



Escuela Superior de Ciencias Experimentales y Tecnología

GRADO EN INGENIERÍA AMBIENTAL
Curso académico 2023/24
Trabajo Fin de Grado

**RECICLADO Y ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DEL
POLIESTIRENO**

Marta Martín Arranz

TABLA DE CONTENIDO

Tabla de contenido.....	2
1. RESUMEN	3
2.INTRODUCCIÓN.....	4
2.1. El poliestireno.....	4
2.2. La acetona	6
2.3. Fundamentos de la tecnología Solvent-cast 3D printing	7
2.4. Análisis de Ciclo de Vida	8
3.OBJETIVOS.....	8
4. METODOLOGIA.....	9
4.1. Materiales	9
4.2 Metodología y equipos:	10
Proceso experimental	10
Análisis de Ciclo de Vida.....	14
6. RESULTADOS y discusión.....	17
6.1 Minimización en volumen y peso de las bandejas de poliestireno.....	17
6.2. Cinética de la evaporación de la acetona.....	19
6.3. Caracterización por microscopía IR.....	22
6.4. Determinación de la viscosidad del poliestireno reciclado.....	23
6.5. Impresión 3D	25
6.6. Análisis de ciclo de vida.....	29
Caso base: Reciclado del Poliestireno mediante impresión 3D	29
Comparativa de Casos.....	34
7. CONCLUSIONES	38

1. RESUMEN

Se estima que una gran cantidad de toneladas de plásticos provenientes del petróleo y carbón son desechadas sin pasar por ningún tipo de proceso de reciclaje. Así pues, se valora que los plásticos de un solo uso contribuirán con entre el 5% y el 10% de las emisiones de efecto invernadero [1]. Una de las principales razones para realizar este estudio es concienciar sobre la crisis medioambiental, concretamente con la creación y el consumo de materiales plásticos, que tiene como consecuencia la generación de residuos no biodegradables y el agotamiento de recursos limitados.

Por otro lado, la impresión 3D es una técnica de fabricación muy popular actualmente con un crecimiento exponencial en los últimos 10 años debido a su versatilidad y economía. La impresión 3D ha supuesto una revolución al bajar precios de fabricación siendo la mejor opción en términos de coste y rapidez para la producción. Más recientemente, se ha introducido la posibilidad de fabricar con diversidad y mezcla de materiales que, hasta hace pocos años, no se podían fabricar con los procesos conocidos hasta ahora, basta con utilizar un software para crear un modelo. El crecimiento del mercado global de esta nueva tecnología de impresión 3D se prevé en 34.5 billones de dólares desde este año hasta el 2028 [2]. Así pues, el continuo desarrollo de esta tecnología permite que sea más asequible para el usuario en costes y manejo, permitiendo la customización y personalización de la misma.

La combinación de estos dos campos, el tratamiento de los residuos de EPS y la fabricación aditiva da origen a este TFG centrado en el empleo de tecnología de impresión 3D para la gestión del residuo plástico de poliestireno expandido, presentando una clara ventaja sobre los sistemas convencionales, como es el tratamiento del residuo en el mismo lugar de su generación, eliminando la etapa de transporte de residuos para su reciclaje al centro de tratamiento. Esto supone una importante reducción en costes energéticos, si se adopta esta tecnología a nivel domiciliario, por ejemplo. Este TFG se centra por tanto en la posibilidad minimización y valorización material de un determinado tipo de plástico reciclado, el **poliestireno expandido (EPS)**, mediante su uso como material de aporte en impresoras 3D. Además, se realizará un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) de la propuesta de reciclado de este residuo polimérico.

La razón principal que ha motivado la realización de este estudio es la concienciación frente a la problemática de la crisis ambiental, concretamente con la creación y consumo de materiales plásticos, derivando en la generación de residuos no biodegradables y agotamiento de recursos limitados.

2.INTRODUCCIÓN

Este estudio se centra en el residuo de poliestireno expandido (EPS) una vez finalizada su vida útil, ya que se considera un material no biodegradable de gran interés. Se analizará la posibilidad de utilizar EPS reciclado (EPSr) como material de aporte en impresoras 3D, minimizando así su impacto medioambiental. Para ello, se realizará un estudio detallado de las propiedades y características del poliestireno reciclado y de la técnica de impresión 3D para establecer las condiciones óptimas de trabajo de la impresión 3D. Finalmente, se realizará un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) centrado tanto en el material como en la técnica.

2.1. El poliestireno

El poliestireno comercial (PS) es un material polimérico termoplástico amorfo denominado químicamente como polivinilbenceno, que proviene principalmente de materiales fósiles como petróleo o carbón.

Se forma a partir de la polimerización del monómero de estireno (fig.1), obtenido por primera vez a partir de la destilación de un tipo de resina, el ámbar [3]. Tras ello, empezó a sintetizarse a partir de materiales fósiles, como se menciona anteriormente, industrializándose el proceso de obtención del poliestireno (fig.2) en el año 1930 por la empresa alemana BASF, y, a partir de la década de los 50, se sintetiza a nivel industrial bajo el nombre de marca Stryopor [4]

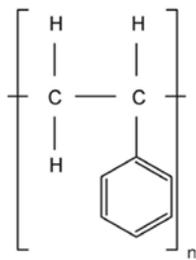


Figura 1: Fórmula química de la molécula del monómero de estireno

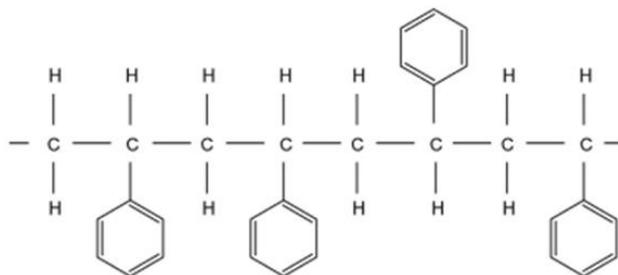


Figura 2: Fórmula química de la macromolécula polimérica de poliestireno

El poliestireno expandido se fabrica por una técnica de procesado que requiere la aplicación de vapor de agua y la introducción de un agente de expansión, generalmente pentano para aumentar el tamaño de las moléculas hasta cuarenta veces su volumen [5]. Posteriormente el agente expansor se elimina por ebullición y las perlas de EPS se introducen en el molde para conformar la pieza a generar [6]. El poliestireno expandido es un material con las propiedades físicas típicas de la mayoría de los polímeros entre las que destacan: que es un buen aislante térmico, presenta elevada elasticidad, baja densidad, etc. Y, por otro lado, en cuanto a sus propiedades químicas, se trata de un material inocuo y estable, como puede observarse en la tabla 1 [7]. Así pues, se utiliza comúnmente para el aislamiento en materiales de construcción y materiales de envasado y embalaje de productos.

No obstante, se trata de un material no biodegradable por lo que una vez finalizado su ciclo de vida útil permanece durante largos periodos de tiempo ya que el medioambiente es incapaz de asimilarlo [4]. Estos residuos suelen acabar en vertederos, océanos y otros ecosistemas naturales, dañando la fauna y la flora. Por este motivo es de vital importancia la realización de estudios en los que se presenten alternativas para la correcta gestión de los residuos generados de poliestireno.

A pesar de ello, actualmente, se sigue una tendencia de aumento de la producción de plástico a nivel mundial. Según un estudio emitido el año 2022 por la asociación empresarial Plastics Europe, la generación de plásticos en el año 2021 asciende a 390,7 millones de toneladas, incrementando en 15,2 millones la producción del año 2020. De este total, un tercio correspondería a China como país con mayor generación, seguido de Europa, con un valor de fabricación de 57,2 millones de toneladas, representando un 18% del total.

En la Figura 3, puede observarse la tendencia de crecimiento indicada, donde cabe destacar que el crecimiento de la producción de este material se vio paralizado durante el año 2020 debido a la pandemia de la COVID-19 [8]. En rojo se representan los plásticos de origen fósil que incluyen termoplásticos de origen fósil, termoestables y PUR. En verde se representan los plásticos reciclados post-consumo, con datos desarrollados en 2018, los datos de otros años son estimaciones. En amarillo se representan los plásticos de origen biológico, incluidos los plásticos bio-retribuidos en los datos del 2021.



Figura 3. Representación de la producción de plásticos a nivel mundial del 2018 al 2021. La mayor parte de la producción de plásticos tiene origen fósil, representando el 90,2% de la misma [8].

Las diferentes formas de tratamiento de los residuos plásticos al finalizar su vida útil son la deposición en vertedero, la recuperación energética y el reciclaje material, siendo la más común de todas, la primera.

En el caso del poliestireno expandido, debido a la complejidad del proceso y la baja rentabilidad económica de la gestión tras su consumo, la mayoría de los residuos terminan en vertederos o incinerados, lo que contribuye a la emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes [9].

2.2. La acetona

El poliestireno es soluble en acetona, por lo que se ha elegido este procedimiento de disolución para minimizar el impacto, tanto másico como volumétrico, del poliestireno expandido una vez finalizado su ciclo de vida útil.

La acetona presenta una gran capacidad de disolución de una alta gama de sustancias y su baja toxicidad y la facilidad de la disposición de la misma por los usuarios, lo convierte un uno de los disolventes más comunes en la industria. Se trata de un compuesto orgánico cuya fórmula química es CH_3COCH_3 líquido en condiciones atmosféricas [10]. Algunas de las características de la acetona se refleja en la Tabla 1. Como se puede observar, este disolvente dispone de características tales como una baja viscosidad, tratándose además de un líquido incoloro, inflamable y altamente volátil.

Tabla 1. Propiedades físicas del poliestireno y de la acetona

Presión de vapor a 20°C (bar)	0,246
Presión de vapor a 25 °C (bar)	0,308
Presión de vapor a 30 °C (bar)	0,378
Presión de vapor a 40 °C (bar)	0,562
Presión de vapor a 50 °C (bar)	0,828
Temperatura de transición vítrea Tg(°C)	80-105
Temperatura de descomposición (°C)	443
Módulo de Young (MPa)	3100-330
Coefficiente lineal de expansión térmica (1/K)	50-70
Capacidad calorífica específica (J/(g · K))	1,3
Conductividad térmica (W/(m· K))	0,14-0,18
Densidad (g/L)	1,05

2.3. Fundamentos de la tecnología Solvent-cast 3D printing

Existen muchos tipos de tecnologías de impresión 3D en la actualidad, que pueden basarse en la extrusión de un material termoplástico previamente fundido, como es el caso del Modelado por deposición fundida. A pesar de ser este método uno de los procedimientos más ampliamente utilizados, hay otras tecnologías como el sinterizado selectivo por láser, la cual basa su funcionamiento en la fusión y solidificación del material en polvo mediante un láser de alta potencia [11].

El procedimiento de impresión 3D seleccionado para llevar a cabo este trabajo es la de **solvent-cast-3D-printing** basada en la introducción del material de aporte en un depósito por el que saldrá a través de una boquilla y su deposición capa a capa en la plataforma correspondiente. Así pues, una de las principales diferencias de este tipo de tecnología respecto a las otras existentes en el mercado, es el estado en el que se encuentra el material inyectado, de alta plasticidad sin necesidad de aporte de calor, al disolverse en el disolvente en contraposición a las formas convencionales de filamentos, granos, polvo, etc [12].

Así pues, este tipo de tecnología se basa en la inyección del material plástico con la mínima cantidad de disolvente que, según es extruido, solidifica debido a la evaporación del solvente volátil.

El punto clave y novedoso de esta nueva tecnología propuesta es que el material a introducir en la boquilla no requiere un aporte de calor para llevarlo al estado de alta plasticidad, sino que, para conseguirlo, únicamente es necesario disolver el poliestireno en acetona.

2.4. Análisis de Ciclo de Vida

Este procedimiento tiene sus orígenes en los años sesenta [13] y su definición se estableció en 1993 por la SETAC (*Society of Environmental Toxicology And Chemistry*), formalizándose como una herramienta de gestión con la cual se pretende evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad para lograr minimizar el impacto ambiental mediante el estudio de las entradas y salidas de materia y energía al entorno, para así determinar y valorar el impacto en el medio ambiente [14].

3.OBJETIVOS

El objetivo general de este TFG es desarrollar un procedimiento de reciclado material para el EPS utilizando tecnología de fabricación aditiva solvent-cast-3D-printing y analizar su impacto y viabilidad medioambiental en la actualidad, mediante la técnica de ACV. Así pues, se plantea minimizar el impacto del EPS como residuo una vez llegado el final de su vida útil, considerándolo materia prima para fabricación de nuevos productos por impresión 3D, integrándose en el modelo de consumo de Economía Circular.

Este objetivo general se puede concretar en la implementación de un sistema de tratamiento de residuos de bandejas de poliestireno a nivel particular, en el mismo lugar de generación del residuo por los propios generadores del mismo, mediante la adquisición de impresoras 3D para fabricación de nuevos productos.

4. METODOLOGIA

4.1. Materiales

Para realizar el presente estudio se ha trabajado con bandejas de **poliestireno expandido** recogidas en los campus de Quintana y de Móstoles de la Universidad Rey Juan Carlos durante los cursos académicos 2022 y 2023. Para ello se organizaron puntos de recogida con la ayuda de la asociación ecologista Ecotopía Ambiental. La figura 4 muestra los carteles diseñados para la difusión de la campaña.



Figura 4: Propuesta de recogida de bandejas de poliestireno de la iniciativa realizada en la URJC

Por otro lado, el disolvente empleado es la **acetona** de la casa comercial Labkem

4.2 Metodología y equipos:

Proceso experimental

Se ha utilizado una **balanza de precisión** modelo Sartorius para estudiar la cinética del proceso de evaporación de la acetona, y cuantificar la minimización de volumen y de masa en el proceso de disolución del PS en acetona. así como para la toma de datos para el análisis del ciclo de vida

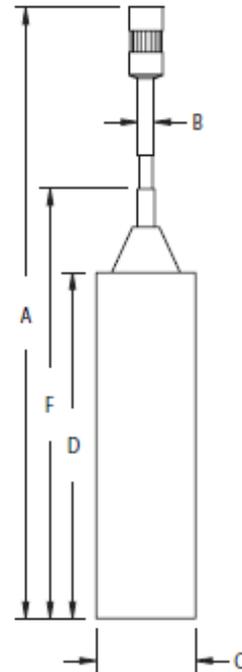


Figura 5. Balanza de precisión.

Se ha utilizado un **viscosímetro** Brookfield DV2T (fig. 6a) para realizar las mediciones de viscosidad de la disolución de EPSr y acetona. El equipo consta de un conjunto de spindle con diferentes superficies de contacto y el elegido es el LV1. Para desarrollar el experimento se requiere comenzar con el encendido y la realización del proceso de Autozero, para el calibrado del equipo. A continuación, se establecen los parámetros a través de la pantalla táctil del Viscosímetro o a través del software externo conectado al mismo. Así pues, para una correcta medición de la viscosidad, es necesario seleccionar, primeramente, a base de observación prueba y error, la elección del spindle y velocidad de giro más adecuada para la toma de datos, generando un método de medida. Al realizar la evaluación previa para una medición precisa, el esfuerzo de torsión debe tomar valores de entre un 40 y un 60%. Es conveniente seleccionar el spindle de mayor superficie de contacto, LV1, cuyas dimensiones son 0,9421cm de radio, 7,493cm de longitud efectiva y 6,510cm de longitud real (fig.6b)



(a)



(b)

Figura 6. (a) Viscosimetro y (b) spindle utilizado LV1.

Se ha utilizado **espectrometría infrarroja IR** para el análisis estructural del poliestireno tanto antes como después del proceso de disolución en acetona. El modelo de espectrómetro usado es de la marca iS50 ATR. La ATR es una técnica de espectroscopia infrarroja basada en la reflexión total interna de la radiación infrarroja en una superficie de cristal altamente refractante, es decir, se mide la radiación reflejada atenuada. A diferencia de la espectroscopia infrarroja, donde se obtiene la información a partir de la frecuencia de vibración de cada enlace químico de las moléculas al incidir luz infrarroja sobre las mismas [15], en la ATR la luz no se absorbe, sino que se refleja en la interfaz entre el cristal, sobre el que se apoya la muestra, y la muestra, lo que provoca que parte de la radiación infrarroja se transmita a la misma y otra parte se refleje de nuevo a la superficie refractante.



Figura 7. Fotografía iS50 ATR

La **impresora 3D** utilizada (fig. 8) es modelo BCN30+ y consta de 2015. Se han utilizado dos tipos de **jeringa** utilizada es Displomed ECOJECT de 2 mL y se han comprado **agujas** de acero inoxidable de punta roma (fig. 9) con cerradura Luer de la marca Benecreat 16PCS de diferentes diámetros (fig. 9), cuyos diámetros varían de 10G (3,5 mm) a 24 G (0,55 mm).

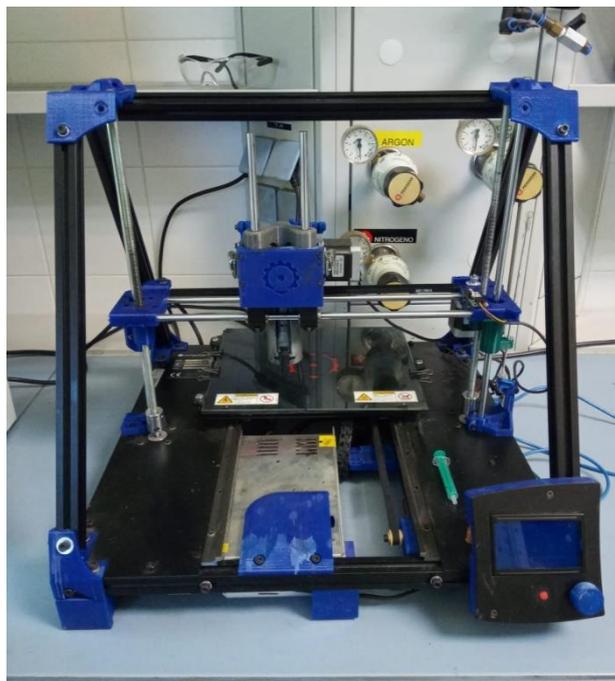


Figura 8. Impresora 3D utilizada



Figura 9. Jeringas de acero inoxidable con diferentes diámetros

A través del software Slic3r se establecen los parámetros de la impresión, además del diseño en 2D del recorrido de impresión que se realiza durante la extrusión (fig. 10). Esta información se exporta al programa Repetier Host, a través del cual se controla el proceso de impresión sobre la plataforma.

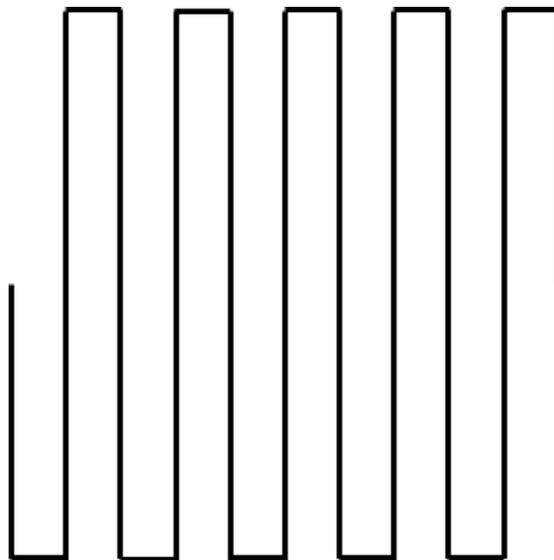


Figura 10: Circuito de recorrido de impresión en 2D

Análisis de Ciclo de Vida

Por último, para el análisis del ciclo de vida se ha utilizado el programa **SimaPro 9.4**, que permite cuantificar los impactos ambientales y huella de carbono de un producto o proceso a través de su ciclo de vida [16].

Para llevar a cabo esta cuantificación se debe seguir la metodología existente descrita en la norma ISO 14040:2006, la cual consta de los siguientes pasos, representados en la Figura 11:

- I. Definición objetivos y alcance: se establecen los objetivos específicos del estudio, límites y unidades funcionales, con motivo de poder comparar los distintos escenarios presentados. La unidad funcional se refiere a la unidad a la que van referidos los datos del sistema [17], pudiendo ser de tipo físico, donde se compara la cuantificación de la obtención producto, o funcional, donde se compara la función del producto para un mismo cometido.
- II. Análisis de inventario: se describen los flujos de entrada y salida de materia y energía para cada etapa en cada escenario mediante la recopilación de datos.
- III. Evaluación del impacto: se obtiene información sobre la afección al medio de los flujos de entrada y salida especificados en el inventario, convirtiéndose en datos interpretables [16].
- IV. Interpretación de los resultados: consiste en el análisis de los resultados obtenidos en la evaluación de impacto considerando las limitaciones del estudio. Así pues, pueden sacarse conclusiones comparando los diferentes escenarios en función de la cuantificación de impacto o la etapa donde se producen los mismos.

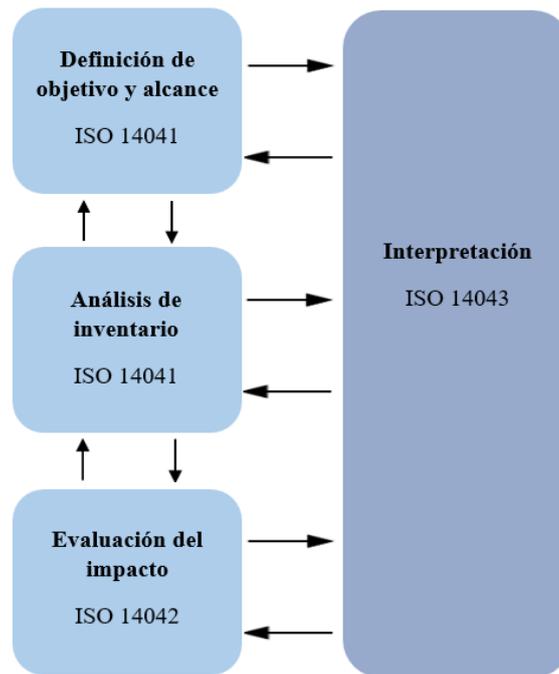


Figura 11. Estructura actual ISO 14040: Gestión ambiental. Análisis de Ciclo de Vida

- *Objetivo y alcance*

Se establece el objetivo del estudio, siendo en este caso el análisis ambiental del proceso de reciclaje y tratado de bandejas de EPS mediante impresión 3D. Para ello, se cuantificarán los impactos asociados a dicho proceso para determinar sus principales causas, tras lo cual, se valorará la posibilidad de incluir mejoras en el mismo. Asimismo, se pretende comparar los resultados obtenidos, en el caso base descrito, con los correspondientes a los provenientes de tratamientos más convencionales, tales como la deposición en vertedero y revalorización energética.

Junto a la definición del objetivo del análisis, se establece la unidad funcional del mismo, que en este caso será física, es decir, se requiere definir la cantidad de producto a obtener para valorar los resultados y poder ser comparados. Para este trabajo la unidad funcional será 1 kg de poliestireno a tratar mediante los procesos de gestión de residuos seleccionados.

Los límites de cada uno de los escenarios estudiados se muestran a continuación:

Caso base: Reciclado del Poliestireno mediante impresión 3D

Para el estudio del Caso base se establece un diagrama de bloques, (fig. 12) con objeto de describir las entradas y salidas de las diferentes etapas que conforman el estudio.

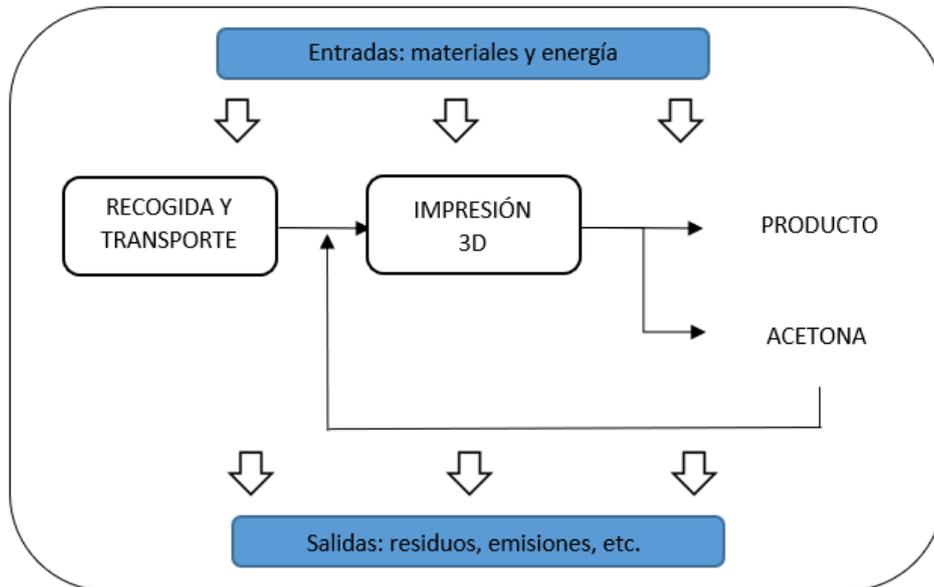


Figura 12. Diagrama de bloques del proceso correspondiente al Escenario 1

Como se ha mencionado anteriormente, las bandejas de EPS fueron recogidas tanto en el campus de la URJC de Quintana como en el de Móstoles y fueron trasladados posteriormente al laboratorio de la primera planta del Departamental I del campus de Móstoles. Una vez allí, se lleva a cabo el tratamiento del material, consistente en la disolución del mismo en acetona e introducción en la impresora 3D, donde se reproduce el diseño 2D establecido. Tras ello, se obtendría, por un lado, el producto o EPS impreso y, por otro, la acetona recuperada.

Cabe destacar que se ha considerado que la cantidad de EPS recolectado en los diferentes Campus es la mitad de la unidad funcional, lo cual es idéntico para todos los casos.

Comparativa con otros escenarios de fin de vida del EPS: Tratamiento de fin de vida tradicionales

Se propone estudiar, en primer lugar, el impacto generado por la recogida y deposición de 1Kg de Poliestireno Expandido en el vertedero Urbano de Pinto. En este caso, los residuos recogidos se transportan hasta el Campus de Móstoles, desde el cual se llevan al vertedero mencionado,

donde serán tratados mediante deposición en el mismo, escogido debido a la cercanía que presentan ambos puntos.

Por último, se presenta el segundo caso alternativo, donde las bandejas de EPS recogidas pasarían por el proceso de revalorización energética la planta de incineración de Las Lomas del Parque Tecnológico de Valdemingómez. El material recogido en el Campus de Móstoles será trasladado hasta el campus de Quintana, debido a que este se encuentra más cerca que el de Móstoles de la incineradora seleccionada. A continuación, se representa en la Figura 13 el diagrama de bloques de los límites de todos los casos de estudio

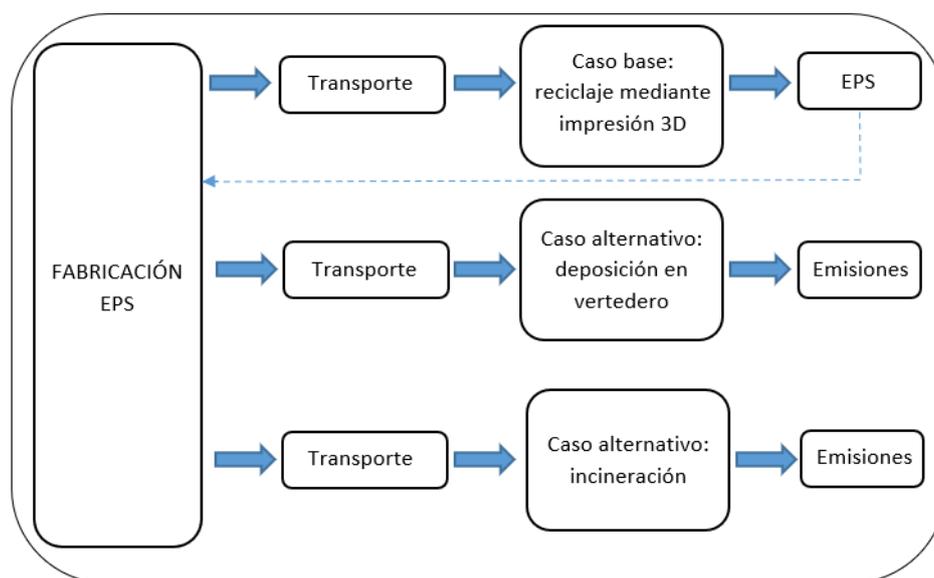


Figura 13. Descripción límites del sistema

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1 Minimización en volumen y peso de las bandejas de poliestireno

La minimización en volumen de las bandejas de EPS recogidas se realiza mediante la disolución de las mismas en acetona, utilizando dos recipientes por separado, una para las bandejas de poliestireno blancas sin aditivos y, en otro recipiente, se recogen las bandejas de poliestireno coloreadas con aditivos, confiriéndole un color negro a la disolución como se observa en la Figura 15, debido precisamente a la presencia de estos componentes adicionales.

Primeramente, se mide el volumen y el peso inicial de la totalidad de las bandejas, antes de su disolución en acetona y posteriormente se calcula el porcentaje de reducción en volumen del residuo. Así pues, el volumen inicial ocupado por el conjunto de las bandejas es de 38,39L, el cual se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Volumen espacial total de las bandejas de EPS

Para realizar el proceso de disolución, se introducen las bandejas en una cantidad inicial de acetona de 200 mL, separando las bandejas con aditivos de las que tienen color blanco sin ningún tipo de aditivo (fig. 15). Se añade más disolvente a medida que las disoluciones se van saturando. Finalmente, para disolver el volumen completo de bandejas de EPS se requieren 1,1L de acetona, tal como se muestra en la Figura 15, por lo que la minimización volumétrica calculada es del 97%. La solubilización del PS expandido en acetona elimina las burbujas de aire presente en el material reduciendo considerablemente su volumen.



Figura 15. Disoluciones de las bandejas con y sin aditivos en acetona

Se realiza, por otro lado, la cuantificación de reducción de masa de las bandejas de EPS al ser disueltas en acetona. Para ello, se pesaron las bandejas previamente a la disolución en acetona, y después de la disolución en el disolvente. Con estos valores se realiza el pesaje de la disolución y se obtienen los gramos de EPS disuelto, con lo que se puede valorar el porcentaje de pérdida de masa obtenido.

Se ha realizado tres repeticiones de esta medición, obteniéndose una media de pérdida de masa de 0,73 g, lo que se traduce en un porcentaje de disminución de masa de 0,74%.

6.2. Cinética de la evaporación de la acetona.

El filamento final extruido que quedará depositado en la cama de la impresora 3D, como se ha mencionado anteriormente, será el poliestireno solidificado una vez evaporada la acetona.

A través del siguiente ensayo se pretende estimar la cinética de evaporación de la acetona que se encuentra mezclada con el plástico, mediante un estudio cinético de gravimetría, para el cual se han desarrollado dos metodologías.

Para la primera, se dispone una pequeña cantidad de entre 1,6 y 1,7g de la disolución de EPSr en recipientes, en este caso, tapones de plástico previamente pesados, y se coloca en una báscula, donde se anota el peso inicial del tapón junto a la disolución.

Debido a la evaporación de la acetona, el peso disminuye con el tiempo hasta alcanzar un punto de estabilización. La diferencia de este valor estable y la masa inicial del tapón, se considera el peso en seco de la muestra de EPSr.

Para comenzar con el experimento se lleva a cabo de la medición de la masa de los tapones en una báscula y, tras ello, se extruye, de una jeringuilla sin punta de aguja, la muestra tomada de EPSr en disolución con acetona. Este será el momento cero del experimento, a partir del cual se tomarán medidas en la báscula de la pérdida de masa cada minuto, hasta que no se observa variación en la pesada:

Con esta medición se pretende establecer un punto de estabilización de la masa, en la que la evaporación de la acetona es mínima y constante, entendiéndose este valor en gramos de la muestra como el peso sólido. Como puede observarse en la figura 16, existen dos velocidades claramente distintas. Una primera velocidad correspondiente a la pendiente del tramo de tiempo de 0 a 7 minutos y otra segunda velocidad más ralentizada a partir de los 7 minutos.

Estos resultados indican que la evaporación del disolvente está favorecida en los instantes iniciales donde la viscosidad del EPSr se mantiene en valores bajos, pero transcurridos los 7 minutos el material aumenta su viscosidad comenzando el proceso de solidificación impidiendo la difusión de las moléculas de disolvente del interior hacia la superficie de evaporación. Esto indica que la utilización de este material para impresión 3D por solvent-casting es adecuada siempre que se trabajen a velocidades de impresión bajas. Estas tendencias pueden observarse a través de la representación de los valores obtenidos en la Figura 16.

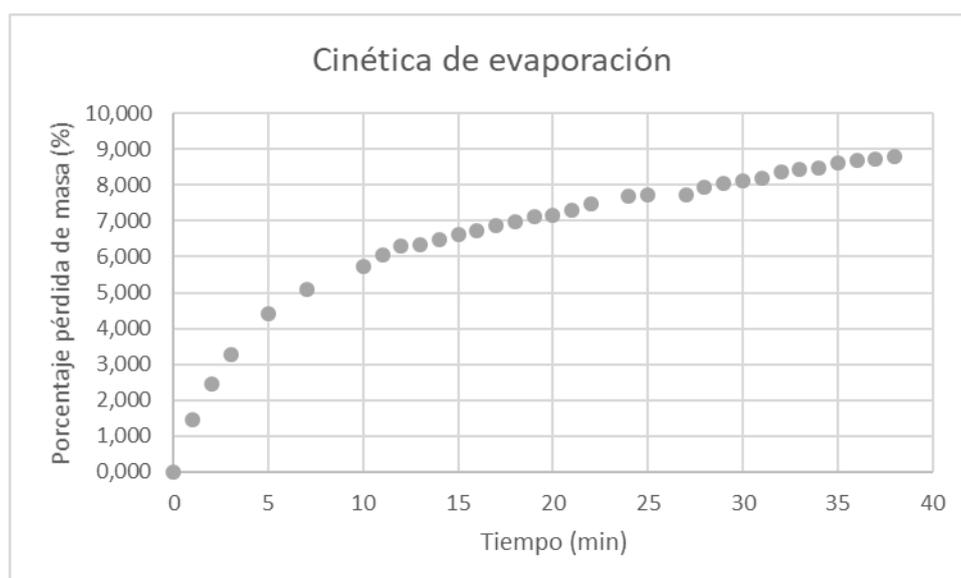


Figura 16. Cinética de evaporación de la acetona correspondiente a la primera metodología

Este procedimiento se ha realizado sobre la muestra de EPSr sin aditivos y con aditivos obteniéndose valores similares, mostrado en la figura anterior. Además, para minimizar los errores, se ha realizado el experimento por triplicado y se han empleado los valores medios de estas medidas.

Para obtener valores más cercanos a las condiciones reales del experimento y evitar que las paredes del recipiente de plástico obstaculicen la evaporación del disolvente, se utiliza una segunda metodología. Este segundo método consiste en llevar a cabo estudios de gravimetría para EPSr extruido con puntas de jeringuilla de diámetros de 10 (3,5 mm), 14 (2/2,1 mm), 20 (0,9 mm) y 24 (0,55 mm) G, estudiando así los diámetros de punta de jeringuilla óptimos. Para ello se mide la reducción en peso cada minuto hasta alcanzar 30 minutos. Se realiza la repetición de la técnica tres veces, de la cual se saca la media de reducción y se ve representada en la siguiente gráfica.

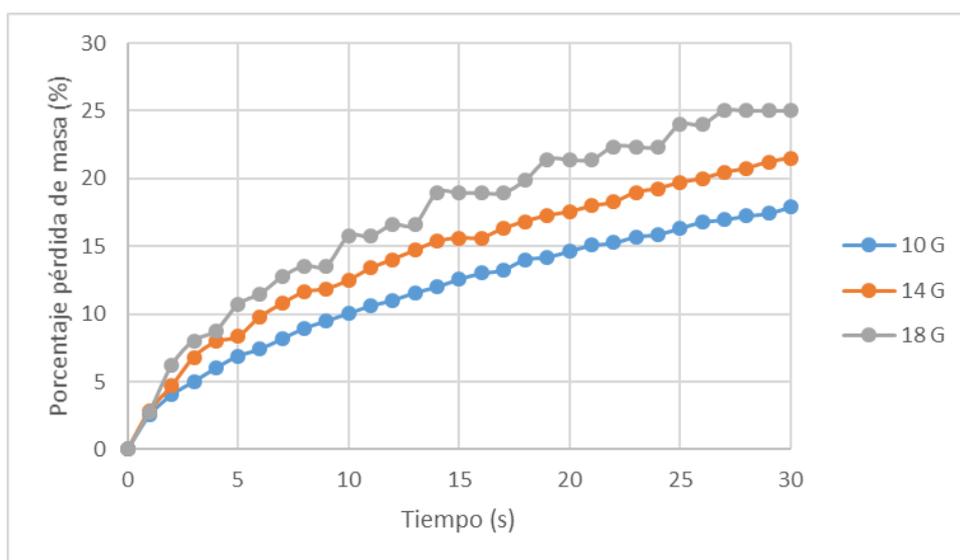


Figura 17. Cinética de evaporación de la acetona para segunda metodología

Se concluye que a medida que la extrusión se realiza con un diámetro menor de punta de jeringuilla, el tiempo en el que la solidificación alcanza el estado estacionario es también menor. Esto puede deberse al área superficial de contacto de EPSr con el ambiente, la cual aumenta con una extrusión de filamento menor.

6.3. Caracterización por microscopía IR

Se ha realizado una caracterización estructural por espectrometría IR a una muestra de una bandeja PS postconsumo y a una muestra de poliestireno disuelto en acetona sin aditivos (fig.19), para analizar la pureza y la composición del material objeto de estudio el poliestireno reciclado disuelto en acetona.

Del análisis del IR del PS virgen consultado en la bibliografía [17] se observan las siguientes bandas: entre 3080 y 3030 aparecen varias bandas (st) del aromático de intensidad media; las bandas que nos indican la monosustitución del anillo aromático aparecen en la zona de la huella dactilar a 900, 730 y 690; además aparecen las bandas de combinación entre 2000-1600. Los grupos CH presentan una banda doble (st) entre 3000-2840 y los CH₂ dan una banda (delta) 1475-1450.

La figura 18 muestra los espectros realizados sobre las dos muestras bandeja de poliestireno (azul) y poliestireno disuelto en acetona (roja), donde se puede observar las bandas características del poliestireno:

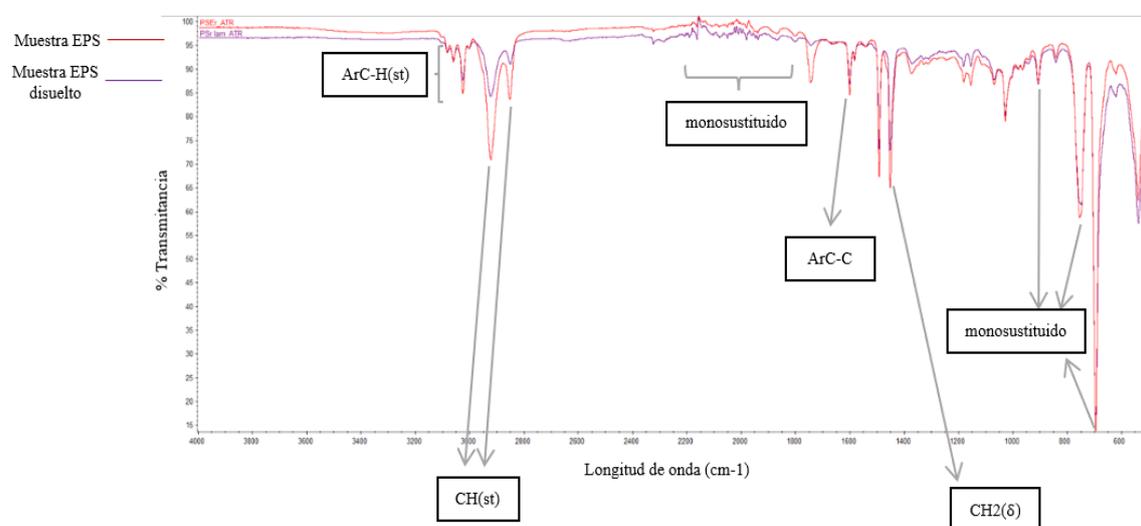


Figura 19. espectro de IR del PS (SDBS) experimental

Se reconocen en primer lugar las bandas (st) del aromático de intensidad media. A continuación, se observa con claridad las bandas de monosustitución de la huella dactilar, encontrándose en las mismas longitudes de onda, excepto la más alta, la cual se aproxima más a 1000 que a el valor original de 900. Pero, en cuanto a la combinación de monosustitución, no se aprecia con la misma

precisión su aparición. Por último, se distinguen los grupos CH a través de la banda doble (st) y los CH₂ con la banda (delta), todas ellas en la longitud de onda e intensidad original.

El espectro de IR muestra que el PS post consumo reciclado en acetona no muestra degradación significativa por la acción del disolvente

6.4. Determinación de la viscosidad del poliestireno reciclado

Se ha realizado además un estudio de la viscosidad del bolo de polímero a temperatura ambiente una vez se ha disuelto en acetona. Con este ensayo se pretende cuantificar y valorar la resistencia de la disolución del polímero de PS en acetona a fluir ante un esfuerzo aplicado. (González López, 2021). La viscosidad de un fluido newtoniano es la constante de proporcionalidad entre el esfuerzo cortante que se genera en el fluido para resistir el flujo y la velocidad de corte aplicada para inducir el flujo. El equipo utilizado basa su funcionamiento en la introducción de un spindle en la disolución, cuyo esfuerzo de torsión a la rotación generada proporciona el valor de la viscosidad de la mezcla en la que se sumerge. (*Texto: More Solutions to Sticky problems, 2017*)

Se han realizado medidas de viscosidad en función del método implementado, es decir, estableciendo diferentes velocidades de giro: 5, 10 y 20 RPM. Este procedimiento se realizó en ambas mezclas, sin aditivo y con aditivos, obteniéndose valores similares. Variando la velocidad de giro del spindle, desde 5 hasta 20 rpm, se valora la fluctuación del esfuerzo de torsión, con objeto de obtener valores estables entorno al rango óptimo.

Con los valores experimentales obtenidos, se obtiene, a través de la Ecuación [1], descrita en el Manual del Viscosímetro [18], los valores correspondientes a las diferentes viscosidades en función de la velocidad, las cuales se muestran en la Tabla 2.

$$\text{Viscosidad (cP)} = \left(\frac{72}{RPM} \right) \times \text{Valor viscosidad experimental} \quad [1]$$

Tabla 2: Valores de Viscosidad en función de la velocidad de giro del spindle tipo LV1

Velocidad (RPM)	Viscosidad (cP)	Torque (%)
5	4872,96	28,2
5	5028,48	29,1
5	7672,32	44,4
10	1635,12	37,9
10	1533,6	35,6
10	1857,6	43,0
15	904,32	47,1
15	927,36	48,3
15	1203,84	62,7
20	587,52	54,4
20	552,96	51,2
20	525,96	48,7

Tabla 3: Media y Desviación estándar para valores de viscosidad en función de la velocidad

Velocidad (RPM)	Media viscosidad (cP)	Desviación estándar
5	5857,92	1573,21
10	1675,44	165.72
15	1011,84	166.67
20	380,16	30.86

El estudio de la viscosidad en función de la velocidad de cizallamiento del poliestireno disuelto en acetona a temperatura ambiente se ha realizado para cuantificar y evaluar la resistencia de la solución de polímero PS en el disolvente a fluir bajo una tensión aplicada. Dicho comportamiento ayuda a cuantificar la fuerza necesaria sobre la jeringa para hacer fluir el EPS a través de la aguja. Como puede observarse en la Tabla 3, no existe una constante de proporcionalidad entre la tensión de cizallamiento generada en el fluido para resistir el flujo y la velocidad de cizallamiento aplicada para inducir el flujo. La relación entre el esfuerzo cortante y la viscosidad no permanece constante al variar la velocidad de cizallamiento., tratándose por tanto de un fluido no newtoniano. Como podemos observar en la Tabla 2, al variar la velocidad de cizallamiento, el esfuerzo de cizallamiento no varía en la misma proporción porque la viscosidad cambia al variar la velocidad de cizallamiento.

La mezcla de poliestireno y acetona muestra una viscosidad decreciente al aumentar la velocidad de cizallamiento, lo que indica un comportamiento de adelgazamiento por cizallamiento. La estructura de las moléculas de la mezcla de poliestireno y acetona cambia temporalmente cuando el husillo gira en el fluido. Las moléculas poliméricas se orientan más paralelas a la superficie del husillo. Por lo tanto, la obstaculización de la rotación del huso disminuye. Cuanto más rápida sea la rotación, más se destruye la estructura y menos se deslizan las moléculas entre sí, por lo que la viscosidad será menor.

Cabe destacar por último que, los valores de desviación estándar obtenidos en la Tabla 3, donde se indica la media de viscosidad para cada velocidad, son ligeramente elevados.

6.5. Impresión 3D

La disolución de EPSr en acetona constituye el material de aporte de la impresora 3D, donde, como se ha mencionado en la introducción, es extruida a través de una jeringuilla, sobre la plataforma que dispone de un sistema calefactor adicional.

Para optimizar el proceso de impresión 3D se han estudiado los siguientes parámetros: velocidad de impresión, diámetro de extrusión, así como la temperatura y rugosidad de la plataforma. El establecimiento de estos valores se lleva a cabo en base a los experimentos realizados y en base a prueba y error de impresión.

Cabe destacar la importancia de establecer una altura óptima del eje Z de la extrusión, la cual se realiza manualmente mediante el giro de una tuerca. Una altura incorrecta de la jeringuilla de extrusión podría llevar a error el experimento. Por lo que se busca en este caso una altura que distancie la aguja de la cama lo suficiente para imprimir sin que la fuerza ejercida sobre la primera haga que toque la plataforma, impidiendo la impresión, pero sin alejarse demasiado, quedando el producto extruido suspendido en el aire, ya que se podría solidificar y la dificultad aumentaría notablemente.

Los parámetros de impresión 3D seleccionados para la primera prueba son:

- (i) **temperatura** de la cama a **50°C**
- (ii) **rugosidad** nula ya que se empleó inicialmente una plataforma lisa
- (iii) **velocidad de impresión de 7mm/min**

(iv) se fijó el **parámetro de extrusión a un valor de 2**, refiriéndose a la fuerza empleada para la impresión del material. Así pues, para una velocidad dada, un mayor parámetro de extrusión implicaría mayor cantidad de material impreso y a su vez de espesor de filamento

Tras la primera impresión con estos parámetros iniciales se observa que es conveniente reducir la temperatura de la plataforma a 45°C ya que la configuración del equipo no permite alcanzar los 50°C.

Además, se observa que el producto impreso no solidifica con la velocidad deseada y es arrastrado por la boquilla. Así pues, se decide, por un lado, aumentar la rugosidad de la cama, lijando la superficie empleada, para dificultar el arrastre del material polimérico, y, por otro lado, se disminuye la velocidad de impresión, con objeto de permitir la evaporación de la acetona. La velocidad de impresión y el parámetro de extrusión se disminuyen en 7 veces su valor, y se realiza la impresión, tras lo cual, se comprueba que no se extruye material, debido a que los valores descritos son demasiado bajos, por lo que se ajusta hasta comprobar la fuerza mínima necesaria a aplicar para la extrusión.

Así pues, se aumentan estas tres variables, estableciendo la velocidad de impresión como 2 mm/s. La rugosidad corresponde a la de un papel de lija de grano 120 adherida a la plataforma de impresión, con objeto de incrementar la dificultad de transporte de disolución por la boquilla. Los parámetros a estudiar se muestran a continuación:

Tabla 4. Parámetros de impresión

Temperatura (°C)	25 - 50
Velocidad de extrusión (mm/s)	2 - 30
Parámetro de extrusión	2
Rugosidad	120 - liso
Punta de aguja	Sin aguja, jeringuilla en punta roma – puntas de aguja de diámetros entre 10G y 24G

En la Figura 20 se muestra el producto-2D de la impresión realizada con los parámetros del último ensayo descrito, donde, además de observarse el diseño 2D realizado, se distingue un filamento adicional, denominado “Skirt” o “Falda”. Este es extruido previamente al diseño, con objeto de que la forma del producto sea más precisa.



Figura 20. EPSr impreso en 2D sobre una superficie rugosa.

Tras examinar el producto-2D impreso se observa que no solidifica al completo, es decir, la acetona se ha evaporado en la superficie de los filamentos, pero en su interior, sigue encontrándose la disolución sin endurecer, además de gran cantidad de burbujas de aire que dejan la fibra de EPSr prácticamente hueca. Por esta razón, se valora lo siguiente: (i) disminuir el diámetro de impresión, introduciendo un valor de punta de aguja roma menor al empleado, (ii) disminuir la concentración del EPSr en la disolución para obtener menor cantidad de acetona y por ello menor cantidad de burbujas, y (iii) el calentamiento del EPS impreso por la cama calefactora aumenta el efecto mencionado, por lo que se descarta la aplicación de temperatura.

Por consiguiente, se optimiza de nuevo los parámetros de estudio en base a lo anteriormente concluido y sobre todo mediante la variación de diámetro de punta de las jeringuillas y la concentración de muestra. Así pues, se mantiene el parámetro de extrusión, se mantiene la velocidad de extrusión a 2 mm/min, sin añadir calor a la cama de la impresora.

Se encuentra que el rango óptimo de diámetro de punta de aguja es de entre **14 y 16 G**, ya que un mayor diámetro de aguja aumentaría el tiempo de solidificación y las burbujas asociadas, pero un menor valor es inviable en la impresora empleada ya se requiere mayor parámetro de extrusión, lo que conlleva que el esfuerzo generado doble la jeringuilla y disminuya la altura en el eje z, impidiendo la impresión al tocar la punta con la cama a medida que imprime.

Para optimizar la concentración se retira el exceso de la disolución, con objeto de obtener una mezcla más homogénea y mayor precisión del EPS impreso. No obstante, debido a esta disminución de disolvente, el EPS solidifica en la punta de la jeringuilla con mayor rapidez, lo que puede dar lugar al atascamiento de la misma o fallos de impresión del diseño.

Para solventar este problema se introduce, previa a la impresión, la punta de la jeringuilla en aceite de silicona, otorgando mayor lubricación a la salida.

Finalmente, se obtuvo una impresión de mayor precisión, donde, como se puede observar en la Figura 21, se añade un “skirt” más grande que da la vuelta alrededor del diseño.



Figura 21. Impresión EPS con diámetro de aguja 16 G

Pese al resultado obtenido, a medida que pasa el tiempo encontramos que van apareciendo más burbujas, obteniendo finalmente un material poroso. Así pues, los parámetros óptimos para el resultado logrado se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 5. Parámetros ensayo final

Parámetros óptimos de impresión	
Temperatura (°C)	25
Velocidad de extrusión (mm/s)	2
Parámetro de extrusión	2
Diámetro extrusión (G)	14 - 16

A raíz de los resultados obtenidos se realizan más ensayos variando el recorrido de la aguja y la velocidad de extrusión, aumentando esta última.

Así pues, fijando el resto de parámetros anteriormente descritos y escogiendo la punta de aguja de 14 G, por considerarla incluso más precisa que la de 16 G, se aumenta la velocidad de extrusión en rangos de 2 mm/s. Los resultados obtenidos a medida que este valor es mayor siguen siendo óptimos, llegando a aumentar hasta 30 mm/s, donde el resultado mostraría imperfecciones más notables. Pero, tras revisar todas las muestras, se concluye que **la velocidad más precisa es la de 12 mm/s**, cuyo resultado se muestra en la Figura 22.

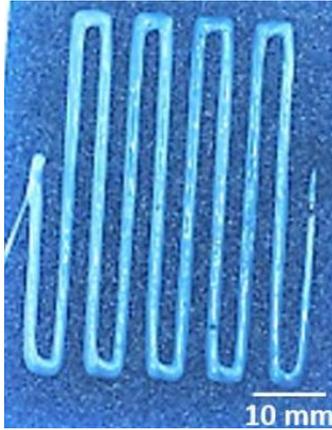


Figura 22. Impresión 3D con diámetro de agua 14 G y 12 mm/s

Esta variación sería interesante debido a que la ampliación del rango de valores de velocidad de extrusión implicaría un menor tiempo de impresión, lo que conllevaría menos consumo de energía de impresión para un mismo producto.

6.6. Análisis de ciclo de vida

Caso base: Reciclado del Poliestireno mediante impresión 3D

- *Análisis de inventario*

A continuación, se presenta el inventario para las diferentes etapas del caso base (proceso realizado en el laboratorio), consistente en la cuantificación de todas las entradas y salidas (materiales y energía) del producto o proceso del estudio. Concretamente, la cantidad de materiales empleados (poliestireno, acetona), así como la energía consumida (electricidad/calor).

- i. **Recogida y transporte:** en esta fase el elemento de entrada es la energía invertida en el transporte, de las bandejas recopiladas de EPS en el Campus de Quintana, hasta el Campus de Móstoles. El vehículo establecido como empleado para ello es un camión. Se estima que el 50% de las bandejas recogidas proceden del Campus de Quintana, por lo que se ha introducido en el sistema los kg/km equivalentes para el cálculo.
- ii. **Impresión 3D:** para poder realizar la impresión, es necesario diluir el material con acetona, por lo que este disolvente sería un elemento de entrada, cuya recuperación y recirculación al proceso será analizada. Aunque esta disolución no requiere de empleo de

energía, sí se requiere para la impresión, la cual se realiza con una velocidad de 12 mm/s. Esta energía eléctrica se ha introducido al programa SimaPro escogiendo el mix de producción eléctrico español.

Una vez descritas las etapas del inventario, se indican los valores recogidos en la siguiente tabla:

Tabla 6. Inventario etapas Caso base

Etapas	Valor	Unidad
Recogida y transporte	10,418	Kg×km
Impresión 3D		
- Acetona	1643	g
- Energía impresión	4,61	KW*h

- *Evaluación de impactos*

Caso base

Se han obtenido los resultados mediante la metodología CML 2001 del programa Simapro, anteriormente mencionado, el cual muestra los mismos en forma de categorías de impacto y el total del mismo, dependiendo de las entradas en el inventario. Estas categorías de impacto se han escogido porque se han considerado las más relevantes para el estudio y son las siguientes: Factor abiótico o agotamiento de recursos abióticos, acidificación del medio, eutrofización, calentamiento global, toxicidad humana y ecotoxicidad terrestre. De esta forma, se realiza en primer lugar el análisis de impacto del Caso base, obteniéndose, los resultados que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados del Caso base

Categoría de impacto	Acetona	Transporte	Consumo eléctrico
Factor abiótico (kg Sb eq)	3,38E-02	4,55E-05	1,71E-02
Acidificación (kg SO2 eq)	6,36E-03	1,87E-05	2,24E-02
Eutrofización (kg PO4--- eq)	1,23E-03	3,61E-06	1,15E-03
Calentamiento global (GWP100) (kg CO2 eq)	1,92E+00	6,63E-03	2,34E+00
Toxicidad humana (kg 1,4-DB eq)	6,35E-01	9,04E-04	3,64E-01
Ecotoxicidad terrestre (kg 1,4-DB eq)	3,42E-04	1,05E-06	4,51E-04

Se comprueba que los elementos que mayor impacto producen en el proceso son el consumo de energía eléctrica y el empleo de acetona. Esto puede observarse en forma de contribución a las diferentes categorías de impacto, en la Figura 23, donde se representa el porcentaje de aportación al impacto total del cada uno de los elementos al escenario propuesto:

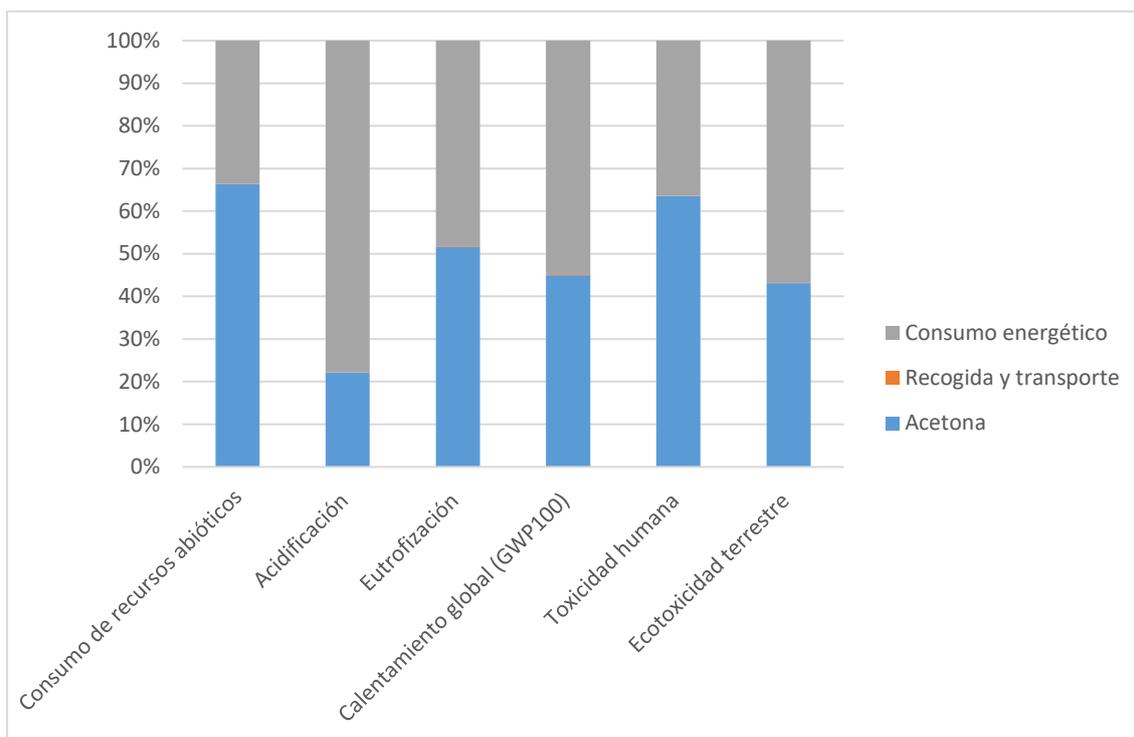


Figura 23. Porcentaje huella ambiental en función de categoría de impacto

Por un lado, la huella generada por el consumo de energía eléctrica debe su origen a las fuentes fósiles que se emplean para la producción de la misma. La mayor contribución, en comparación con el resto de las etapas, se produce en el aumento del calentamiento global y la acidificación del medio, cuya procedencia proviene específicamente de la extracción y quema de carbón en las centrales térmicas. Así pues, el calentamiento global se va incrementado por la emisión de CO_2 a raíz de esta combustión, y la acidificación deriva de la liberación de los gases ácidos, como son el dióxido de azufre y óxidos de nitrógeno, los cuales reaccionan en la atmósfera con el oxígeno y el agua para formar ácido sulfúrico (H_2SO_4) y ácido nítrico (HNO_3) acidificando el medio a través de la deposición mediante la lluvia ácida.

A pesar de que la toxicidad humana producida por el consumo eléctrico represente un menor porcentaje en comparación con el resto de etapas, su valor es elevado, el cual se debe a la

liberación de compuestos tóxicos, especialmente al aire, las cuales pueden provocar problemas en la salud humana.

Por otro lado, el disolvente (acetona) representa la mayor contribución en las categorías de agotamiento de recursos abióticos, en la eutrofización y en el nivel de toxicidad humana, derivado principalmente del consumo de recursos energéticos y materiales, así como a la liberación de compuestos nocivos durante la producción del butano, necesario para la generación de la acetona.

Análisis de mejoras

Con objeto de realizar mejoras en el proceso de estudio y, de acuerdo con los resultados obtenidos, se evalúa de la posible disminución de la huella ambiental generada en el proceso de estudio a través de la introducción de las siguientes variaciones mejoras:

- i. Se decide valorar la recuperación del 95% de la acetona durante el proceso mediante la incorporación de una cámara cerrada en la cual realizar el mismo y donde el disolvente sería recirculado. La elección del porcentaje de recuperación viene dada por la asunción de la pérdida de un 5% de disolvente en el proceso.
- ii. Los resultados para la huella generada por el consumo de energía eléctrica derivarán, como se ha mencionado anteriormente, del Mix de producción eléctrica de España introducido en el programa, el cual basa sus datos de producción en los generados en el año 2000, con mayor proporción de combustibles fósiles. Así pues, se ha valorado el estudio del impacto en el caso de que esta energía eléctrica se produzca a través de energías más renovables, con la base de datos del año 2022, estando más ajustado a la realidad actual de la producción de energía eléctrica en el país.

Tabla 8. Inventario etapas Caso base con mejoras

Etapas	Valor	Unidad
Recogida y transporte	10.418	Kg*km
Impresión 3D		
- Acetona	82,15	g
- Energía impresión	0,018	kW/h

En la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos con las mejoras analizadas.

Tabla 9. Resultados del Caso base con mejoras

Categoría de impacto	Acetona	Transporte	Consumo eléctrico
Factor abiótico (kg Sb eq)	1,69E-03	4,55E-05	1,95E-06
Acidificación (kg SO2 eq)	3,18E-04	1,87E-05	4,88E-03
Eutrofización (kg PO4--- eq)	6,16E-05	3,61E-06	1,12E-03
Calentamiento global (GWP100) (kg CO2 eq)	9,59E-02	6,63E-03	8,71E-01
Toxicidad humana (kg 1,4-DB eq)	3,18E-02	9,04E-04	3,83E-01
Contaminación terrestre (kg 1,4-DB eq)	1.71E-05	1,05E-06	5,47E-03

Se representa a continuación, de manera porcentual, la comparación del Caso base con el Caso base mejorado:

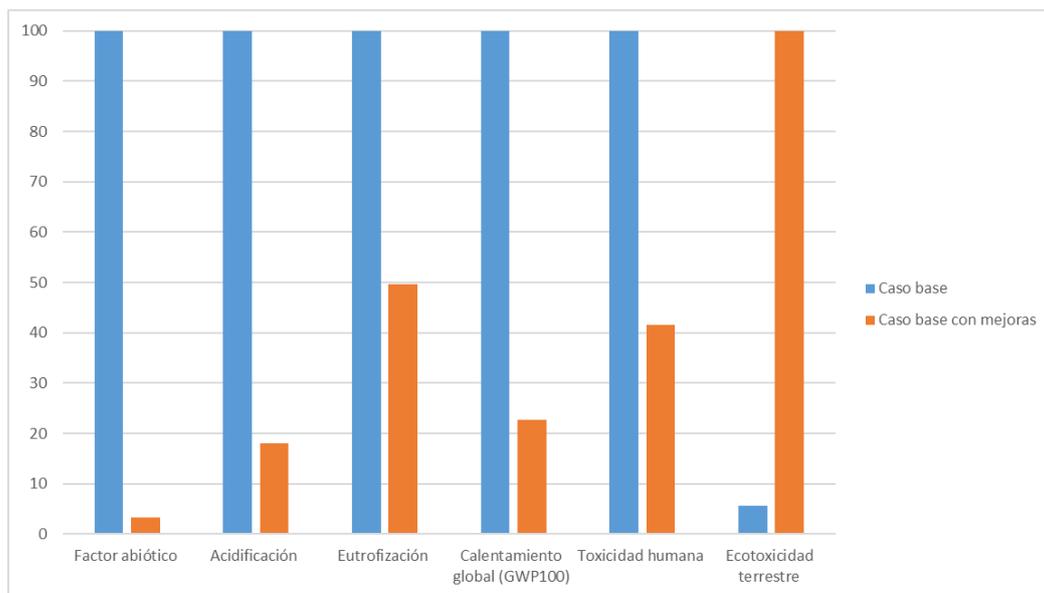


Figura 24. Gráfica comparativa impacto

La implementación de las mejoras en el proceso de estudio del Caso base resulta beneficioso ambientalmente de forma muy notable (fig. 24), rebajándose en más de un 50% en la mayor parte de las categorías de impacto, llegando a disminuirse incluso en un 96,7% el consumo de recursos abióticos, debido a la disminución de consumo de acetona para la disolución y de recursos fósiles para la obtención de energía eléctrica.

En otras categorías, como el calentamiento global o acidificación, la disminución es fundamentalmente debida a la sustitución de fuentes de fósiles de energía por energías renovables, disminuyendo así la cantidad de gases responsables de estos impactos. Concretamente, este efecto es debido a que en la base de datos actualizada introducida en el programa SimaPro, la energía renovable representa el 42,2% de la producción total, seguido de la producción mediante Ciclo combinado (24,7%) y por la energía nuclear (20,3%). Es este último proceso es del que deriva el aumento de contaminación terrestre, ya que durante el mismo se liberan metales pesados al aire, los cuales terminan depositándose sobre la superficie terrestre.

Así pues, se observa una disminución del impacto generado por el consumo eléctrico, debido a que en el Caso base, la base de datos, recogidos en el año 2000, otorga gran importancia a la energía proveniente del carbón y gas. Mientras tanto, en la base de datos para el Caso base mejorado esta contribución es mucho menor.

Comparativa de Casos

- *Análisis de Inventario*

El análisis descrito a continuación consiste en la comparación de los dos tratamientos tradicionalmente empleados para el EPS, deposición en vertedero e incineración, con el Caso base mejorado.

De este modo, se emplearon los procesos de la base de datos del programa empleado, los cuales son, para el vertedero "Disposal, plastic plaster, 0% water, to inert material landfill/CH U" y para la incineración "Disposal, polystyrene, 0.2% water, to municipal incineration/CH U".

Se incluye también como elemento de entrada la recogida y transporte de los residuos, siendo el vehículo empleado el mismo que en el Caso base, un camión, siendo los valores introducidos los indicados en la Tabla 9.

Para llevar a cabo la comparación ambiental entre los diferentes casos, se incluyó la etapa de fabricación de poliestireno, tomada de un proceso de la base de datos EcoInvent, disponible en SimaPro. Esto se debe a que la comparación de la huella generada por los escenarios sería poco realista si se realizase valorando únicamente los tratamientos finales del producto, debido a que no se tendría en cuenta la influencia del reciclaje en el caso base.

Así pues, los valores introducidos en el programa se indican o en la siguiente tabla:

Tabla 10. Inventario casos alternativos

Etapa	Valor	Unidad
Recogida y transporte		
- Deposición en vertedero	31,962	kg×km
- Incineración	27,728	kg×km

- *Evaluación de impactos*

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los casos estudiados, donde se introducen los valores de producción de EPS y donde el Caso base se introduce con las mejoras estudiadas:

Tabla 11. Resultados de impacto ambiental para el reciclado de poliestireno incluyendo las mejoras.

Categoría de impacto	Fabricación EPS	Tratamiento	Total
Factor abiótico (kg Sb eq)	3,95E-02	1,69E-03	4,12E-02
Acidificación (kg SO2 eq)	1,15E-02	5,20E-03	1,67E-02
Eutrofización (kg PO4--- eq)	8,54E-04	1,18E-03	2,04E-03
Calentamiento global (GWP100) (kg CO2 eq)	3,45E+00	9,67E-01	4,42E+00
Toxicidad humana (kg 1,4-DB eq)	1,65E-01	4,15E-01	5,80E-01
Contaminación terrestre (kg 1,4-DB eq)	3,33E-05	1,39E-02	1,40E-02

Tabla 12. Resultados de impacto ambiental para la deposición del poliestireno en vertedero.

Categoría de impacto	Fabricación EPS	Tratamiento	Total
Factor abiótico (kg Sb eq)	3,95E-02	1,52E-04	3,97E-02
Acidificación (kg SO2 eq)	1,15E-02	7,01E-05	1,16E-02
Eutrofización (kg PO4--- eq)	8,54E-04	1,43E-05	8,68E-04
Calentamiento global (GWP100) (kg CO2 eq)	3,45E+00	1,67E-02	3,47E+00
Toxicidad humana (kg 1,4-DB eq)	1,65E-01	3,70E-03	1,69E-01
Contaminación terrestre (kg 1,4-DB eq)	3,33E-05	2,54E-06	3,58E-05

Tabla 13. Resultados de impacto ambiental para la incineración del poliestireno.

Categoría de impacto	Fabricación EPS	Tratamiento	Total
Factor abiótico (kg Sb eq)	3,95E-02	3,07E-04	3,98E-02
Acidificación (kg SO2 eq)	1,15E-02	3,41E-04	1,18E-02
Eutrofización (kg PO4 ⁻⁻⁻ eq)	8,54E-04	5,60E-04	1,41E-03
Calentamiento global (GWP100) (kg CO2 eq)	3,45E+00	3,19E+00	6,64E+00
Toxicidad humana (kg 1,4-DB eq)	1,65E-01	6,43E-02	2,29E-01
Contaminación terrestre (kg 1,4-DB eq)	3,33E-05	1,48E-05	4,81E-05

Los resultados obtenidos, suponiendo reciclado del poliestireno al proceso de fabricación, se muestran en la Figura 26, en la cual se puede visualizar la comparación, de manera porcentual, de los diferentes casos propuestos.

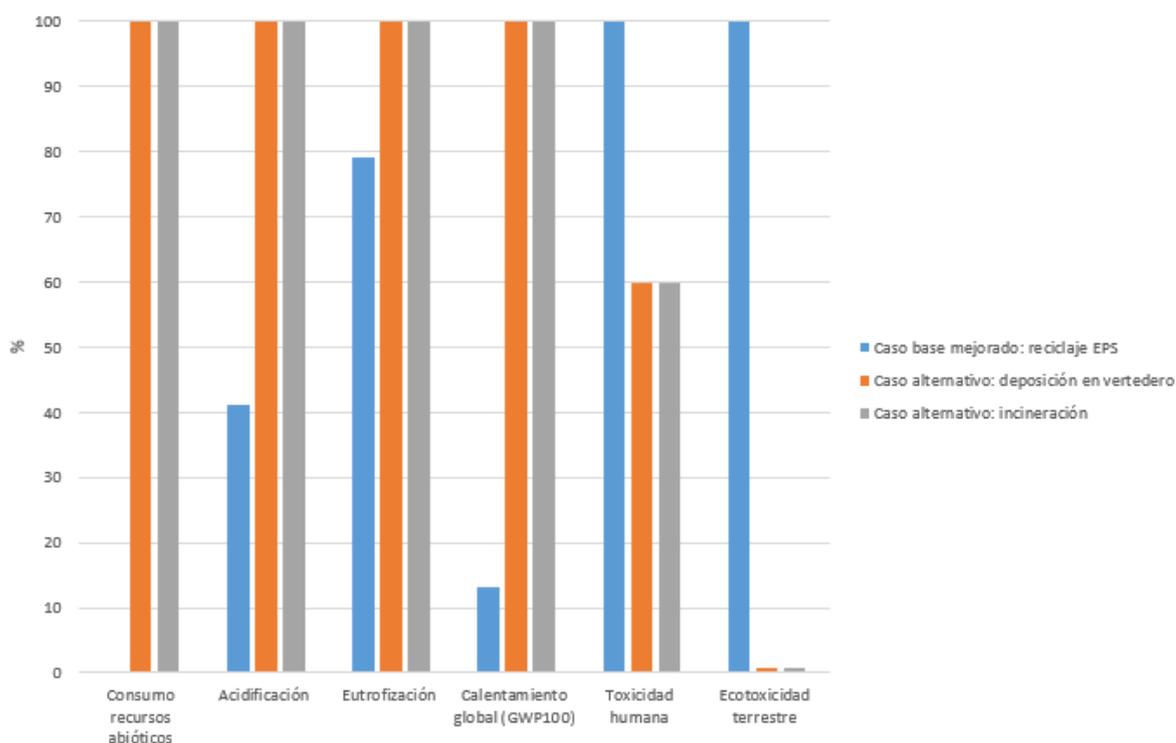


Figura 26. Gráfica comparativa impacto en función del caso con un 100% de reciclado de EPS

Como puede observarse, el escenario de fin de vida del EPS que mayor huella genera en la mayoría de categorías de impacto estudiadas es la incineración, obteniendo valores considerablemente mayores al resto de casos de estudio.

En categorías como la de consumo de recursos abióticos, acidificación o aportación al calentamiento global se observan reducciones en más de un 50%, debido a, como se ha comentado anteriormente, a la disminución de emisión de gases contaminantes derivados del consumo eléctrico, y a la disminución de consumo de recursos, ya que en el Caso Base el mismo sería notablemente más bajo, al tratarse de un reciclado con optimización del proceso.

En cuanto al proceso de reciclado propuesto presenta los mayores valores para las categorías de toxicidad humana y toxicidad terrestre, debido a que la mayor parte de la contribución del consumo energético. A pesar de ello, el proceso de reciclaje como fin de vida para el poliestireno presenta considerables mejoras en comparación al resto de tratamientos, disminuyendo en mayor medida el factor abiótico, debido que el reciclaje de EPS rebaja el consumo de recursos, hallándose así una notable mejora en comparación con los tratamientos alternativos.

Con la implantación del tratamiento del EPS mediante el reciclado del mismo a través del procedimiento descrito en el Caso base mejorado una importante disminución en la huella ambiental, en comparación con los tratamientos más usados en la actualidad.

7. CONCLUSIONES

Este trabajo fin de grado ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- Se ha conseguido una minimización de volumen del poliestireno expandido reciclado es del **97%**, lo que supone una drástica disminución del impacto de este tipo de residuos plástico en el medioambiente, asociado con su transporte y eliminación. Esta reducción se encuentra reflejada en el punto número 12 de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, “Producción y consumo responsables”, la cual aborda la reducción de residuos mediante la “gestión sostenible y uso eficiente de los recursos naturales”.

El porcentaje de minimización másico es de **0,7%**, un valor insignificante relacionado principalmente con la eliminación de las burbujas de aire contenidas en las bandejas de poliestireno expandido como consecuencia del propio proceso de fabricación.

- A través de la caracterización del material mediante espectroscopía IR se comprueba que el proceso de disolución del **EPSr en acetona consigue un material de pureza bastante similar al PS virgen**.
- La **viscosidad** del EPSr minimizado en acetona es **apta** para aplicaciones de impresión 3D. Se concluye además que la disolución conforma un fluido no newtoniano.

El EPSr en acetona es un material adecuado para la impresión 3D-solvent-casting, habiendo hallado los valores óptimos de impresión de manera experimental

- A través del Análisis de Ciclo de Vida se concluye que el tratamiento de reciclado de EPS puede optimizarse, mediante la recuperación del 95% de acetona y la obtención de energía eléctrica para impresión a través de fuentes más renovables, disminuyendo el impacto ambiental generado. Además, el proceso de reciclado propuesto presenta en general **mejores resultados medioambientales** respecto a otros tratamientos de fin de vida tradicionales la deposición en vertedero e incineración.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Charles, D., & Kimman, L. (2023). Plastic Waste Makers Index 2023.
- [2] 3D Printing Market Size, Share & Industry Groth Analysis Report by Oferring (Printer, Material, Software, Service), Process (Binder Jetting, Direct Energy Deposition, Material Extrusion, Material Jetting, Pwder Bed Fusion), Application, Vertical, Technology and Region - Global Groth Driver and Industry Forecast to 2028. (2023). En MarketsandMarkets.
- [3] García, F. J. P. (2005). *Investigación de las variables limitantes en la recuperación de los residuos de poliestireno procedentes del sector envase* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- [4] López, C. M., & Canepa, J. R. L. (2013). Poliestireno Expandido (EPS) y su problemática ambiental. *KUXULKAB'*, XIX(36).
- [5] Vilau, C., & Dudescu, C. (2019). Investigation of Mechanical Behaviour of Expanded Polystyrene Under Compressive and Bending Loadings. *Materiale Plastice*, 57(2), 199-207. <https://doi.org/10.37358/mp.20.2.5366>
- [6] Saltos Barreiro, P. V. (2015). *Diseño del proceso de reciclaje de poliestireno expandido por el método de disolución-precipitación* (Bachelor's thesis, Quito, 2015.).
- [7] Arriola Lara, E. A., & Velásquez Martell, F. E. (2013). Evaluación técnica de alternativas de reciclaje de poliestireno expandido (EPS). <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/161014>
- [8] *Plásticos - Situación en 2022*. (2022). Plastics europe.
- [9] Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050. En *Washington, DC: World Bank eBooks*. <https://doi.org/10.1596/978-1-4648-1329-0>
- [10] García Gómez, R. (2020). Ingeniería básica de una planta de producción de acetona a partir de isopropanol.
- [11] Tolbert, J. W., Hammerstone, D. E., Yuchimiuk, N., Seppala, J. E., & Chow, L. W. (2021). Solvent-Cast 3D Printing of Biodegradable Polymer Scaffolds. *Macromolecular Materials and Engineering*, 306(12), 2100442. <https://doi.org/10.1002/mame.202100442>
- [12] Martínez, C. A. H., & Rubio, J. P. F. (2014). Tecnologías de fabricación aditiva. La impresora 3D, antecedentes y funcionamiento. *Ignis*, (7), 24-30. <http://investigaciones.cun.edu.co/investigaciones/ojs/index.php/ignis/article/view/92>

- [13] Fullana, P., Puig, R., & Hauschild, M. (1998). Analisis del ciclo de vida—Life cycle assessment in Spanish. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 3(1), 56-56.
- [14] Aranda Usón, J. A. (2006). *El análisis del ciclo de vida como herramienta de gestión empresarial*. FC Editorial.
- [15] Cabra, J. R. V. (2017). Identificación de polímeros por espectroscopía infrarroja. *Revista Ontare*, 5, 3.
- [16] Gallego, S. Á. (2017). *La Huella de carbono y el análisis del ciclo de vida*. AENOR Ediciones. [16] Clemente, G., Sanjuán, N., & Vivancos, J. L. (Eds.). (2005). *Análisis de Ciclo de Vida: Aspectos Metodológicos y casos prácticos*. Universidad Politécnica de Valencia.
- [17] No., O. I. M. (s/f). BROOKFIELD DV2T. Brookfieldengineering.com. Recuperado el 8 de octubre de 2023, de <https://www.brookfieldengineering.com/-/media/ametekbrookfield/manuals/lab%20viscometers/dv2t%20instructions.pdf?la=en>