significa un menor desperdicio de material o mayor eficiencia de material en comparación con la</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo y velocidad de producción</li> <li>• Los sistemas de AM actuales siguen estando lejos de estar automatizados y necesitan llegar a serlo si se van a integrar más en sistemas de fabricación y realizar mejoras en la eficiencia de los recursos.</li> <li>• Eliminar la percepción de que la fabricación aditiva es solo para la</li> </ul>



<p><b>producción en masa procesos de mecanizado y fundición</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Los procesos de AM no requieren herramientas o accesorios especializados, eliminando así los procesos de fabricación de estos y la necesidad de eliminación al final de su ciclo de vida.</b></li><li>• <b>Los procesos de impresión 3D son capaces de construir piezas funcionalmente ligeras de geometrías optimizadas con relaciones fuerza-peso optimas que tienen un significativo impacto de la sostenibilidad durante su ciclo de vida (por ejemplo, peso reducido de componentes aeroespaciales específicos que reducen la necesidad de energía para moverse ellos alrededor).</b></li><li>• <b>Otra de las ventajas es que reduce la necesidad de almacenar grandes cantidades de materia prima dentro de la cadena de suministro y transporte ya que solo se utiliza materia prima solo cuando es necesario porque la producción puede ser sincronizada fácilmente con la demanda del cliente.</b></li></ul>	<p>producción rápida de prototipos y no para la fabricación directa de componentes y productos</p> <ul style="list-style-type: none"><li>• Desarrollo y estandarización de nuevos materiales</li><li>• Validación de las propiedades mecánicas y térmicas de los materiales ya existentes</li><li>• Normalmente es requerido el proceso de acabado debido al efecto de escalonamiento que surge gradualmente al colocar capa por capa produciendo un acabado superficial rugoso</li><li>• Los materiales de soporte no se pueden reciclar</li></ul>
---	---

A pesar del posible aumento de la tasa de reciclaje, los materiales empleados en los procesos de impresión 3D no son necesariamente mas ecológicos que los materiales utilizados en procesos fabricación tradicionales.

La única excepción puede ser el PLA nombrado anteriormente, pero hay que tener en cuenta la toxicidad relativa del material utilizado y su influencia en la alternación de las propiedades mecánicas.[29]

La aplicación de técnicas de fabricación híbridas podría ser una solución a los problemas de acabado superficial. Estos procesos de fabricación híbridos ofrecen una serie de ventajas, como un acabado mejorado de calidad, menor tiempo de producción y menor desgaste de la herramienta. La integración de la fabricación aditiva junto con procesos de manufactura tradicionales y su unión pueden dar lugar a la transformación de procesos de técnicas de fabricación híbridas que combinen las virtudes de ambos procesos.[28]

La fabricación aditiva es un enfoque prometedor para construir formas complejas, piezas personalizadas o pequeños lotes de productos, pero todavía es una tecnología que necesita madurar para llegar a una producción en masa. Los aspectos de sostenibilidad de la fabricación aditiva pueden ofrecer nuevas ventajas para que la industria se adapte a esta tecnología, pero hoy en día hace falta una medición exhaustiva para conocer realmente la sostenibilidad de la impresión 3D. En consecuencia, este trabajo presenta la caracterización e influencia de factores para un tipo de fabricación aditiva. [27]

#### 2.4 Economía circular en procesos de fabricación aditiva

La impresión 3D posee una mayor eficiencia de material, pero la sostenibilidad del material es una cuestión que no debe ser omitida debido a la amplia adopción de la impresión 3D como proceso de fabricación. El modelo de economía circular o circuito cerrado es un enfoque prometedor para abordar este reto ya que hay un limitado número de materiales para la impresión 3D y solo unos pocos son comercialmente viables, así mismo la producción global de estos materiales como el PLA aún es limitada, aunque en la última década haya aumentado su producción.

Además, el reciclaje de plástico es una práctica común para mitigar problemas medioambientales y el reciclaje de alta calidad supone un modelo de economía circular más sostenible que otras alternativas como los vertederos. [29]

Con un modelo de economía circular se busca prolongar la vida de los productos que posteriormente reduce la demanda de material nuevo y disminuye el impacto medioambiental de producción. Además, reutilizar o incluso restaurar las piezas antes de reciclarlas puede incluso reducir aún más la demanda de energía y el impacto ambiental pero actualmente hay poca literatura que investiga este tema de reciclaje de ciclo cerrado de materiales de impresión 3D y la investigación existente se centra en examinar los cambios en las propiedades mecánicas asociadas con ciclos repetidos de impresión ([30];[31]), en ella se estudia el rendimiento mecánico del PLA durante procesos de impresión 3D repetidos

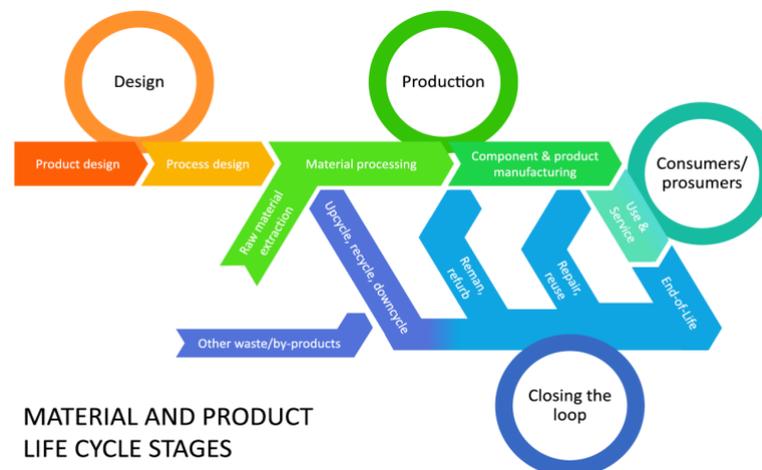
y determinó la presencia de deterioros significativos en la mayoría de las propiedades mecánicas después de cinco ciclos de reciclaje.

Pese a que el rendimiento mecánico es crucial en las aplicaciones de impresión 3D, también hay otras propiedades que deberían considerarse durante el reciclaje.

Por ejemplo, la viscosidad es particularmente característica importante para el modelado de deposición fundida (FDM), el proceso de impresión 3D más común y frecuentemente estudiado. Las impresoras FDM solo pueden adoptar materiales que tengan viscosidad en un limitado rango, ya que la viscosidad debe ser lo suficientemente alta como para proporcionar estructural soporte y lo suficientemente baja como para permitir la extrusión.[32]

El impacto ambiental de la eliminación de residuos impresos en 3D es escaso o incluso inexistente, así como los estudios sobre reciclaje de materiales de impresión 3D que también son extremadamente limitados.

La *Figura 12* muestra un diagrama esquemático del ciclo de vida de una pieza procesada por impresión 3D que se adapta a un modelo de economía circular basado en el reciclaje del material del producto al final de su ciclo de vida.



**Figura 12.** Perspectiva del ciclo de vida para identificar los beneficios de sostenibilidad de la fabricación aditiva. [28].

## 2.5 Rendimiento energético

Los procesos de fabricación en general se definen como los procesos que transforman materiales e información en bienes para la satisfacción de las necesidades humanas. Sin embargo, convertir las materias primas en productos de consumo es también una fuente

importante de contaminación. Esta contaminación ambiental puede ser el resultado directo del proceso de fabricación, o indirectamente a través del uso de energía para ejecutar estos procesos o bien de la obtención de materias primas.

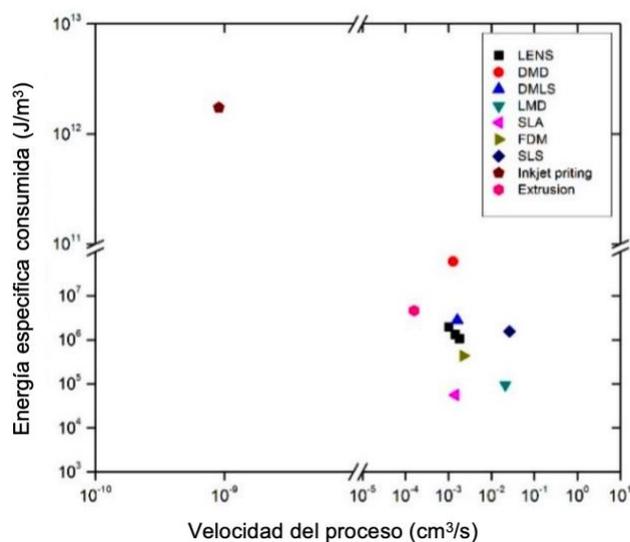
Las operaciones industriales en Europa suponen alrededor de un 32% del total de la energía consumida y además el uso de esta es responsable de las emisiones significativas de CO<sub>2</sub>.

Algo esencial para evaluar tanto el rendimiento del proceso de fabricación aditiva como la máquina de impresión es definir la eficiencia energética.

La energía consumida en los procesos de impresión FDM suele ser energía eléctrica generada por la electricidad necesaria para la impresora donde el material se calienta capa por capa mediante energía térmica hasta completar la fabricación con ayuda de un sistema del movimiento servocontrolado de la boquilla que deposita el material.

La energía específica consumida o SEC (specific energy consumption) es un parámetro apropiado para confrontar diferentes tipos de tecnología de fabricación aditiva y se define como la energía consumida por unidad de volumen de material depositado. La fórmula para calcular SEC se detalla en capítulo 3.

En la siguiente figura se puede ver una comparativa gráfica del SEC de diferentes tipos de fabricación aditiva observando que la tecnología FDM es uno de los procesos con mayor eficiencia energética.



**Figura 13.** Diagrama de SEC en procesos de impresión 3D.[4]

Aparte del consumo energético durante el tiempo de impresión también hay que tener en cuenta el proceso de post-procesado, ya que en el modelo por deposición fundida normalmente requiere de un proceso de acabado anteriormente nombrado en la tabla *Tabla 3*.

Mognol y sus colaboradores (2006) informaron que el consumo de energía para la extracción ultrasónica de estructuras de soporte FDM en un recipiente de agua caliente (70 ° C) equivale a 500 vatios (W). Para un periodo de inmersión de 8 horas, la energía de limpieza será de 14,4 MJ.

Balogun (2015) midió la energía eléctrica demandada de una máquina de limpieza ultrasónica de precisión utilizada para lavar, limpiar y quitar todos los materiales de soporte y el resultado fue que el post-tratamiento duró 1 hora y tuvo un nivel de potencia promedio de aproximadamente 250 W.[27]

En el capítulo 3 se plantea el modelo para cuantificar el consumo energético de la impresión de la probeta en la impresora Ultimaker 5S contemplado la energía del proceso de acabado según las investigaciones anteriormente nombradas, asumiendo que el tiempo de post-tratamiento es de 1 hora.

## 2.6 Especificaciones de la impresora Ultimaker 5S

Para el cálculo del consumo energético y la huella de carbono se va a simular la impresión de una probeta normalizada en la impresora Ultimaker 5S, fabricada por la empresa Ultimaker.[33]

Esta impresora ofrece un gran volumen de impresión de piezas precisas con calidad industrial. Su configuración es sencilla y posee dos cabezas de extrusión, aunque en el caso de la simulación se trabajará con solo uno.

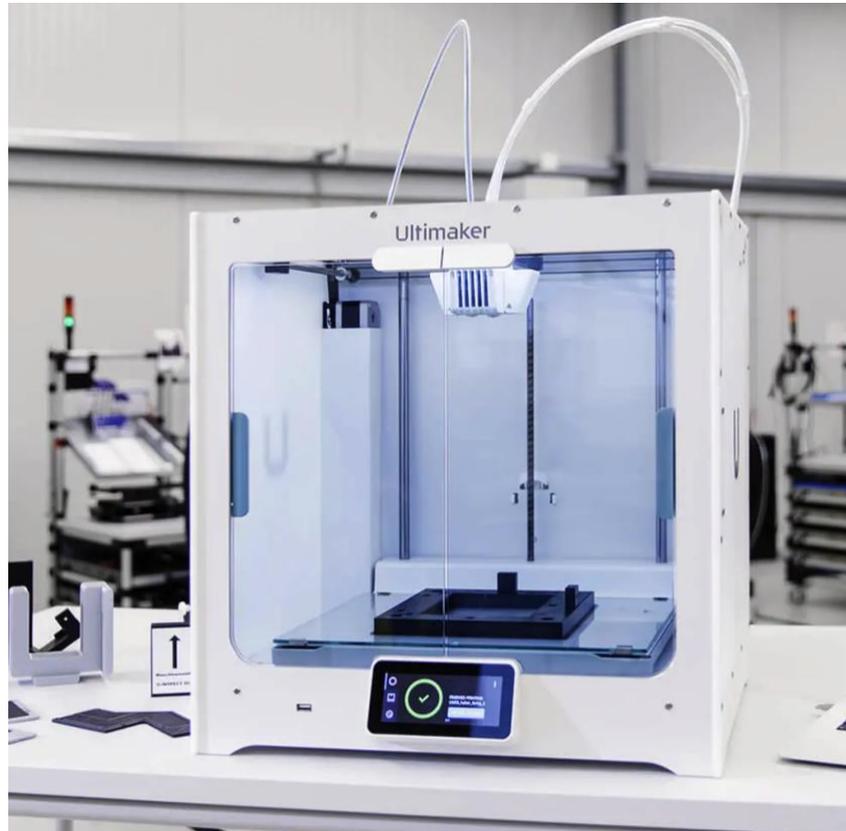


Figura 14. Ultimaker 5S.

Tabla 4. Tabla de propiedades de la impresora y su funcionamiento [33]

<b>Volumen de impresión</b> <b>Espacio físico para dentro de la cámara de impresión</b>	<b>330x240x300 mm</b>
<b>Tecnología de impresión</b>	FDM
<b>Peso</b>	20,6 kg
<b>Potencia nominal</b>	500W
<b>Resolución de capa</b>	0.25 mm boquilla: 150 - 60 um 0.4 mm boquilla: 200 - 20 um 0.6 mm boquilla: 300 - 20 um 0.8 mm boquilla: 600 - 20 um
<b>Velocidad de impresión</b>	Menor que 24 mm <sup>3</sup> /s
<b>Temperatura de boquilla</b>	180°C-280°C
<b>Placa de impresión</b>	20°C-14°C

<b>Temperatura ambiente de funcionamiento</b>	15°C-32°C
<b>Tiempo de calentamiento de la boquilla</b>	Menor que 2 min

## 2.7 Software de impresión (CURA)

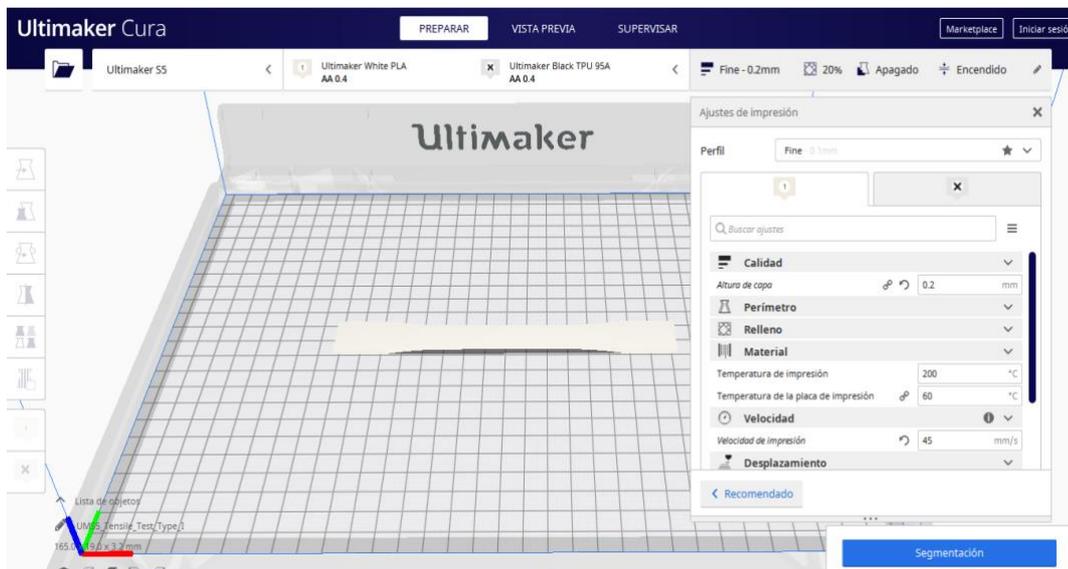
Cura es el software de impresión 3D con el que se realizará la simulación de la probeta, cuyas dimensiones serán detalladas en el siguiente punto.

Desde su menú se puede acceder a un amplio abanico de opciones ya que el software es compatible con varias impresoras del mercado.

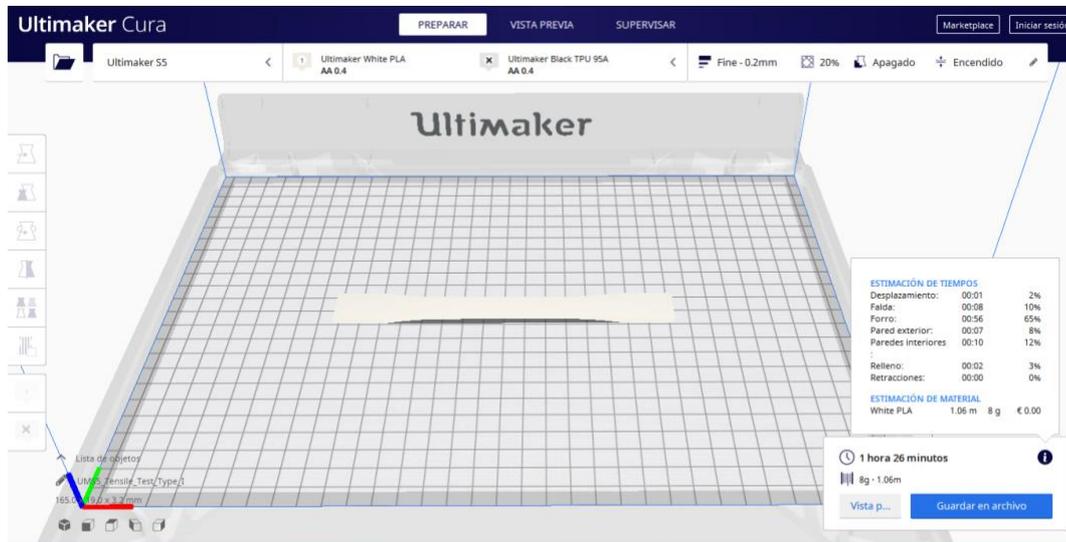
Una vez configurado la impresora Ultimaker 5S, ofrece diferentes parámetros de laminación, sin antes haber escogido el material a imprimir, como puede ser las dimensiones de la pieza a imprimir y la orientación de impresión.

Más tarde se podrán elegir los parámetros de velocidad de impresión y de altura de capa, dentro de los rangos determinados por las especificaciones de funcionamiento de la impresora y la orientación de la pieza final.

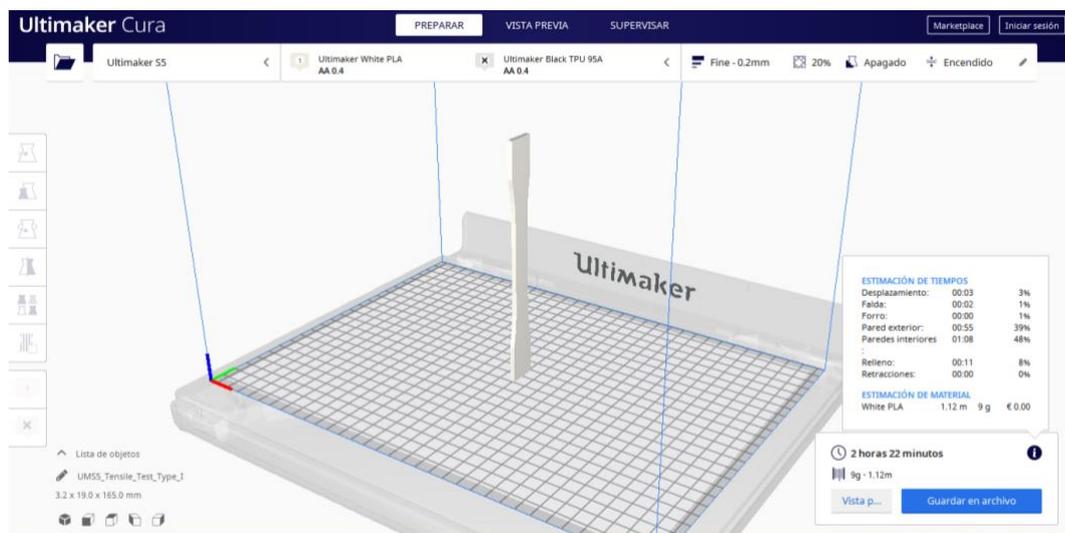
Se han seleccionado estos parámetros porque se quiere estudiar su influencia en el consumo energético final para la impresión de la probeta y asociarlo más tarde al valor de la huella de carbono.



**Figura 15.** Panel de ajuste de parámetros para Cura



**Figura 16.** Probeta impresa por el simulador Cura con el tiempo de impresión y masa de material con orientación X.



**Figura 17.** Probeta impresa por el simulador Cura con el tiempo de impresión y masa de material con orientación Z.

## 2.8 Dimensiones de la probeta según ASTM D638

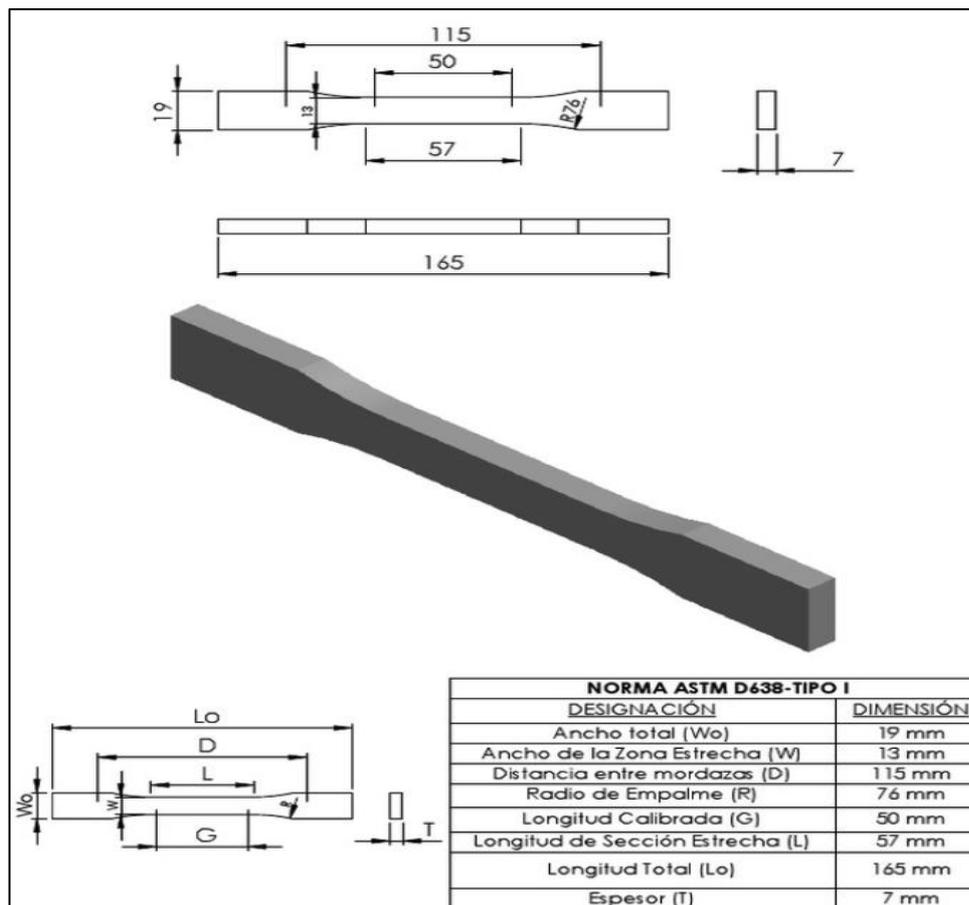
La prueba de tracción de plástico según ASTM D638 es un método de ensayo ampliamente utilizado que consiste en medir la fuerza requerida para tirar de una muestra de prueba hasta su punto de ruptura.

Los datos que aporta esta prueba permiten realizar diseños de productos o realizar pruebas de calidad para predecir con precisión el rendimiento de las piezas en aplicaciones hasta su uso final. Esta información es fundamental para desarrollar nuevos productos, garantizar el cumplimiento de los estándares de la industria o del gobierno, mejorar la fabricación y reducir los costos de producción.

Además, los datos de prueba de tracción resultantes revelan propiedades esenciales del material, como la resistencia a la tracción máxima, el límite elástico, alargamiento y reducción de área. Esta información también permite conocer valores del módulo de Young y de Poisson. [34][35].

Aunque no existe ninguna normativa acerca de los ensayos a tracción de probetas fabricadas con tecnología de fabricación aditiva, se elige el diseño de tipología 1 siguiendo la normativa ASTM D638.

En la Figura 18 se detallan las dimensiones de la probeta, que servirán para calcular su volumen.



**Figura 18.** Dimensiones y medidas de la probeta tipo 1.

Este tipo de probetas serán simuladas en el software Cura con diferentes materiales para calcular el tiempo de impresión que requiere cada material variando la velocidad de impresión. Para ello será necesario calcular el volumen de la probeta con la siguiente ecuación:



$$\begin{aligned} V_{total} &= V_{probeta\ entera} - V_{sin\ material} \\ &= \left[ (19 * 165) - \left[ ((57 * 3) * 2) + \left( \frac{\pi * R^2 * n}{360} - \frac{m * h}{2} \right) * 2 \right] \right] * 7 \quad (1) \\ &= \mathbf{9042mm^3} \end{aligned}$$

Siendo  $R = 76mm$ ,  $m = 42,28mm$ ,  $h = 3mm$  y  $n = 16,15^\circ$



## CAPITULO 3: METODOLOGÍA DE CÁLCULO

### 3.1 Cálculo del consumo energético

El consumo energético es un buen indicador para evaluar la sostenibilidad ambiental en un proceso de fabricación aditiva, y en este caso la impresión por FDM.

El rápido desarrollo de esta tecnología y sus aplicaciones genera una inquietud sobre su consumo energético tanto del proceso de fabricación como de los materiales implicados.

Por tanto, este trabajo propone una fórmula adaptada basada en las hipótesis de diferentes investigaciones por los autores Jinghua Xu [3], Li Yi [1] y Zhichao Liu [4] en cuyos artículos presentan métodos de optimización energética para una impresión 3D ecológica. La finalidad es comparar y cuantificar el impacto ambiental del proceso de impresión FDM a partir de diferentes materiales y diferentes parámetros de entrada para conseguir la máxima optimización energética.

Por un lado, Jinghua Xu [3] plantea el modelo de consumo energético partiendo de diferentes materiales de impresión. La fórmula detallada para este modelo se descompone en tres principales subsistemas: la energía térmica, la mecánica y la auxiliar.

$$E_{total} = E_{térmica} + E_{movimiento} + E_{aux} \quad (2)$$

Donde la  $E_{térmica}$  es la energía para fundir el material termoplástico que se encuentra en la forma de filamento. Este material se calienta más allá de la temperatura de fusión en la extrusora calentada y se extruye a través de un pequeño orificio hasta ser depositado.

La energía referida al movimiento  $E_{movimiento}$  también puede considerarse como la energía asociada al motor que permite el movimiento de la boquilla para la deposición del material.

Finalmente, la energía auxiliar  $E_{aux}$  hace referencia a la suma de las energías de precalentamiento, enfriamiento e iluminación, como se detalla en la siguiente ecuación:

$$E_{aux} = E_{precalentamiento} + E_{enfriamiento} + E_{iluminacion} \quad (3)$$

La energía de precalentamiento y enfriamiento dependerán de la energía requerida de cada material. En este caso, según las especificaciones en la **Tabla 4** de la impresora Ultimaker 5S el tiempo de precalentamiento es menor que 2 minutos, de modo que se asume que la  $E_{precalentamiento}$  es despreciable frente a la energía total consumida por el poco tiempo que conlleva respecto al tiempo total de impresión.

Lo mismo ocurre con la  $E_{iluminacion}$  puesto que la universidad tiene una impresora similar a la Ultimaker 5S y se ha observado que hay una iluminación por led cuando se enciende la impresora pero que se apaga cuando termina el tiempo de precalentamiento. Entonces su valor también será prácticamente despreciable o muy pequeño.

En cambio, para la  $E_{enfriamiento}$  es la encargada de solidificar el material depositado durante todo el tiempo de impresión, así que en este caso se asume que esta energía supone un porcentaje sobre la energía total consumida.

De acuerdo, con el estudio publicado en el artículo “Optimization of process planning for reducing material waste in extrusion based additive manufacturing” [36], la potencia de enfriamiento supone un 15% de la potencia total consumida.

La energía térmica de la ecuación (2) viene definida de acuerdo al principio de la conservación de energía, esta energía es la energía consumida para conseguir fundir el material (kJ):

$$E_{termica} = c * m(T_m - T_a) + m * X \quad (4)$$

Donde la  $c$  se define como la capacidad calorífica específica del material  $\left(\frac{KJ}{Kg * K}\right)$ , la  $m$  es la masa del material extruido (Kg),  $T_m$  es el punto de fusión de dicho material, y  $T_a$  es la temperatura ambiente (K). El segundo termino de la ecuación aparece  $X$ , que es el calor latente del material para el cambio de fase  $\left(\frac{KJ}{Kg}\right)$ .

Un valor a tener en cuenta durante el proceso de impresión es la temperatura que alcanza la boquilla ya que su influencia es importante en el momento de la formación de la pieza y su valor debería estar siempre en un rango óptimo para asegurar que el material extruido se encuentra en un estado plástico fluido.

Siguiendo con la ecuación (2) la energía de movimiento es la energía servo del sistema del movimiento mecánico trasladado a la boquilla y su ecuación matemática es la siguiente

$$E_{movimiento} = \frac{E_{Motor}}{\eta} = \frac{\int P_{motor} * dt}{\eta} \quad (5)$$

La potencia del motor es la potencia nominal (KW), y  $dt$  es el tiempo de impresión, todo esto dividido entre el rendimiento del motor teniendo en cuenta la fricción dará lugar a la energía de movimiento.

Sin embargo, para el modelo propuesto en el trabajo se asume que la potencia del motor es la potencia total consumida por la impresora, teniendo en cuenta la potencia inactiva, es decir, cuando la impresora está apagada y el tiempo de impresión, y se puede expresar con la siguiente ecuación que plantea Zhichao Liu en el artículo “Investigation of Energy Requirements and Performance for Additive Manufacturing Processes” [4] publicado en el revista Sustainability:

$$P = P_{parada} + kv \quad (6)$$

Donde  $P$  es la potencia total consumida en  $kW$ ,  $P_{parada}$  sería potencia consumida cuando la impresora está inactiva también expresada en  $kW$  y puede suponer hasta un 20,81% del total.

El término  $v$  representa la velocidad de deposición del material y  $k$  es una constante también definida como SEC, siendo el consumo de energía específica expresado en  $\frac{J}{cm^3}$  y  $v$  es la velocidad volumétrica de impresión.

El consumo de energía específica o SEC con unidades de  $\frac{J}{cm^3}$  (specific energy consumption) permite calcular la energía promedio por el volumen unitario de pieza durante el proceso de construcción de la pieza de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$SEC = \frac{Pt}{V} = \frac{UIt}{V} \quad (7)$$

Cuyas variables son  $P$  ( $KW$ ), que se refiere a la potencia consumida por el motor para el movimiento de la boquilla,  $t$  ( $s$ ) como el tiempo de impresión y  $V$  ( $m^3$ ) que representa el volumen de material consumido.

Por último, la ecuación final propuesta para calcular el consumo energético de proceso de impresión es:

$$E_{total} = E_{térmica} + E_{movimiento} + E_{aux};$$

$$E_{total} = c * m(T_m - T_a) + m * X + P_{parada} * t + \frac{P * t}{V} * v * t \quad (8)$$

$$+ E_{precalentamiento} + E_{enfriamiento}$$

Las unidades de la ecuación quedarían de la siguiente manera:



$$\begin{aligned} E_{total}[KJ] = & c \left[ \frac{KJ}{Kg * K} \right] * m[kg](T_m[k] - T_a[k]) + m[Kg] * X \left[ \frac{KJ}{Kg} \right] \\ & + P_{parada}[KW] * t[s] + \frac{P[KW] * t[s]}{V[m^3]} * v \left[ \frac{m^3}{s} \right] * t[s] \\ & + E_{precalentamiento}[KJ] + E_{enfriamiento}[KJ] \end{aligned} \quad (9)$$

Una vez obtenida la energía requerida por la impresora se puede obtener el consumo de energía primaria mediante un método adaptado por el autor Li Yi en el artículo "An eco-design for additive manufacturing framework based on Energy performance assessment" [1] publicado en la revista Additive Manufacturing.

La energía primaria es la energía disponible en la naturaleza en forma de combustible fósiles y otros tipos de energía. Estos combustibles son fuentes de energía secundaria como la electricidad al ser tratados y transformados. Este proceso supone un gran impacto ambiental y por eso el consumo energético está muy ligado al impacto de la huella de carbono.

Es este motivo el trabajo propone un cálculo final de la energía primaria consumida en el proceso de FDM desde la obtención de las materias primas hasta la fase de impresión.

La fórmula planteada por Li Yi para calcular la energía primaria total es:

$$PE_{total FDM} = PE_{material} + PE_{FDM} + PE_{acabado} \quad (10)$$

La energía primaria para la producción del material como materia prima es  $PE_{material}$ ,

La energía primaria que requiere el proceso de impresión es  $PE_{FDM}$ , al igual que el proceso de acabado que también precisa de energía primaria.

Estos tres términos se pueden descomponer teniendo en cuenta dos constantes de dependiendo de cada material, ya que  $PE_{material}$  puede expresarse como el producto de la masa del material a imprimir por una constante ( $\alpha_{material}$ ) que representa la energía primaria específica para producir 1 Kg de dicho material más producto de la electricidad consumida durante el proceso de impresión y el proceso de acabado multiplicado por una constante ( $\alpha_{electrica}$ ) que expresa la energía primaria específica para crear 1 Julio de electricidad disponible:

$$\begin{aligned} PE_{total FDM}[kJ] = & \alpha_{material}[KJ/Kg] * m_{material}[Kg] + \alpha_{electrica}[KJ/KJ] \\ & * (E_{FDM} + E_{acabado})[KJ] \end{aligned} \quad (11)$$

En este caso  $\alpha_{material}$  y  $\alpha_{electrica}$  se obtienen de la fuente [37]

El término  $E_{FDM}$  de la ecuación (11) será la energía total consumida calculada en la ecuación (8).

Por tanto, la hipótesis planteada finalmente quedaría de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
 PE_{total\ FDM}[kJ] = & \alpha_{material}[KJ/Kg] * m_{material}[Kg] \\
 & + \alpha_{electrica}[KJ \\
 & /KJ] \left\{ c \left[ \frac{KJ}{Kg * K} \right] * m[kg](T_m[k] - T_a[k]) + m[Kg] \right. \\
 & * X \left[ \frac{KJ}{Kg} \right] + P_{parada}[KW] * t[s] + \frac{P[KW] * t[s]}{V[m^3]} * v \left[ \frac{m^3}{s} \right] \\
 & * t[s] + E_{precalentamiento}[KJ] + E_{enfriamiento}[KJ] \\
 & \left. + (E_{acabado}) \right\} [KJ]
 \end{aligned} \tag{12}$$

En la siguiente tabla quedan reflejadas las diferentes constantes los materiales implicados en la ecuación con sus correspondientes referencias:

**Tabla 5.** Constantes de los materiales con sus respectivas referencias.

	$\alpha_{material} \left( \frac{KJ}{Kg} \right)$ [37]	$\alpha_{electrica} \left( \frac{KJ}{KJ} \right)$ [37]	Calor específico (K)	Temperatura de fusión (K)	Calor latente $\left( \frac{KJ}{Kg} \right)$
<b>PLA</b>	68,6	2,78	1,8[22]	433[22]	29,1[38]
<b>ABS</b>	43	2,78	1,2[39]	473[23]	207[40]
<b>TPU</b>	92,2	2,78	1,23[41]	490[21]	46,11[42]
<b>PETG</b>	629	2,78	1,2[43]	513[24]	9,4[44]
<b>PP</b>	91,20	2,78	1,8[45]	358[21]	165[46]

De este modo, quedaría definido el consumo energético total y la energía primaria transformada en el proceso. Sin embargo, hoy en día parece más interesante representarlo como huella de carbono, ya que cada vez se contempla más la emisión de ésta a lo largo de ciclo de vida de un producto, y así podría ser comparada e incluso añadida a otros cálculos que se realizasen en futuros estudios. Así se estaría definiendo un KPI (indicador clave de rendimiento) capaz de mostrar la huella de carbono que se emite durante del proceso de impresión. Por este motivo, la representación final de este KPI viene definida por la ecuación que se plantea en el siguiente apartado [47].

### 3.2 Cálculo de la huella de carbono

La huella de carbono es un término que se emplea como indicador ambiental para reflejar los gases de efecto invernadero emitidos por un individuo o empresa.

Actualmente, es una de las herramientas más comunes para el desarrollo de la Gestión Medioambiental de las empresas como parte de una política general dirigida a la reducción de la emisión de CO<sub>2</sub>. Su impacto se controla a través de unas mediciones en las emisiones durante todo el ciclo de vida. Las normativas internacionales como ISO 12064, ISO 14069, ISO 14067, PAS 2050 o GHG Protocolo entre otras, que recogen este tipo de puntos. [48]

La huella de carbono se expresa en unidades de carbono equivalente (CO<sub>2</sub>eq) o kilogramos de CO<sub>2</sub> equivalentes y evalúa la cantidad de total de dióxido de carbono y otros Gases de Efecto Invernadero que contribuyen al calentamiento global asociados a un producto o servicio.

Del mismo modo que en el cálculo del consumo energético se determinará la emisión de gases de efecto invernadero o Kg equivalentes de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>eq) basado en la hipótesis planteada Li Yi para demostrar el impacto ambiental que supone el proceso de fabricación aditiva, que a su vez este se basa en el artículo publicado por R Huang [49]:

$$\begin{aligned}
 C_{total\ FDM} &= C_{material} + C_{FDM} + C_{acabado} & (13) \\
 &= \beta_{material} * m_{material} + \beta_{electrica} * (E_{FDM} + E_{acabado})
 \end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que  $\beta_{material} \left(\frac{Kg}{Kg}\right)$  representa los Kg de CO<sub>2</sub> emitidos para producir 1 Kg de dicho material y  $\beta_{electrica} \left(\frac{Kg}{Kg}\right) = 0,17$  indica Kg de CO<sub>2</sub> específicos para producir 1J de electricidad disponible.



**Tabla 6.** Tabla con las constantes de los materiales. [37]

	$\beta_{material} \left( \frac{Kg}{Kg} \right)$
<b>PLA</b>	3,19
<b>ABS</b>	3,76
<b>TPU</b>	4,38
<b>PETG</b>	3,2
<b>PP</b>	2,88

El valor de  $E_{FDM}$  en la ecuación será el valor que haya dado como resultado en la ecuación (9).

Y el termino de  $E_{acabado}$  se asume como un porcentaje del consumo energético total, basado en la hipótesis que se plantea en el apartado Rendimiento energético donde dice que el consumo energético de post-procesamiento es aproximadamente 250W con una duración de 1 hora.

La cantidad de Kg equivalentes de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>eq) para cada situación permitirá caracterizar los diferentes parámetros de impresión sobre cada material dando lugar pudiendo escoger la situación mas optimas en términos de sostenibilidad.

## Capítulo 4: Análisis de resultados

### 4.1 Casos de estudio

Se han planteado diferentes casos de estudio de cada material para el cálculo de su consumo energético total, consumo de energía primaria total y huella de carbono.

Para ello, se ha simulado la impresión de la probeta con los materiales PLA, ABS, TPU, PETG y PP con el software cura teniendo en cuenta diferentes parámetros de impresión según las especificaciones de la impresora (*Tabla 4*) y del propio material.

Los pasos para seguir será escoger las variables que se puede modificar con Cura.

En primer lugar, la selección de los rangos de velocidad de impresión de cada material, ya que cada uno de ellos requiere unas velocidades de impresión determinadas.

La velocidad de impresión será una de las variables de entrada en el software Cura y también utilizará para poder comparar el consumo energético de cada probeta impresa por una uno de los materiales, eligiendo a ser posible valores similares para cada material.

**Tabla 7.** Velocidad de impresión para cada material

Material	Rango de velocidad de impresión
<b>PLA</b>	30-90 mm/s
<b>ABS</b>	30-90 mm/s
<b>TPU</b>	30-50 mm/s
<b>PETG</b>	60-100 mm/s
<b>PP</b>	< 45 mm/s

Se aprecia que el PLA y el ABS tienen el mismo rango de velocidad de impresión, por tanto, su comparativa será exacta a la hora de evaluar la influencia de este parámetro de impresión sobre el consumo energético y su huella de carbono.

En cambio, el TPU tiene un rango inferior a los anteriores materiales, de tal manera que los valores a estudio serán la velocidad mínima de impresión (30 mm/s) y su máxima permitida ya que este valor entra dentro del rango de impresión del PLA y ABS.

El PETG tiene una velocidad de impresión mayor a los anteriores materiales y sale del rango de impresión del TPU y PP por lo que las velocidades seleccionadas para el caso de estudio de este material para que sean lo más favorables posibles serán 60mm/s y 90 mm/s.

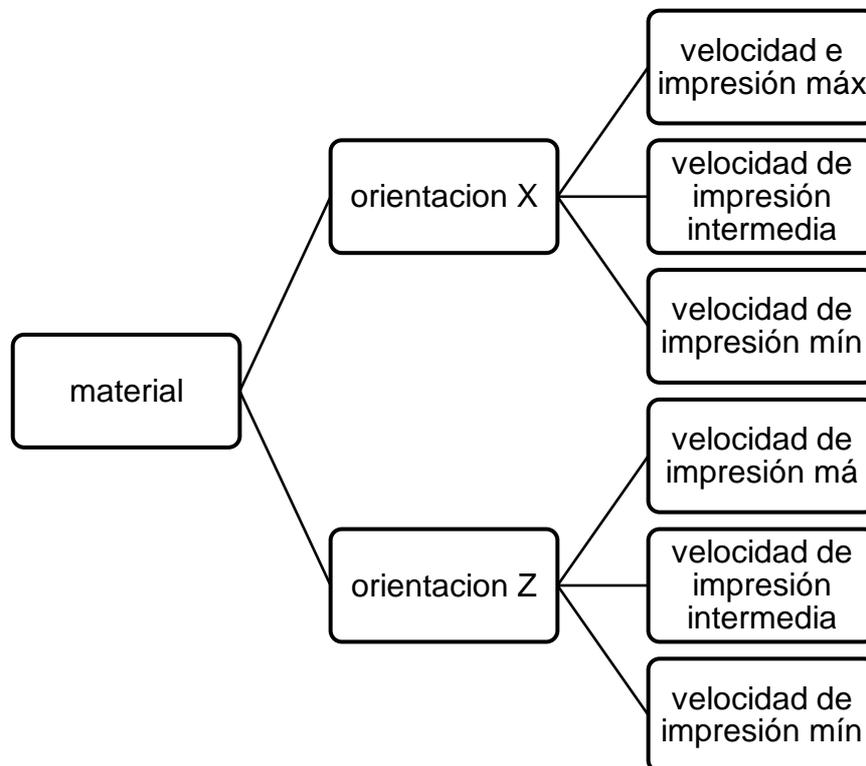
Y por último el PP que ofrece velocidades de impresión menores a 45 mm/s, en este caso se elegirán los valores de 30 mm/s ya que es la mínima velocidad de impresión admitida por el PLA, ABS y TPU, y su máximo valor posible que son 45 mm/s.

Una vez elegidos los valores de la velocidad de impresión para cada material como valores independientes se escogen dos opciones de orientación de impresión porque es uno de los parámetros fundamentales de impresión que determinan las propiedades mecánicas que va a obtener la pieza. Entonces, se plantean dos opciones de estudio, en la orientación X y la orientación Z.

La altura o grosor de capa se mantendrá constante (0,2 mm) para todas las simulaciones teniendo en cuenta que la impresora ofrece distinto espesor de capa dependiendo del diámetro de la boquilla, pero siguiendo las recomendaciones de Cura no se cambiará el valor de espesor de capa porque es una resolución de uso general. En consecuencia, el diámetro de la boquilla también será constante.

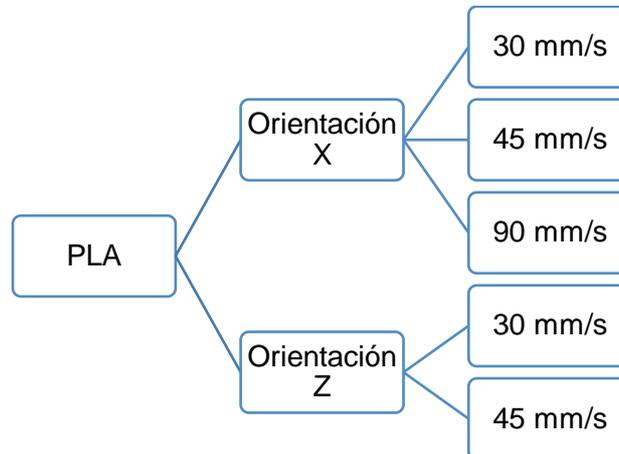
El aire entre capas y el ángulo de impresión son parámetros de impresión que no se puede modificar en Cura.

Una vez elegidos estos parámetros se plantea las siguientes situaciones para cada material que dan lugar a la impresión de cada probeta con diferente orientación y dentro de ellos diferentes velocidades de impresión:

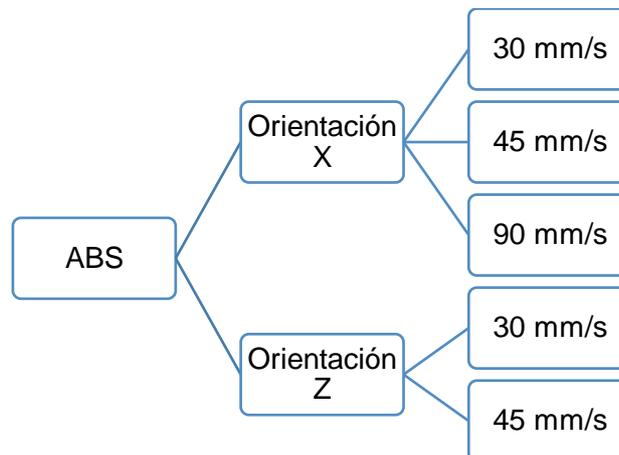


**Figura 19.** Esquema de los parámetros de impresión de cada material para su simulación.

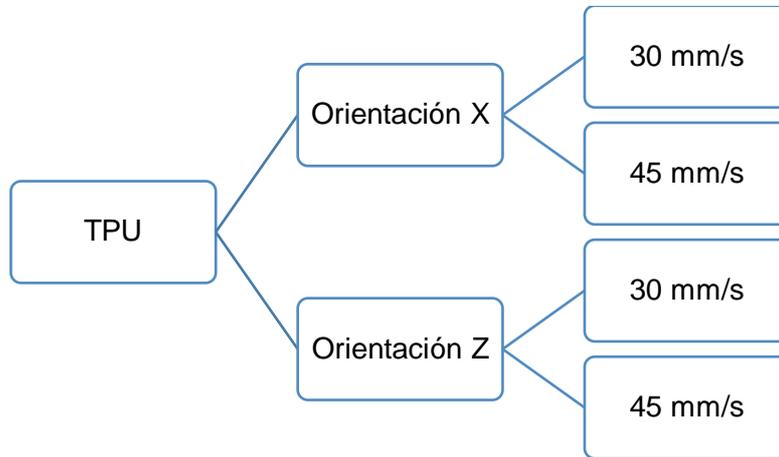
En el caso del TPU, PETG y PP no tendrá valores de velocidad intermedia.



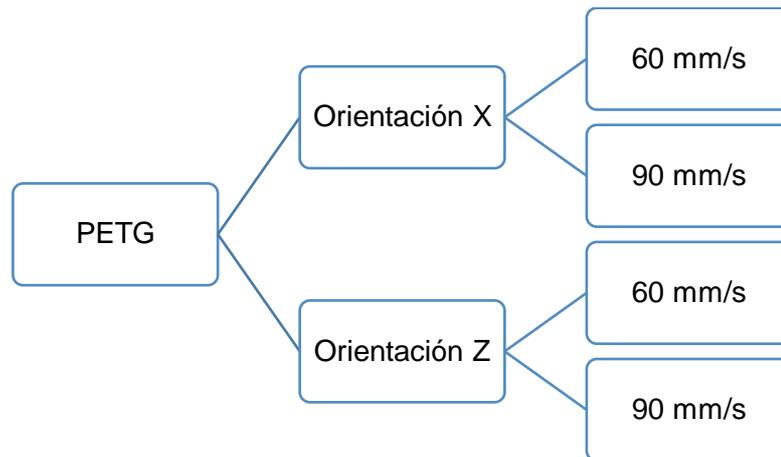
**Figura 20.** Parámetros de impresión para la simulación de PLA.



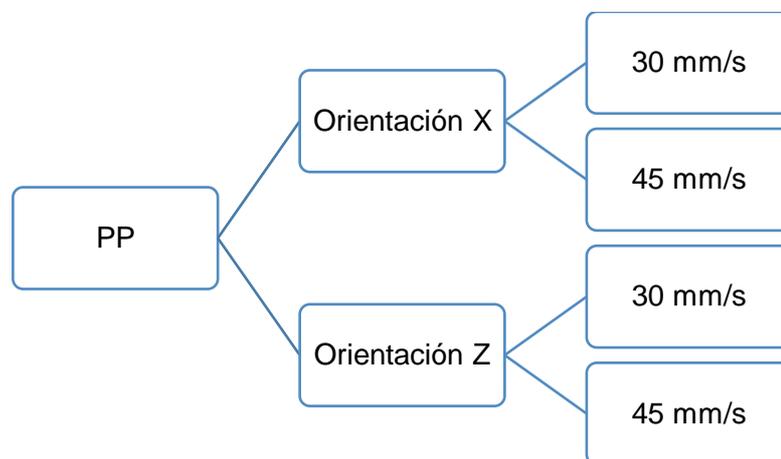
**Figura 21.** Parámetros de impresión para la simulación de ABS.



**Figura 22.** Parámetros de impresión para la simulación de TPU.



**Figura 23.** Parámetros de impresión para la simulación para PETG.



**Figura 24.** Parámetros de impresión para la simulación de PP.

Insertados los parámetros en Cura se procede a la simulación de cada probeta dando como resultado el material impreso requerido para cada caso, con su correspondiente tiempo de impresión y la temperatura de impresión.

En el **Error! Reference source not found.** se muestran los valores de salida por el programa de simulación, que serán algunas de las variables de entrada requeridas para la ecuación (12) junto con las constantes agrupadas en la *Tabla 5*.

A continuación, se procederá a calcular el consumo energético total y la huella de carbono para cada probeta impresa por los materiales seleccionados.

## 4.2 Resultados de consumo energético y energía total primaria

### 4.2.1 PLA

El procedimiento para calcular el consumo energético de la probeta con PLA se seguirá del mismo modo para el resto de los materiales teniendo en cuenta las constantes de cada material y su masa y tiempo de procesamiento.

$$\begin{aligned}
 E_{total}[KJ] = & c \left[ \frac{KJ}{Kg * K} \right] * m[kg](T_m[k] - T_a[k]) + m[Kg] * X \left[ \frac{KJ}{KG} \right] \\
 & + P_{parada}[KW] * t[s] + \frac{P[KW] * t[s]}{V[m^3]} * v \left[ \frac{m^3}{s} \right] * t[s] \\
 & + E_{precalentamiento}[KJ] + E_{enfriamiento}[KJ]
 \end{aligned} \tag{14}$$

La energía primaria total consumida para la simulación de la primera probeta con una orientación de impresión X, a una velocidad de 30 mm/s teniendo en cuenta la masa de PLA depositado (8 g) quedaría de esta forma:

$$\begin{aligned}
 E_{total}[KJ] = & 1,8 \left[ \frac{KJ}{Kg * K} \right] * 0,008[kg](433[k] - 298[k]) + 0,008[Kg] \\
 & * 29,1 \left[ \frac{KJ}{KG} \right] + 0,1[KW] * 30 * 60[s] + \frac{0,5[KW] * 7740[s]}{9,04 * 10^{-6}[m^3]} \\
 & * 1,17 * 10^{-9} \left[ \frac{m^3}{s} \right] * 7740[s] + 0[KJ] + 598,30[KJ] \\
 = & 7,80 * 10^2 KJ
 \end{aligned} \tag{15}$$

Siendo  $T_a$  es la temperatura ambiente a la que se encuentra la impresora y se asume que ésta es 25°C.

La potencia asociada al movimiento en el término  $\frac{P[KW]*t[s]}{V[m^3]} * v \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ , se considera como la energía nominal de la impresora (500W).

El volumen es constante para todas las probetas,  $9,04 * 10^{-6} m^3$ .

La potencia de parada también se asume como un valor constante para todas la situaciones, suponiendo un 20% de la potencia nominal de la impresora, que son 500W, basando su fundamento en la referencia [4]. Se considera el tiempo de parada de 30 minutos entre probeta y probeta.

La energía asociada al precalentamiento se considera cero porque es despreciable frente a la energía total consumida.

La energía de enfriamiento en cambio representa un 15% sobre la potencia nominal de la impresora.

Para calcular la energía de enfriamiento será necesario multiplicar la potencia nominal (500W) por el 15%, dando como resultado 0,075 W, que serán multiplicados por el tiempo de impresión.

De esta manera queda  $E_{enfriamiento} = 598 KJ$

Todos estos cálculos se seguirán del mismo modo para cada situación con los diferentes parámetros de impresión planteados.

La siguiente tabla nuestros los resultados obtenidos

**Tabla 8.** Energía total consumida para probetas de PLA

	ORIENTACIÓN	Velocidad de impresión (m/s)	m (kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total consumida (KJ)
PLA	X	0,03	0,008	7740	1,16E-09	598,302	<b>7,80E+02</b>
		0,045	0,008	5160	1,75E-09	398,868	<b>5,81E+02</b>
		0,09	0,008	2760	3,28E-09	213,348	<b>3,96E+02</b>
	Z	0,03	0,009	8520	1,06E-09	658,596	<b>8,41E+02</b>
		0,045	0,009	5700	1,58E-09	440,61	<b>6,23E+02</b>
		0,09	0,009	4500	2,003E-09	347,85	<b>5,30E+02</b>

Para calcular la energía primaria total consumida se sigue la siguiente ecuación donde la constantes  $\alpha_{material}$  se recopilan en la *Tabla 5* y  $\alpha_{electrica} \left(\frac{KJ}{KJ}\right) = 2,78$ .

$$\begin{aligned}
 PE_{total\ FDM}[kJ] = & \alpha_{material}[KJ/Kg] * m_{material}[Kg] \\
 & + \alpha_{electrica}[KJ \\
 & /KJ] \left\{ c \left[ \frac{KJ}{Kg * K} \right] * m[kg](T_m[k] - T_a[k]) + m[Kg] \right. \\
 & * X \left[ \frac{KJ}{Kg} \right] + P_{parada}[KW] * t[s] + \frac{P[KW] * t[s]}{V[m^3]} * v \left[ \frac{m^3}{s} \right] \\
 & * t[s] + E_{precalentamiento}[KJ] + E_{enfriamiento}[KJ] \\
 & \left. + (E_{acabado}) \right\} [KJ]
 \end{aligned} \tag{16}$$

La energía de acabado se asume que es de 1 hora suponiendo una potencia requerida de 250W, que se traduce a una energía de 900 KJ.

$$\begin{aligned}
 PE_{total\ FDM}[kJ] = & 68600 \left[ \frac{KJ}{Kg} \right] * 0,008[Kg] \\
 & + 2,78[KJ \\
 & /KJ] \left\{ 1,8 \left[ \frac{KJ}{Kg * K} \right] * 0,008[kg](433[k] - 298[k]) + 0,008[Kg] * 29,1 \left[ \frac{KJ}{KG} \right] \right. \\
 & + 0,1[KW] * 30 * 60[s] + \frac{0,5[KW] * 7740[s]}{9,04 * 10^{-6}[m^3]} * 1,17 * 10^{-9} \left[ \frac{m^3}{s} \right] * 7740[s] \\
 & \left. + 0[KJ] + 598,30[KJ] + 900[KJ] \right\} [KJ] = 7,02 * 10^3 KJ
 \end{aligned}$$

Se procederá a calcular la energía primaria requería para cada escenario planteado.

Los resultados obtenidos se representan la tabla:

**Tabla 9.** Energía primaria total requerida para probeta de PLA

	ORIENTACIÓ N	Velocidad de impresión (m/s)	m (kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total consumida (KJ)	PE total FDM (kJ)
PLA	X	0,03	0,008	7740	1,16E-09	598,30	<b>7,80E+02</b>	<b>7,02E+03</b>
		0,045	0,008	5160	1,75E-09	398,87	<b>5,81E+02</b>	<b>5,23E+03</b>
		0,09	0,008	2760	3,28E-09	213,35	<b>3,96E+02</b>	<b>3,56E+03</b>



Z	0,03	0,009	8520	1,06E-09	658,70	<b>8,41E+02</b>	<b>7,57E+03</b>
	0,045	0,009	5700	1,58E-09	440,61	<b>6,23E+02</b>	<b>5,61E+03</b>
	0,09	0,009	4500	2,003E-09	347,85	<b>5,30E+02</b>	<b>4,77E+03</b>

#### 4.2.2 ABS

Siguiendo el mismo método de cálculo para el PLA se obtiene los resultados del ABS

**Tabla 10.** Energía total consumida para probetas de ABS

	ORIENTACIÓN	Velocidad de impresión (m/s)	m (kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total consumida (KJ)
ABS	X	0,03	0,008	6840	1,32E-09	528,732	<b>4,13E+03</b>
		0,045	0,008	4680	1,935E-09	361,764	<b>2,89E+03</b>
		0,09	0,008	2580	3,505E-09	199,434	<b>1,67E+03</b>
	Z	0,03	0,009	8220	1,10E-09	635,406	<b>4,93E+03</b>
		0,045	0,009	5820	1,56E-09	449,886	<b>3,54E+03</b>
		0,09	0,009	4620	1,95E-09	357,126	<b>2,85E+03</b>

**Tabla 11.** Energía total primaria requerida para probeta de ABS

	ORIENTACIÓN	Velocidad de impresión (m/s)	m (kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total consumida (KJ)	PE total FDM (kJ)
ABS	X	0,03	0,008	6840	1,32E-09	528,732	<b>4,13E+03</b>	<b>1,40E+04</b>
		0,045	0,008	4680	1,935E-09	361,764	<b>2,89E+03</b>	<b>1,05E+04</b>
		0,09	0,008	2580	3,505E-09	199,434	<b>1,67E+03</b>	<b>7,15E+03</b>
	Z	0,03	0,009	8220	1,10E-09	635,406	<b>4,93E+03</b>	<b>1,62E+04</b>
		0,045	0,009	5820	1,56E-09	449,886	<b>3,54E+03</b>	<b>1,24E+04</b>
		0,09	0,009	4620	1,95E-09	357,126	<b>2,85E+03</b>	<b>1,04E+04</b>

#### 4.2.3 TPU

**Tabla 12.** Energía total consumida para probeta de TPU

	ORIENTACIÓN	Velocidad de impresión (m/s)	m (Kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total (KJ)
TPU	x	0,03	0,008	2700	3,35E-09	<b>208,71</b>	<b>1,74E+03</b>
		0,045	0,008	1920	4,71E-09	<b>148,416</b>	<b>1,29E+03</b>
	z	0,03	0,007	4380	2,06E-09	<b>338,574</b>	<b>2,71E+03</b>
		0,045	0,007	4380	2,06E-09	<b>338,574</b>	<b>2,71E+03</b>

**Tabla 13.** Energía primaria total requerida para probeta de TPU

	ORIENTACIÓN	Velocidad de impresión (m/s)	m (Kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total (KJ)	PE total FDM (kJ)
TPU	x	0,03	0,008	2700	3,35E-09	208,71	<b>1,74E+03</b>	<b>7,34E+03</b>
		0,045	0,008	1920	4,71E-09	148,416	<b>1,29E+03</b>	<b>6,09E+03</b>
	z	0,03	0,007	4380	2,06E-09	338,574	<b>2,71E+03</b>	<b>1,00E+04</b>
		0,045	0,007	4380	2,06E-09	338,574	<b>2,71E+03</b>	<b>1,00E+04</b>

#### 4.2.4 PETG

**Tabla 14.** Energía total consumida para probeta PETG

	ORIENTACIÓN N	Velocidad de impresión (m/s)	m (Kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total (KJ)
PET G	x	0,06	0,009	3960	2,28E-09	<b>306,504</b>	<b>4,89E+02</b>
		0,09	0,009	2760	3,28E-09	<b>213,624</b>	<b>3,96E+02</b>

z	0,06	0,009	4800	1,88E-09	<b>371,52</b>	<b>5,54E+02</b>
	0,09	0,009	4500	2,01E-09	<b>348,3</b>	<b>5,31E+02</b>

**Tabla 15.** Energía primario total requerida para probeta de PETG

	ORIENTACIÓN	Velocidad de impresión (m/s)	m (Kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total (KJ)	PE total FDM (kJ)
PETG	x	0,06	0,009	3960	2,28E-09	306,504	<b>4,89E+02</b>	<b>3,87E+03</b>
		0,09	0,009	2760	3,28E-09	213,624	<b>3,96E+02</b>	<b>3,61E+03</b>
	z	0,06	0,009	4800	1,88E-09	371,52	<b>5,54E+02</b>	<b>4,05E+03</b>
		0,09	0,009	4500	2,01E-09	348,3	<b>5,31E+02</b>	<b>3,98E+03</b>

#### 4.2.5 PP

**Tabla 16.** Energía total consumida para probeta PP

	ORIENTACIÓN	Velocidad de impresión (m/s)	m (Kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total (KJ)
PP	x	0,03	0,008	4020	2,25E-09	<b>311,148</b>	<b>4,93E+02</b>
		0,045	0,008	2820	3,21E-09	<b>218,268</b>	<b>4,00E+02</b>
	z	0,03	0,007	6240	1,45E-09	<b>482,976</b>	<b>6,65E+02</b>
		0,045	0,007	6180	1,46E-09	<b>478,332</b>	<b>6,60E+02</b>

**Tabla 17.** Energía primaria total requerida para probeta de PP

	ORIENTACIÓN	Velocidad de impresión (m/s)	m (Kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total (KJ)	PE total FDM (kJ)
--	-------------	------------------------------	--------	-------------------------	---	---------------------	--------------	-------------------

PP	x	0,03	0,008	4020	2,25E-09	311,148	4,93E+02	3,87E+03
		0,045	0,008	2820	3,21E-09	218,268	4,00E+02	3,62E+03
	z	0,03	0,007	6240	1,45E-09	482,976	6,65E+02	4,35E+03
		0,045	0,007	6180	1,46E-09	478,332	6,60E+02	4,34E+03

### 4.3 Análisis global con consumo energético total

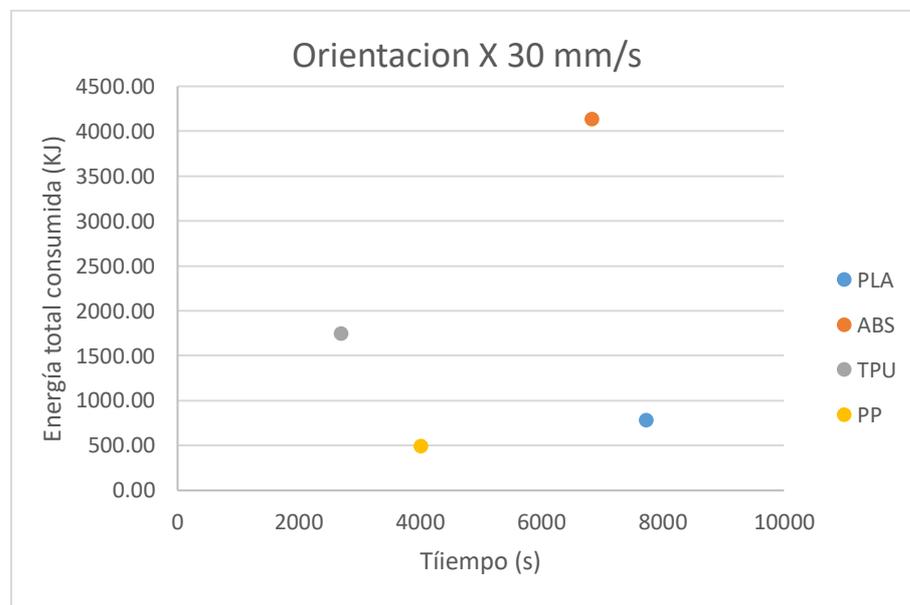
Agrupando todos los valores en una misma tabla (**Error! Reference source not found.**), claramente se observa que el ABS es el material que más consumo energético supone para cualquiera de sus simulaciones respecto al resto de materiales.

Se aprecia una diferencia significativa respecto a las probetas de los materiales PETG y PP.

Cabe destacar que independientemente del material, el consumo energético está directamente relacionado con el tiempo de impresión, que, a su vez, éste es un valor que va asociado a la velocidad de impresión.

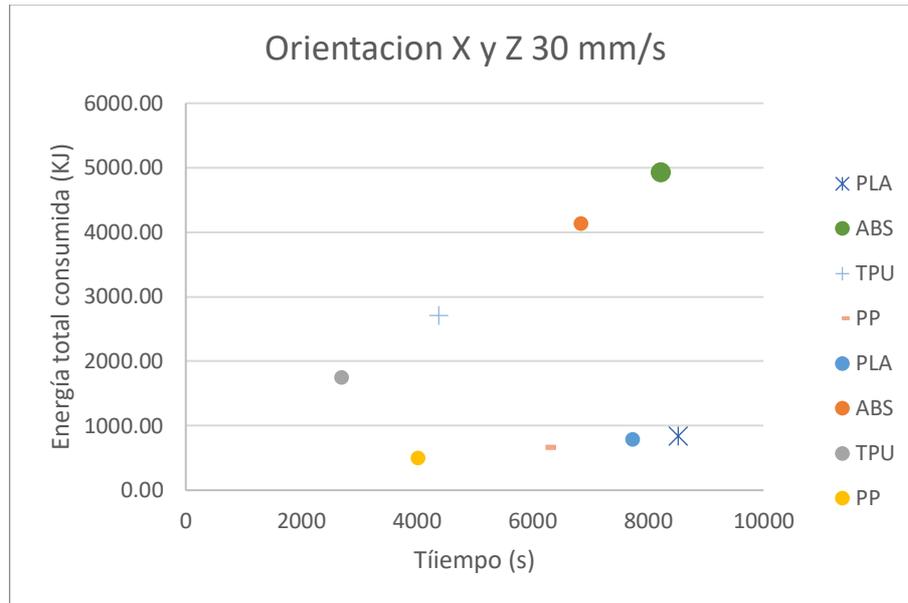
Esto significa que, a mayor velocidad de impresión, menor es el tiempo requerido.

Además, en cada uno de los materiales, el tiempo de impresión es mayor cuando la probeta se coloca en la dirección Z.



**Figura 25.** Representación gráfica del PL, ABS, TPU y PP para caso de orientación X y  $v=30\text{mm/s}$

En la *Figura 25* se puede elegir PP como la situación mas favorable porque es el material que menor consumo energético total supone con una velocidad de impresión no muy alta.

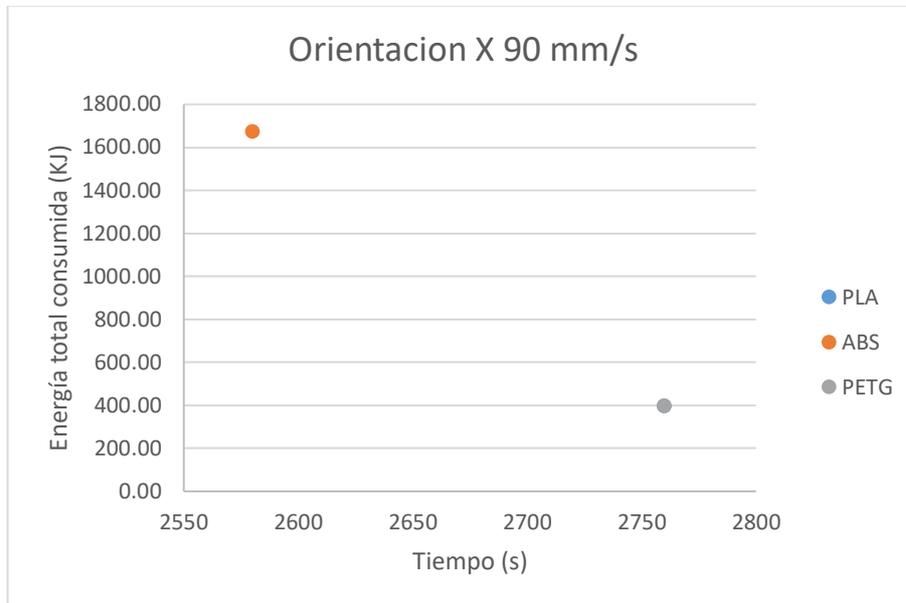


**Figura 26.** Representación gráfica del PL, ABS, TPU y PP para caso de orientación Z y  $v=30\text{mm/s}$

Lo mismo se podría decir la *Figura 26*, el polipropileno sería la opción mas favorable a la hora de conseguir el menos consumo energético. (los puntos opacos de colores representan la dirección Z, excepto el verde).

En la gráfica también se puede ver la diferencia nombrada anteriormente respecto a la orientación de la pieza, donde se parecía la tendencia ascendente del tiempo y consumo energético cuando la orientación de construcción es en la dirección Z.

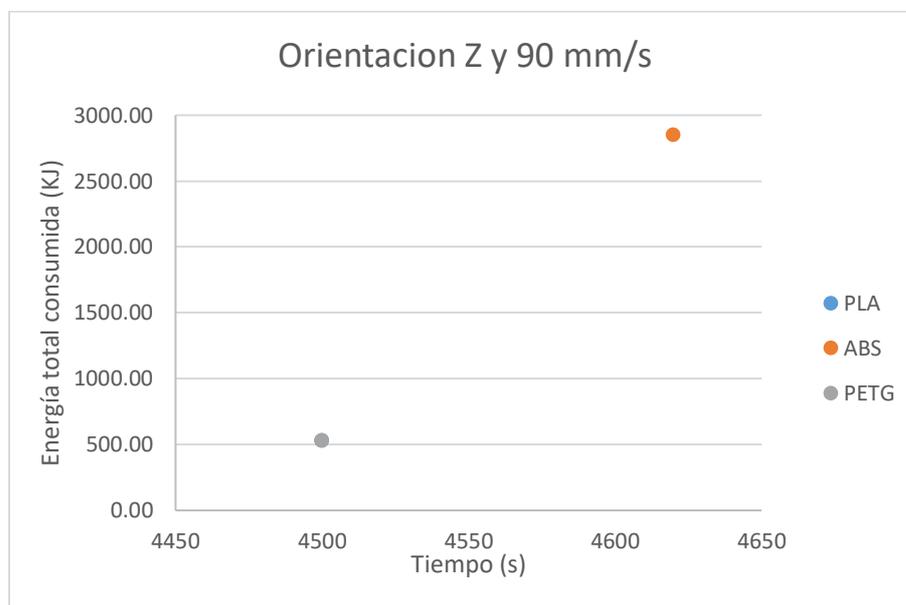
A 30 mm/s de velocidad destaca el ABS por su mayor consumo energético frente al resto de los materiales, teniendo un valor mayor de consumo de energía y tiempo cuando la pieza se construye en la orientación Z. Está sería la situación más desfavorable



**Figura 27.** Representación gráfica del PL, ABS, PETG para caso de orientación X y  $v=90\text{mm/s}$

En la esta grafica el consumo energético total y el tiempo de impresión del PLA y el PEGT coinciden. Por tanto, se podría escoger entre los dos materiales dependiendo de las propiedades mecánicas óptimas para la pieza final ya que ambos van a suponer el mismo tiempo de impresión y de consumo energético.

Destaca el ABS porque su consumo energético es mucho mayor al PLA y el PETG, aunque el tiempo de impresión es el mínimo.

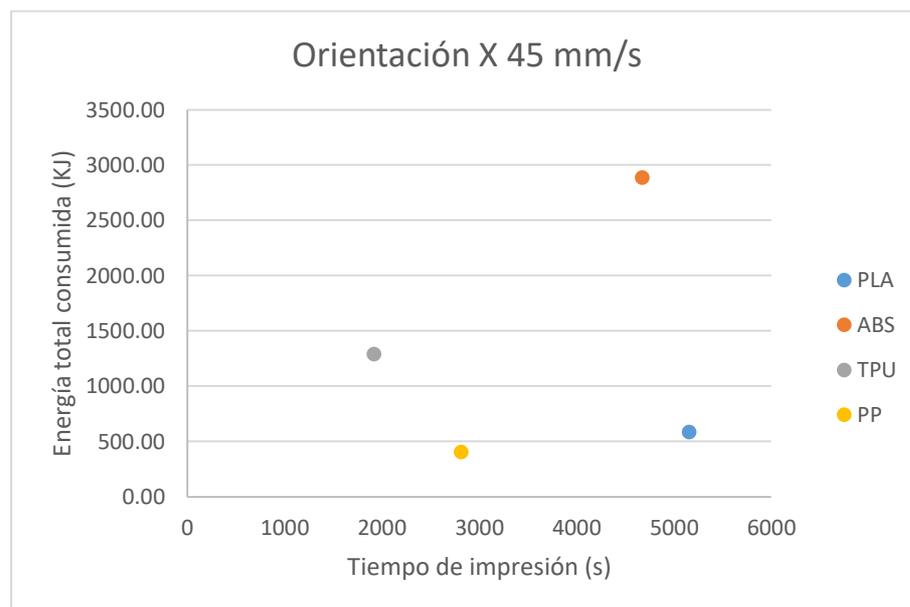


**Figura 28.** Representación gráfica del PL, ABS, PETG para caso de orientación Z y  $v=90\text{mm/s}$

Se aprecia una clara diferencia cuando la velocidad de impresión se mantiene en 90 mm/s, pero cambia la orientación de construcción a la dirección Z, porque el ABS destaca por su aumento tanto de tiempo de impresión como de consumo energético total.

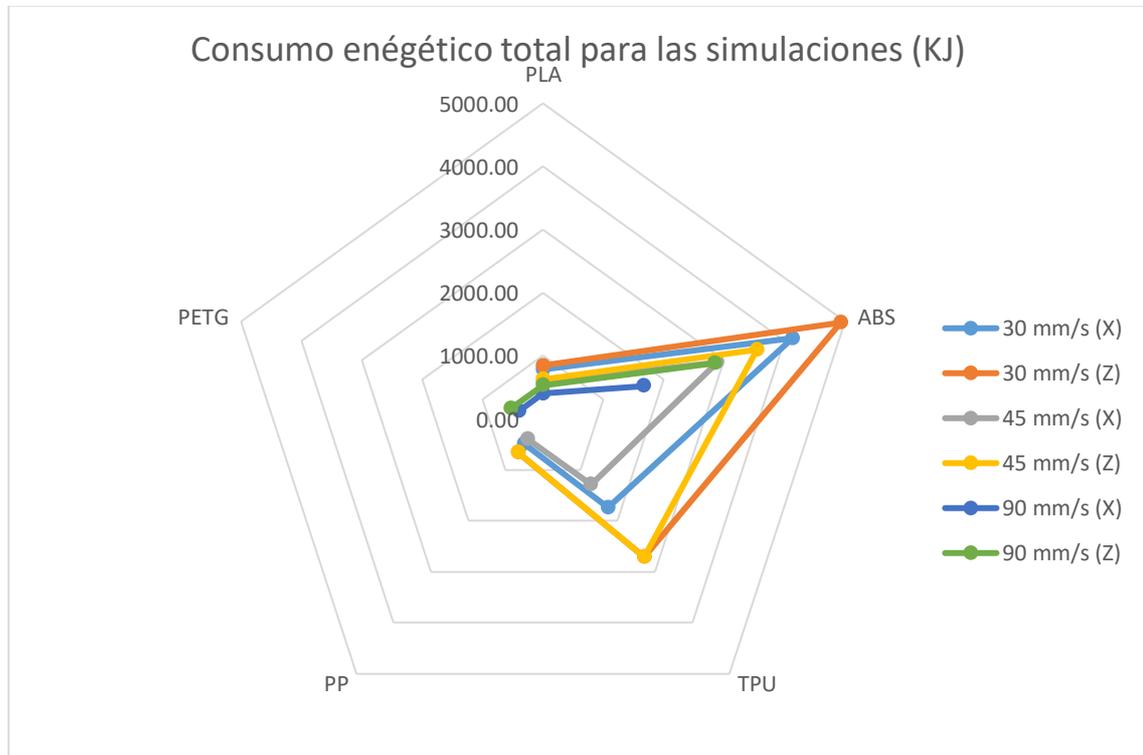
De esta manera cabe decir que el ABS impreso

Y en este caso también vuelven a coincidir los valores de energía y tiempo de impresión para el PLA y PETG, además en este caso estos valores son más bajos que en la situación cuando la pieza está orientada en el eje X. Sería un factor a tener en cuenta a la hora de elegir el material y su orientación cuando se imprima a una velocidad de 90 mm/s.



**Figura 29.** Representación gráfica del PLA, ABS, TPU y PP para caso de orientación X y  $v=45$  mm/s.

Esta figura coincide con la representación gráfica de la *Figura 25*, en la que simplemente se ha aumentado la velocidad de impresión. La relación entre tiempo de impresión y consumo energético se mantiene constante y ha disminuido y en esta diferencia se respalda la idea de que, a menor tiempo de impresión, menor consumo energético.



**Figura 30.** Energía total consumida para probetas de PLA, ABS, TPU, PETG y PP con orientación X y Z.

#### 4.4 Resultados de la huella de carbono

##### 4.4.1 PLA

Para el cálculo de los gramos de los CO<sub>2</sub> equivalentes se va a seguir la fórmula detallada en el apartado de Cálculo de la huella de carbono donde las únicas variables nuevas de entrada son  $\beta_{material}$  y  $\beta_{electrica}$ , el resto son los valores calculados anteriormente

$$C_{total\ FDM} = C_{material} + C_{FDM} + C_{acabado} \quad (17)$$

$$= \beta_{material} * m_{material} + \beta_{electrica} * (E_{FDM} + E_{acabado})$$

De este modo se calculará el impacto de la huella de carbono de cada simulación para analizar los resultados posteriormente como se ha hecho con el consumo energético.

En el caso del PLA  $\beta_{material} = 3,19 \left(\frac{Kg}{KJ}\right)$  y  $\beta_{electrica} = 0,17 \left(\frac{Kg}{KJ}\right)$  es constante para todos los materiales.

Se seguirá el mismo procedimiento para cada uno de los casos

**Tabla 18.** Impacto de la huella de carbono de las probetas de PLA

	ORIENTACIÓN	Velocidad de impresión (m/s)	m (kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total consumida (KJ)	C total (CO <sub>2</sub> eq)
PLA	X	0,03	0,008	7740	1,16E-09	598,302	<b>7,80E+02</b>	<b>2,86E+02</b>
		0,045	0,008	5160	1,75E-09	398,868	<b>5,81E+02</b>	<b>2,52E+02</b>
		0,09	0,008	2760	3,28E-09	213,348	<b>3,96E+02</b>	<b>2,20E+02</b>
	Z	0,03	0,009	8520	1,06E-09	658,596	<b>8,41E+02</b>	<b>2,96E+02</b>
		0,045	0,009	5700	1,58E-09	440,61	<b>6,23E+02</b>	<b>2,59E+02</b>
		0,09	0,009	4500	2,003E-09	347,85	<b>5,30E+02</b>	<b>2,43E+02</b>

#### 4.4.2 ABS

**Tabla 19.** Impacto de la huella de carbono de las probetas de ABS

	ORIENTACIÓN	Velocidad de impresión (m/s)	m (kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total consumida (KJ)	C total (CO <sub>2</sub> eq)
ABS	X	0,03	0,008	6840	1,32E-09	528,732	<b>4,13E+03</b>	<b>8,55E+02</b>
		0,045	0,008	4680	1,935E-09	361,764	<b>2,89E+03</b>	<b>6,43E+02</b>
		0,09	0,008	2580	3,505E-09	199,434	<b>1,67E+03</b>	<b>4,37E+02</b>
	Z	0,03	0,009	8220	1,10E-09	635,406	<b>4,93E+03</b>	<b>9,91E+02</b>
		0,045	0,009	5820	1,56E-09	449,886	<b>3,54E+03</b>	<b>7,55E+02</b>
		0,09	0,009	4620	1,95E-09	357,126	<b>2,85E+03</b>	<b>6,38E+02</b>

#### 4.4.3 TPU

**Tabla 20.** Impacto de la huella de carbono de las probetas de TPU

	ORIENTACIÓN	Velocidad de impresión (m/s)	m (Kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total (KJ)	C total (CO <sub>2</sub> eq)
TPU	x	0,03	0,008	2700	3,35E-09	208,71	1,74E+03	4,49E+02
		0,045	0,008	1920	4,71E-09	148,416	1,29E+03	3,72E+02
	z	0,03	0,007	4380	2,06E-09	338,574	2,71E+03	6,14E+02
		0,045	0,007	4380	2,06E-09	338,574	2,71E+03	6,14E+02

#### 4.3.4 PETG

**Tabla 21.** Impacto de la huella de carbono de las probetas de PETG.

	ORIENTACIÓN	Velocidad de impresión (m/s)	m (Kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total (KJ)	C total (CO <sub>2</sub> eq)
PETG	x	0,06	0,009	3960	2,28E-09	306,504	4,89E+02	2,36E+02
		0,09	0,009	2760	3,28E-09	213,624	3,96E+02	2,20E+02
	z	0,06	0,009	4800	1,88E-09	371,52	5,54E+02	2,47E+02
		0,09	0,009	4500	2,01E-09	348,3	5,31E+02	2,43E+02

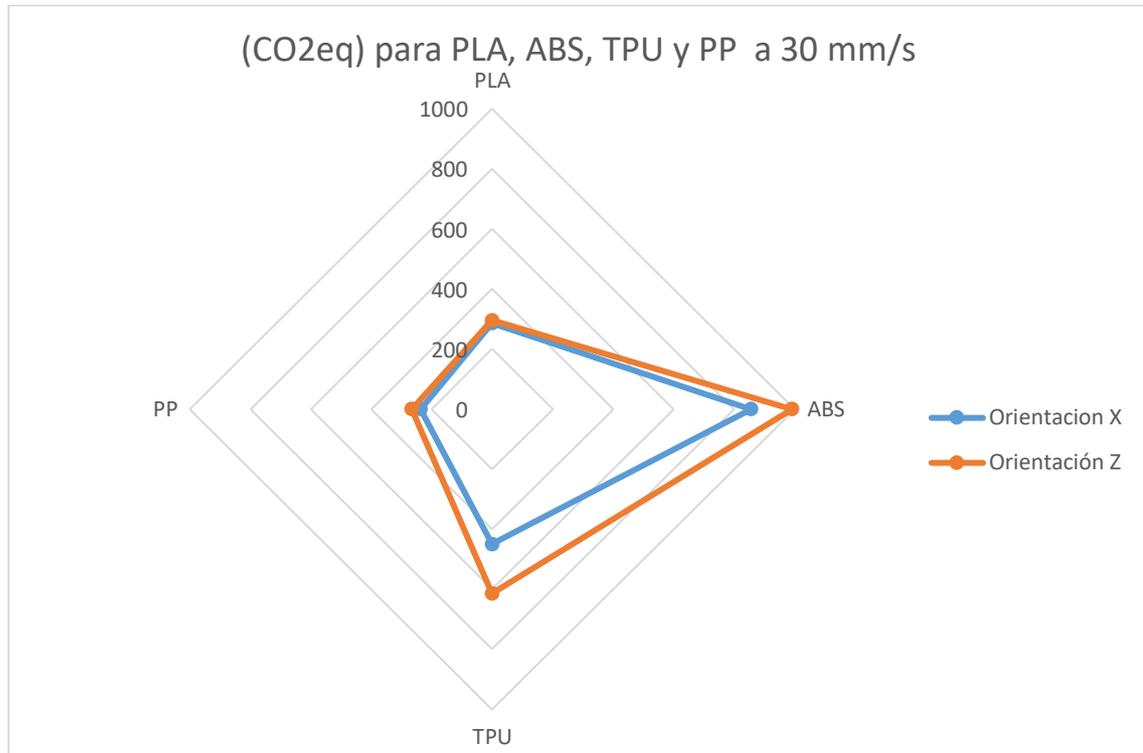


#### 4.3.5 PP

**Tabla 22.** Impacto de la huella de carbono de las probetas de PP

	ORIENTACIÓN	Velocidad de impresión (m/s)	m (Kg)	Tiempo de impresión (s)	Caudal volumétrico (mm <sup>3</sup> /s)	E enfriamiento (KJ)	E total (KJ)	C total (CO <sub>2</sub> eq)
PP	x	0,03	0,008	4020	2,25E-09	311,148	<b>4,93E+02</b>	<b>2,37E+02</b>
		0,045	0,008	2820	3,21E-09	218,268	<b>4,00E+02</b>	<b>2,21E+02</b>
	z	0,03	0,007	6240	1,45E-09	482,976	<b>6,65E+02</b>	<b>2,66E+02</b>
		0,045	0,007	6180	1,46E-09	478,332	<b>6,60E+02</b>	<b>2,65E+02</b>

#### 4.4 Análisis global de la huella de carbono

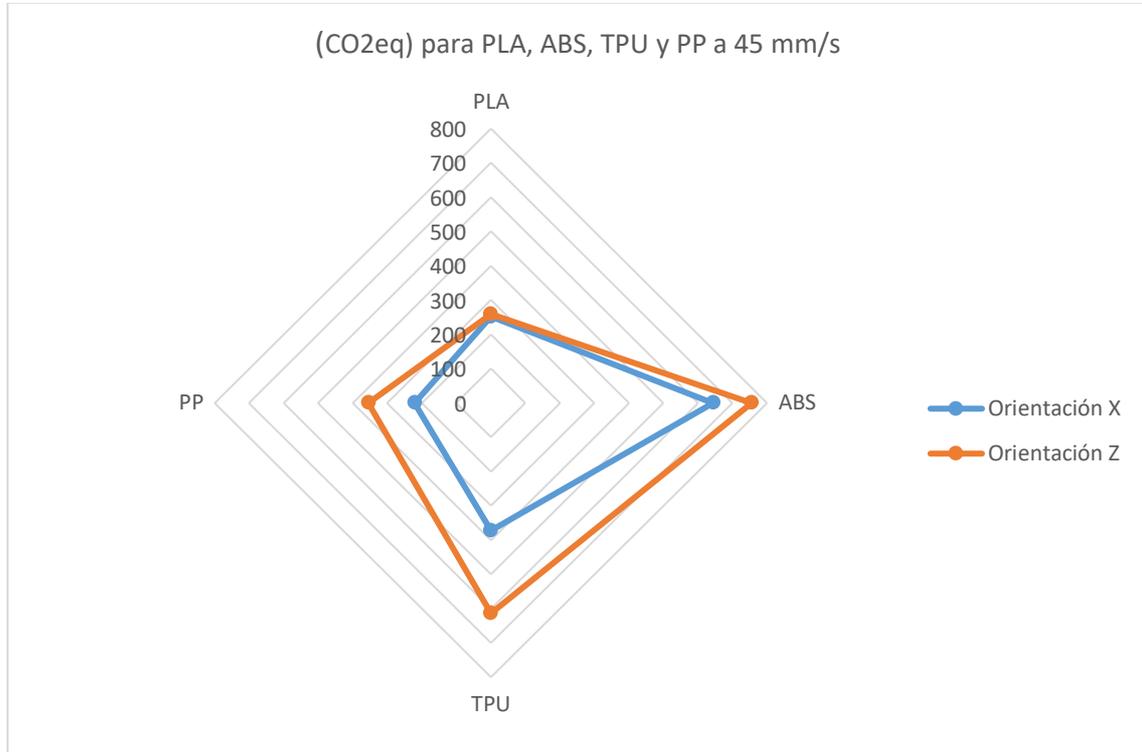


**Figura 31.** Impacto de la huella de carbono para probetas de PLA, ABS, TPU y PP con orientación X y Z.

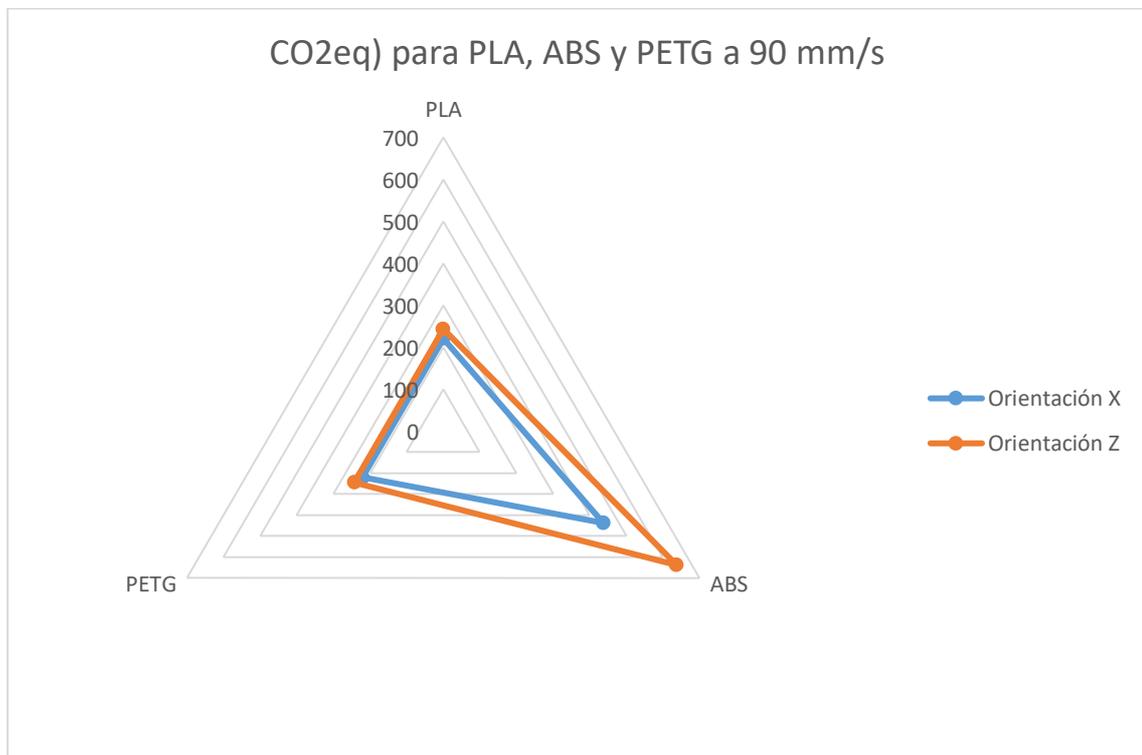
En la figura se representan los valores de CO<sub>2</sub>eq para cada material a una velocidad de impresión de 30 mm/s, realizando una comparación gráfica de las dos orientaciones de construcción.

Se puede apreciar claramente que cuando la pieza se coloca en el plano Z el impacto de la huella de carbono es mayor para los 3 materiales. Sin embargo, tanto para el PP como para el PLA la alteración de este parámetro tiene menor influencia que para el ABS y el TPU.

Lo mismo ocurre en la *Figura 32*, donde lo único que cambia es la velocidad de impresión, pero en este caso hay una mayor diferencia de CO<sub>2</sub>eq de las probetas de PP cuando se cambia su dirección de impresión. Esto puede ser debido a que la diferencia de impresión es de una hora aproximadamente.



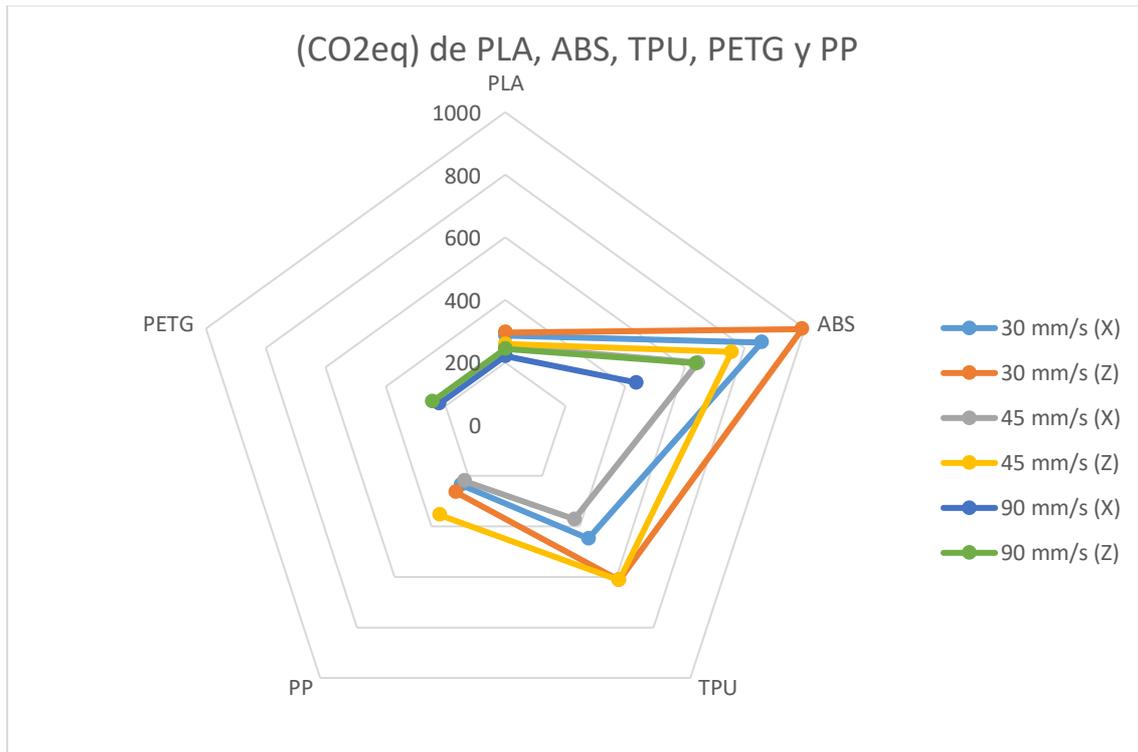
**Figura 32.** Impacto de la huella de carbono para probetas de PLA, ABS, TPU y PP con orientación X y Z.



**Figura 33.** Impacto de la huella de carbono para probetas de PLA, ABS, y PETG con orientación X y Z.

En la *Figura 33* se representan las emisiones de los materiales PLA, ABS y PETG a una velocidad de impresión de 90 mm/s, la máxima velocidad de impresión recomendada para el PLA y el ABS.

En este caso también destaca el ABS por sus valores dispares frente al resto de los materiales, que cuyo comportamiento es similar cuando se imprimen en las dos direcciones.



**Figura 34.** Impacto de la huella de carbono para probetas de PLA, ABS, TPU, PETG y PP con orientación X y Z.

La última figura agrupa los resultados de los anteriores gráficos, donde se aprecia que el PLA a diferentes velocidades de impresión y con diferente posición de la pieza en los planos para su impresión casi no varía el impacto de la huella de carbono. Además, el PLA es uno de los materiales que da valores más bajos de CO<sub>2</sub>eq, dando una media de 259,39 kg de CO<sub>2</sub> equivalentes.

La simulación de la probeta con PETG ha dado los valores de impacto ambiental más bajos, con una media de 236,74 kg de CO<sub>2</sub> equivalentes. Y la variación de los parámetros de velocidad de impresión y orientación no han alterado de manera significativa la tendencia de los resultados.

Aparte, aunque tenga el mayor punto de fusión del resto de los materiales, éste no es determinante a la hora de obtener el consumo energético total y, por tanto, el impacto total de la huella de carbono.

Así mismo, para la impresión de la probeta con PP también se obtienen valores bajos con una media de 269,77 Kg de CO<sub>2</sub> equivalente.

En cambio, para la impresión probeta de TPU la orientación de capa es un factor a tener en cuenta a la hora de obtener su huella de carbono dado que cuando la pieza se coloca en el plano Z, se obtiene un mayor impacto ambiental.

La media de emisión de la probeta impresa con TPU es de 512,27 Kg de CO<sub>2</sub> equivalente.

Y por último el ABS destaca de nuevo por su impacto ambiental en todas las situaciones planteadas, alcanzando el máximo resultado, 999,99 Kg de CO<sub>2</sub> equivalente, cuando la pieza se coloca en el eje Z y a la mínima velocidad de impresión.

La situación más óptima para este material planteada en términos de impacto ambiental es cuando la probeta se construye con la orientación X a la máxima velocidad de impresión, dando un valor de 437,40 Kg de CO<sub>2</sub> equivalente. Prácticamente la mitad que el resultado anterior.

La media de emisión para la impresión de una probeta con ABS es de 512,27 Kg de CO<sub>2</sub> equivalente.

## CONCLUSIONES

En este proyecto se han alcanzado los objetivos planteados ya que se ha conseguido determinar la huella de carbono emitida cuando se fabrica una pieza con diferentes materiales en un proceso de modelado por deposición fundida, para ello se ha realizado una revisión bibliográfica relacionada con el contexto del proyecto que ha contribuido a poder adoptar diferentes expresiones para su cálculo.

Además, se ha profundizado en el modelo por deposición fundida y se han analizado los diferentes parámetros a tener en cuenta en este tipo de tecnología.

Por otro lado se han estudiado diferentes materiales que trabajan con esta tecnología.

La situación sanitaria en el que se ha realizado el proyecto ha hecho que se haya modificado el planteamiento inicial de fabricación de piezas en la impresora que está en el departamento de Fabricación, en su lugar se ha decidido realizar simulaciones de impresión con la impresora escogida como se ha comentado anteriormente además de un software para simular la impresión de la pieza con diferentes materiales.

Ha sido necesario la consulta de normas en las que se ha detectado una probeta como la que ha simulado en el trabajo.

Teniendo en cuenta todo esto: se ha generado una fórmula consumo energético total para calcular la energía consumida por la probeta que ha sido simulada bajo diferentes parámetros de impresión, planteando un total de 24 escenarios posibles de simulación, bajo la condición de los rangos de velocidad de impresión de cada material y teniendo en cuenta condicionantes del propio proceso.

En estos escenarios se han contemplado probetas en orientación X y Z, existen trabajos de fin de grado anteriores que se han revisado en el que consta se obtienen mejores valores de módulo de Young y resistencia cuando la orientación es en el plano Z.

De cada simulación se ha obtenido la masa de probetas y el tiempo de impresión, el factor más importante asociado al consumo energético total, que a su vez está vinculado con la velocidad a la que se imprime cada material. Por tanto, se puede asumir que a menor velocidad de impresión mayor es el tiempo empleado para la impresión.

El cálculo de la huella de carbono ha sido posible gracias a la metodología planteada para la fórmula de energía que se ha definido tras la búsqueda y análisis de todas las variables implicadas en ella a partir de diferentes bibliografías y especificaciones de la impresora Ultimaker 5S.

Una vez definida la huella de carbono se ha podido calcular el impacto ambiental de cada escenario planteado, poniendo especial atención en la diferencia los Kg de CO<sub>2</sub> emitidos por cada material.

Comparando las figuras que engloban los resultados del consumo energético total y el impacto de la huella de carbono, se concluye las dos variables siguen la misma tendencia ya que el termino de energía es determinante en la fórmula para calcular el impacto total del proceso.

Observando los resultados obtenidos del impacto ambiental de los materiales a comparar se aprecian diferencias significativas que ayudan a enunciar que el ABS es el material con mayor impacto ambiental.

Mientras que el PLA y el PETG son los materiales más ecológicos a la vista de los resultados. Y el PETG podría ser una alternativa al ABS.

Adicionalmente el PLA además de tener su carácter de biopolímero también se puede afirmar que se caracteriza por tener un bajo impacto ambiental asociado al proceso de impresión.

Teniendo en cuenta los materiales planteados en este proyecto los resultados muestran que los parámetros de impresión apenas influyen en el valor de la sostenibilidad medioambiental permitiendo así escoger los parámetros óptimos dependiendo de su aplicación final sin ser muy relevante la diferencia la huella de carbono emitida entre ellos durante el proceso de impresión.

El material en el que se observa mayor rango de variación de su impacto medioambiental es el TPU. Además, su valor es cambiante en función de la orientación de la probeta. En este caso se deduce que la orientación X es la opción más ecológica de procesamiento.

Por lo tanto este trabajo se ha podido caracterizar de forma precisa los niveles de huella de carbono emitidos en función de los materiales utilizados, ampliando por tanto los conocimientos y metodologías analíticas de los que se disponían para la investigación de este proyecto.

Como líneas futuras y con el fin de validar la hipótesis planteada para el cálculo de la huella de carbono se propone realizar la impresión real de la probeta con los materiales estudiados



como método para comprobar el tiempo total requerido en cada caso y la obtención real de los valores de las potencias que van asociadas a los motores de la impresora, ya que en este caso se han asumido como porcentajes de la potencia total consumida.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] L. Yi *et al.*, “An eco-design for additive manufacturing framework based on energy performance assessment,” vol. 33, no. November 2019, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101120.
- [2] O. Diegel, P. Kristav, D. Motte, and B. Kianian, *Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing*, vol. 2. 2016.
- [3] J. Xu, K. Wang, H. Sheng, M. Gao, S. Zhang, and J. Tan, “Energy efficiency optimization for ecological 3D printing based on adaptive multi-layer customization,” *J. Clean. Prod.*, vol. 245, no. xxxx, p. 118826, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.118826.
- [4] Z. Liu *et al.*, “Investigation of energy requirements and environmental performance for additive manufacturing processes,” *Sustain.*, vol. 10, no. 10, 2018, doi: 10.3390/su10103606.
- [5] “Impresión 3D - Wikipedia, la enciclopedia libre.” [Online]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Impresión\\_3D](https://es.wikipedia.org/wiki/Impresión_3D). [Accessed: 19-Sep-2020].
- [6] S. S. RESTREPO, “FDM o modelado por deposición fundida, te explicamos todo! - 3Dnatives.” [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/#!> [Accessed: 19-Sep-2020].
- [7] S. H. Huang, P. Liu, A. Mokasdar, and L. Hou, “Additive manufacturing and its societal impact: A literature review,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 67, no. 5–8, pp. 1191–1203, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4558-5.
- [8] A. Jaisingh Sheoran and H. Kumar, “Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research,” *Mater. Today Proc.*, vol. 21, no. xxxx, pp. 1659–1672, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.296.
- [9] B. M. Rodríguez, “Estudio Sobre La Optimización De Los Parámetros De Fabricación En Una Impresora 3D Con Tecnología Fdm,” p. 95, 2017.
- [10] I. J. Solomon, P. Sevvel, and J. Gunasekaran, “A review on the various processing parameters in FDM,” *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, pp. 10–15, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.484.
- [11] M. Pascal, L. Denis, and P. Nicolas, “Rapid prototyping: energy and environment in the spotlight,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 26–34, Jan. 2006, doi: 10.1108/13552540610637246.
- [12] “Dynamical Materials,” p. 3.
- [13] “Material Ultimaker Tough PLA: cree prototipos y herramientas duraderos | Ultimaker.” [Online]. Available: <https://ultimaker.com/es/materials/tough-pla>. [Accessed: 19-Sep-2020].



- [14] “Clariant ESD safe PET-G.” [Online]. Available: <https://ultimaker.com/es/materials/clariant-esd-safe-pet-g>. [Accessed: 19-Sep-2020].
- [15] “Filamento PETG | TRD.” [Online]. Available: <https://www.trdimension.com/blog/filamento-petg>. [Accessed: 20-Sep-2020].
- [16] Alicia M, “Las características del polipropileno en la impresión 3D - 3Dnatives.” [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/caracteristicas-polipropileno-impresion-200720202/#!> [Accessed: 19-Sep-2020].
- [17] “3dNewWorld04.jpg (884×552).” [Online]. Available: <https://3dnewworld.com/wp-content/uploads/2017/10/3dNewWorld04.jpg>. [Accessed: 19-Sep-2020].
- [18] A. M, “Guía completa: el TPU en la impresión 3D - 3Dnatives.” [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/guia-completa-tpu-040620202/>. [Accessed: 20-Sep-2020].
- [19] “Materiales de impresión 3D de la más alta calidad - Filamentos | Dynamical 3D.” [Online]. Available: <https://www.dynamical3d.com/materiales-impresion-3d/>. [Accessed: 19-Sep-2020].
- [20] “Los 25 mejores filamentos para impresoras 3D de 2020 | All3DP.” [Online]. Available: <https://all3dp.com/es/1/filamento-3d-filamento-impresora-3d/>. [Accessed: 21-Sep-2020].
- [21] “3D Printing Materials of the Highest Quality - Filaments | Dynamical 3D.” [Online]. Available: <https://www.dynamical3d.com/3d-printing-materials/>. [Accessed: 20-Sep-2020].
- [22] “Materiales de impresión 3D (I): PLA (ácido poliláctico) | HXX.” [Online]. Available: <http://hxx.es/2015/03/12/materiales-de-impresion-3d-i-pla-acido-polilactico/>. [Accessed: 20-Sep-2020].
- [23] L. C, “El filamento de ABS en la impresión 3D - 3Dnatives.” [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/filamento-de-abs-impresion-3d-06062019/>. [Accessed: 20-Sep-2020].
- [24] “Material Properties of Thermoplastic PETG - Exceptionally Durable.” [Online]. Available: <https://dielectricmfg.com/knowledge-base/petg/>. [Accessed: 20-Sep-2020].
- [25] “PP (Polipropileno) | Filament2Print.” [Online]. Available: <https://filament2print.com/es/pp-polipropileno/1148-pp-polipropileno.html>. [Accessed: 21-Sep-2020].
- [26] D. Chen, S. Heyer, S. Ibbotson, K. Salonitis, J. G. Steingrímsson, and S. Thiede, “Direct digital manufacturing: Definition, evolution, and sustainability implications,” *J. Clean. Prod.*, vol. 107, pp. 615–625, 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.05.009.
- [27] M. Mani, K. W. Lyons, and S. K. Gupta, “Sustainability characterization for additive



- manufacturing,” *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 119, pp. 419–428, 2014, doi: 10.6028/jres.119.016.
- [28] S. Ford and M. Despeisse, “Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges,” *J. Clean. Prod.*, vol. 137, pp. 1573–1587, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.
- [29] P. Zhao, C. Rao, F. Gu, N. Sharmin, and J. Fu, “Close-looped recycling of polylactic acid used in 3D printing: An experimental investigation and life cycle assessment,” *J. Clean. Prod.*, vol. 197, pp. 1046–1055, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.06.275.
- [30] F. A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, S. Hoppe, and M. Camargo, “Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues,” *Addit. Manuf.*, vol. 17, pp. 87–105, 2017, doi: 10.1016/j.addma.2017.05.013.
- [31] X. Tian, T. Liu, Q. Wang, A. Dilmurat, D. Li, and G. Ziegmann, “Recycling and remanufacturing of 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites,” *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 1609–1618, 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.11.139.
- [32] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, “3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 442–458, 2017, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.11.034.
- [33] “Ultimaker S5: Reliability at scale.” [Online]. Available: <https://ultimaker.com/3d-printers/ultimaker-s5>. [Accessed: 19-Sep-2020].
- [34] T. Method and T. Note, “TEST METHOD TECH NOTE PLASTICS ASTM D638 Tensile Properties of Plastics,” pp. 3–4, 2009.
- [35] “ASTM D638 Tensile Properties of Plastics TEST METHOD SUMMARY Pneumatic Vise Grips Manual Wedge Grips Screw Action Grips Manual Vise Grips Serrated Grip Faces Diamond Tip Faces Flat Rubber Faces.”
- [36] J. Jiang, X. Xu, and J. Stringer, “Optimization of process planning for reducing material waste in extrusion based additive manufacturing,” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 59, no. April, pp. 317–325, 2019, doi: 10.1016/j.rcim.2019.05.007.
- [37] Umwelt Bundesamt, “ProBas - ¡Bienvenido a ProBas!” [Online]. Available: <https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>. [Accessed: 19-Sep-2020].
- [38] R. Z. Khoo, H. Ismail, and W. S. Chow, “Thermal and Morphological Properties of Poly (Lactic Acid)/Nanocellulose Nanocomposites,” *Procedia Chem.*, vol. 19, pp. 788–794, 2016, doi: 10.1016/j.proche.2016.03.086.
- [39] “Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) Propiedades típicas Generic ABS | UL Prospector.” [Online]. Available: <https://plastics.ulprospector.com/es/generics/1/c/t/acrilonitrilo-butadieno-estireno-abs-properties-processing>. [Accessed: 20-Sep-2020].



- [40] M. Rahman, N. R. Schott, and L. K. Sadhu, "Glass Transition of ABS in 3D Printing," *Comsol Bost.* 2016, p. 3, 2016.
- [41] "Filamento 3D flexible Flexfill TPU -Shore 98A." [Online]. Available: <https://filament2print.com/es/flexibles-tpe-tpu/1140-flexfill-98a-tpu.html>. [Accessed: 20-Sep-2020].
- [42] K. H. Hsieh, K. H. Liao, E. H. H. Lai, B. S. Lee, C. Y. Lee, and C. P. Lin, "A Novel Polyurethane-based Root Canal-obturation Material and Urethane Acrylate-based Root Canal Sealer-Part I: Synthesis and Evaluation of Mechanical and Thermal Properties," *J. Endod.*, vol. 34, no. 3, pp. 303–305, 2008, doi: 10.1016/j.joen.2007.12.006.
- [43] "Overview of materials for PETG Copolyester." [Online]. Available: [http://www.matweb.com/search/datasheet\\_print.aspx?matguid=4de1c85bb946406a86c52b688e3810d0](http://www.matweb.com/search/datasheet_print.aspx?matguid=4de1c85bb946406a86c52b688e3810d0). [Accessed: 20-Sep-2020].
- [44] M. Kováčová *et al.*, "Novel hybrid PETG composites for 3D printing," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 9, 2020, doi: 10.3390/app10093062.
- [45] "Polypropylene - online catalogue source - supplier of research materials in small quantities - Goodfellow." [Online]. Available: <http://www.goodfellow.com/E/Polypropylene.html>. [Accessed: 20-Sep-2020].
- [46] Karimi Mina, "(9) What is the latent heat of polypropylene?" [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/post/What\\_is\\_the\\_latent\\_heat\\_of\\_polypropylene](https://www.researchgate.net/post/What_is_the_latent_heat_of_polypropylene). [Accessed: 20-Sep-2020].
- [47] B. Sundarakani, R. De Souza, M. Goh, S. M. Wagner, and S. Manikandan, "Modeling carbon footprints across the supply chain," in *International Journal of Production Economics*, 2010, vol. 128, no. 1, pp. 43–50, doi: 10.1016/j.ijpe.2010.01.018.
- [48] M. B. GARCIA, Trabajo, and D. M. Universitario, "Iniciación a la investigación en ingeniería química y del medio ambiente," 2011.
- [49] R. Huang *et al.*, "Energy and emissions saving potential of additive manufacturing: the case of lightweight aircraft components," *J. Clean. Prod.*, vol. 135, pp. 1559–1570, 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.109.