

Análisis técnico-económico y de ciclo de vida puerta a puerta de un proceso de reciclaje de poliestireno expandido a nivel industrial

Eliana Berrio Mesa, Alba N. Ardila A. *, Erasmo Arriola-Villaseñor, Santiago Bedoya Betancur

Grupo de Investigación en Catálisis Ambiental y Energías Renovables (CAMER), Facultad de Ciencias Básicas Sociales y humanas Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Medellín Colombia.

* Autor de correspondencia: anardila@elpoli.edu.co

Desarrollo Sustentable (Economía Circular). **Ponencia Virtual**.

Recibido: 16 de junio de 2023

Aceptado: 5 de septiembre de 2023

Publicado: 23 de noviembre de 2023

Resumen: En presente trabajo se tuvo como propósito determinar las pérdidas de materiales y energía, así como realizar el análisis de impactos económicos y ambientales de un proceso implementado a nivel industrial orientado al reciclaje del Poliestireno Expandido (EPS) bajo un enfoque de economía circular, de una empresa ubicada en la ciudad de Medellín. Para esto se establecieron los límites de la producción puerta a puerta. Además, el balance de masa y energía se realizó bajo consideraciones propias del funcionamiento de la empresa y sus costos en un periodo de 6 meses. De acuerdo con el balance de masa, se obtuvo un porcentaje de rendimiento de 78 % en la producción de Poliestireno Densificado a partir de EPS Postconsumo, con pérdidas de residuos ordinarios y agua. Con respecto al flujo de energía, se encontró un requerimiento energético total de 7350 kWh, donde el 44 % corresponde a las salidas energéticas y el 56 % a pérdidas energéticas. El Análisis Técnico – Económico, reflejó la existencia de una viabilidad financiera a 12 años, sin embargo, el análisis de impacto ambiental demostró mayores retribuciones positivas del sistema de estudio al ambiente, donde bajo un escenario de economía circular de un proceso de EPS existe una disminución de la huella de carbono hasta el 68.44%, además de ser una alternativa de gestión de residuos sólidos reciclables.

Palabras clave: poliestireno expandido reciclado, análisis técnico económico, huella de carbono, ciclo de vida

Technical-economic and door-to-door life cycle analysis of an expanded polystyrene recycling process at an industrial level

Abstract: The purpose of this work was to determine the losses of materials and energy, as well as to analyze the economic and environmental impacts of a process implemented at industrial level oriented to the recycling of Expanded Polystyrene (EPS) under a circular economy approach, of a company located in the city of Medellin. For this purpose, the limits of door-to-door production were established. In addition, the mass and energy balance was performed under consideration of the operation of the company and its costs over a period of 6 months. According to the mass balance, a yield percentage of 78 % was obtained in the production of Densified Polystyrene from Postconsumer EPS, with losses of ordinary waste and water. With respect to energy flow, a total energy requirement of 7350 kWh was found, where 44 % corresponds to energy outputs and 56 % to energy losses. The Technical-Economic Analysis showed the existence of a 12-year financial viability; however, the environmental impact analysis showed greater positive retributions of the study system to the environment, where under a circular economy scenario of an EPS process there is a reduction of the carbon footprint up to 68.44%, in addition to being an alternative for the management of recyclable solid waste.

Keywords: recycled expanded polystyrene, economic technical analysis, carbon footprint, life cycle.

Introducción

La aplicación de la economía circular como sistema económico en el reciclaje de residuos, se ha convertido en una alternativa importante para la valorización de los mismos (Gobierno de la Republica de Colombia, 2019), así como de mitigación de problemáticas ambientales asociadas a la disminución de recursos naturales, como la degradación de la tierra, expansión de la desertificación, deforestación, agotamiento del agua, contaminación del aire, pérdida de la biodiversidad y generación de desechos (Camacho-Otero, Boks, & Pettersen, 2018)(Heshmati, 2017).

La generación de residuos plásticos no ha sido ajena a problemáticas ambientales, como es el caso del Poliestireno Expandido (EPS), uno de los materiales plásticos inertes de bajo costo más utilizados a nivel mundial, cuya composición es 95% de poliestireno y 5% de gas pentano (Centro de Información Técnica - CIT ECOPLAS, 2011). Este tipo de plástico de uso masivo, posee propiedades que van desde alta estabilidad dimensional, hasta resistencia al impacto, humedad,

corrosión y fotólisis y que, en combinación con propiedades como la ligereza, durabilidad, baja conductividad térmica, alta absorción acústica, y baja degradabilidad (de Oliveira, Mônica, & Campos, 2019), lo hacen un termoplástico con una amplia gama de aplicaciones y de difícil reemplazo. Por ejemplo en el sector del Embalaje – Empaque, el EPS es utilizado para la protección de productos frágiles, conservación y transporte de alimentos, además tiene aplicaciones en el sector agricultura, industria automotriz (Betancourt-S. & Solano-M., 2016), construcción como aislante térmico y acústico, fabricación de indumentaria deportiva y cascos de protección (Ingrao et al., 2015)(Ismail, Irani, & Ahmad, 2013). Según datos reportados por Grand View Research, se prevé que el tamaño del mercado mundial del EPS alcance los 13.500 millones de dólares para el 2028, con una tasa crecimiento anual de 4.8% de 2021 – 2028, donde el sector de la construcción y de embalaje tienen las mayores aplicaciones (GRAND VIEW RESEARCH., 2022.) (Allied Market Research, 2022.).

La cadena de producción de EPS comienza con la adquisición de materias primas como resinas plásticas, que generalmente son polímeros de estireno, que contienen un agente expansor (pentano). Posteriormente con la aplicación de procesos como pre-expansión, reposo intermedio y estabilización, expansión y moldeo final, se obtienen productos de EPS como recipientes para almacenamiento de otros productos y alimentos, láminas y/o gránulos, entre otros (Ishrat et al., 2019) (Chaukura, Gwenzu, Bunhu, Ruziwa, & Pumure, 2016). Esta cadena continúa con la distribución de los productos de EPS, uso por parte del usuario y finalmente disposición en vertederos o rellenos sanitarios.

Si bien la industria de este material se encuentra en continuo crecimiento, alcanzándose en el 2016 una producción mundial de poliestireno y poliestireno expandido de 14.7 y 6.6 millones de toneladas métricas respectivamente, el destino de dichos productos post-consumo terminan siendo parte de los vertederos, convirtiéndose en un carga ambiental por su gran volumen y baja densidad, y con un tiempo de degradación en condiciones ambientales que tarda varios cientos de años (Hidalgo-Crespo, Soto, Amaya-Rivas, & Santos-Méndez, 2022). Por otra parte, de acuerdo a datos reportados por The World Bank, el 12% del total de desechos generados a escala global corresponde a los residuos plásticos (The World Bank, 2022) donde el 70% de todos los desechos generados también terminan haciendo parte de rellenos sanitarios y/o botaderos a cielo abierto .

Se han propuesto numerosos métodos para gestionar los residuos de EPS como: disposición en rellenos sanitarios, incineración, reciclaje mecánico y reciclaje químico, destacándose dentro de estos métodos, los procesos mecánicos y de disolución química (Gil-jasso et al., 2019)(Noguchi, T., Miyashita, M., Inagaki, Y., & Watanabe, 1998)(García, M. T., Gracia, I., Duque, G., de Lucas, A., & Rodríguez, 2009). No obstante y ante esta situación de presión ambiental, económica y social, se vuelve necesario proponer nuevas alternativas de creación de valor para el EPS (de Souza Junior, Dantas, Zanghelini, Cherubini, & Soares, 2020). En este contexto la aplicación de la economía circular para extender su vida útil ha sido estudiada (Hidalgo-Crespo, Jervis, Moreira, Soto, & Amaya, 2020)(Hidalgo-Crespo, Soto, et al., 2022)(Hidalgo-Crespo, Moreira, et al., 2022)(de Oliveira et al., 2019), además de su Análisis de su Ciclo de Vida (ACV) (Ingrao et al., 2015).

El ACV como metodología para la evaluación de la calidad ambiental de un producto, es actualmente una de las mejores formas de analizar los impactos ambientales del ciclo de vida de un producto, cuyas etapas se fundamentan en la definición de los objetivos y alcance del ACV, un Análisis de inventario para la cuantificación de entradas y salidas, así como pérdidas (de Souza Junior et al., 2020)(Aranda Usón, Alfonso; Zabalza Bribián, 2010), posteriormente una evaluación de los impactos ambientales y finalmente una interpretación de los resultados (Gomes, Silvestre, & de Brito, 2020)(Pargana, Pinheiro, Silvestre, & De Brito, 2014). Por tal razón, y si bien la idea de promover la economía circular en residuos de EPS puede tener un impacto positivo, el proceso de reincorporación de materiales reutilizados y/o reciclados y su ciclo de vida (puerta a puerta) también tienen unos impactos económicos, sociales y ambientales, que deben ser medidos, ya que de esta manera es posible determinar si realmente son beneficiosos para el medio ambiente.

Metodología

En este estudio se realizó el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) puerta a puerta y Análisis Tecno – Económico (TEA) de un proceso de producción de poliestireno densificado a partir de poliestireno expandido post-consumo. El poliestireno densificado es obtenido mediante un proceso térmico – mecánico a temperaturas entre 170 – 200°C donde se elimina

el agente expansor (pentano e Isopentano) del EPS. Durante este proceso se obtiene una forma compacta de poliestireno, con una textura dura y vidriosa, llamado poliestireno de alta densidad o densificado.

Descripción de procesos / sistema de estudio: Se realizó a través de visitas en campo a una empresa de producción ubicada Medellín – Antioquia, que utiliza el EPS reciclado como una materia prima para la generación de Poliestireno densificado. A partir de dichas se definió el sistema de estudio, sus límites y conjunto de procesos unitarios (Arguillarena, Margallo, Urutiaga, & Irabien, 2021).

Inventario (Balance de masa y energía): Se cuantificaron las entradas y salidas de sistema en cuanto a flujo de materiales y energía. También se identificó cuáles eran los procesos donde se concentraba la mayor cantidad de flujos energéticos, materia prima y por ende de las pérdidas.

Realización del estudio de Análisis Tecno – Económico (TEA): Se evaluó financieramente la viabilidad económica del proceso, entre los que se contempló, materia prima, electricidad, mano de obra, terreno y equipos (Bedoya Betancur, 2022). Para dicha evaluación se realizó una proyección a 8 y 12 años.

Evaluación del impacto ambiental de Ciclo de Vida: Para la Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida se empleó el método de ILCD 2011 Midpoint +, utilizando el Software para Evaluación de Ciclo de Vida openLCA (OpenLCA, 2017) (Center, 2016). Este conjunto de herramientas permitió evaluar los impactos ambientales puerta a puerta asociados a la producción de Poliestireno Densificado a partir residuos de Poliestireno Expandido.

Propuesta de acciones de mejora en materia de energía y flujo de materiales: *Propuesta de posibles escenarios que permita disminuir principalmente los impactos económicos.*

Resultados y Discusión

Descripción del Sistema de estudio

Dentro de proceso de obtención de poliestireno densificado a partir de poliestireno expandido post- consumo se identificaron 5 etapas: Recepción de poliestireno expandido reciclado, limpieza de EPS reciclado, fundición y desgasificación del EPS reciclado, moldeo y enfriamiento de poliestireno densificado y finalmente su almacenamiento y comercialización.

Recepción de EPS reciclado: El EPS reciclado que ingresa a la empresa, procede de numerosas ciudades del país. Este EPS proviene del sector de construcción y embalaje, compactado, como láminas y también empaques de alimentos completamente limpios. Igualmente se obtiene este material post-consumo por medio de recicladores de la Ciudad de Medellín.

Limpieza del EPS reciclado: En esta segunda etapa se realiza la limpieza del EPS reciclado, principalmente el procedente del sector construcción y el EPS compactado. Por ejemplo, el EPS del sector construcción, tiene un alto contenido de concreto, así como residuos plásticos, que deben ser retirados de forma manual. Por otra parte, para el caso del EPS compactado, este contiene chatarra, plásticos, PET, cartón y zunchos, que también se retiran manualmente, y con la protección exigida por la empresa, al tratarse de la manipulación de residuos sólidos.

Fundición y desgasificación del EPS reciclado: En este proceso se extrae todo el Pentano e Isopentano del Poliestireno, mediante el uso de maquinaria específica de molienda y prensado, donde se da un tratamiento térmico mecánico a temperaturas entre 170 – 200 °C. El resultado de dicha desgasificación, es una forma compacta de Poliestireno de alta densidad, que tiene una textura semisólida, con temperaturas por encima de los 100°C y que debe ser moldeado de forma inmediata y manual por parte de los operarios.

Moldeo y enfriamiento de bloques de poliestireno densificado: En esta fase del proceso se le da forma de bloques al Poliestireno. Lentamente se van añadiendo capas del Poliestireno densificado hasta llenar por completo el molde cuadrado, endureciéndose al mismo tiempo. Posteriormente se sacan los bloques del producto del molde, y se enfrían en un tanque con agua, durante aproximadamente 10 – 20 minutos.

Almacenamiento y Comercialización: Una vez se han enfriado los bloques de Poliestireno densificado, se pesan en una báscula. Estos bloques normalmente tienen un peso entre 8 – 11kg y son dispuestos en estibas, para su embalaje y posterior comercialización a nivel nacional e internacional.

Análisis de Inventario del Ciclo de Vida

Balance de masa

De acuerdo a los resultados obtenidos en el balance de masa, es decir el inventario de datos de entrada/salida de materiales en el sistema de estudio, se encontró que por cada 28110 kg de Poliestireno Expandido Reciclado, se obtienen 21951.3 kg de Poliestireno de Alta densidad, con un rendimiento total de 78 % (Figura 1) , donde las pérdidas de materiales se encuentran asociadas principalmente a los residuos ordinarios generados durante el proceso de limpieza, que son dispuestos finalmente en rellenos sanitarios por una empresa gestora de residuos. Por otra parte, los residuos reciclables obtenidos (Plástico, PET, Chatarra, Cartón y Zuncho) son incorporados a otras cadenas productivas a través de su venta y comercialización por parte de la empresa. Adicionalmente, se identificó pérdidas de agua en el sistema de estudio, especialmente en el proceso de enfriamiento de los bloques de Poliestireno densificado. Si bien el tanque donde se atemperan el producto terminado se llena una sola vez por semana, dicha agua posteriormente es descartada, principalmente por el color turbio que adquiere después de la semana de uso.

Frente a los resultados obtenidos para el rendimiento del sistema de estudio, de acuerdo a datos reportados por la literatura, específicamente del proceso de reciclaje de Poliestireno Expandido Postconsumo, y su procesamiento para la obtención de una resina Postconsumo, se han encontrado rendimientos desde 50.10 % (Hidalgo-Crespo, Soto, et al., 2022) ,hasta 85% en el proceso de peletización de EPS adquirido por medio de reciclaje mecánico. No obstante, el rendimiento en la obtención de un producto final es dependiente del sistema de estudio, así como los límites que se establezcan para el cumplimiento de los objetivos propuestos en el análisis de inventario, en este caso los referentes al flujo de materiales. Por tal razón a medida que se obtienen datos que permiten conocer mejor el sistema, pueden identificarse nuevas variables que influyen directamente sobre el rendimiento del mismo (Aranda Usón, Alfonso; Zabalza Bribián, 2010).

Balance de Masa

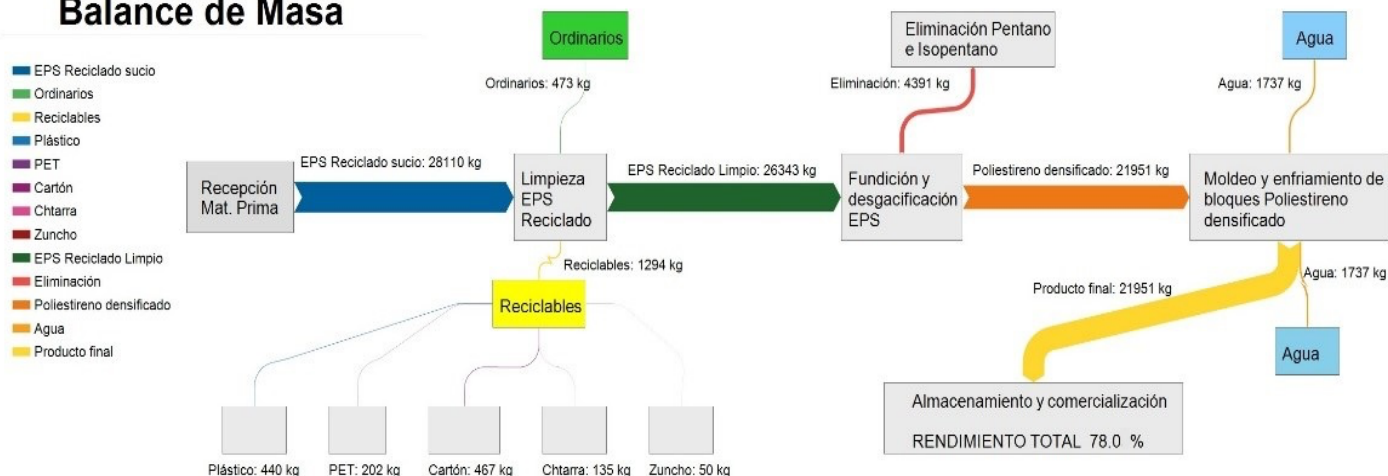


Figura 1. Diagrama de Sankey – Flujo de materiales

Balance de Energía

Las pérdidas en energía se presentaron en 3 unidades de operación: Recepción de Materia Prima, Limpieza del EPS reciclado y Fundición y desgasificación del EPS (Figura 2). Inicialmente en la Recepción de materia prima, se tiene un consumo de energía eléctrica de 91 kWh durante 26 días, por el uso de una báscula industrial que permanece prendida durante 8 horas diarias. Sin embargo, de acuerdo a lo observado en campo, este equipo se utiliza durante periodos muy cortos de tiempo, que suman en total y como máximo 2 horas al día. Es por esto que, considerando solo un uso

de 2 horas, el consumo energético disminuye a 23 kWh, y por lo tanto se tiene una pérdida de aproximadamente 69 kWh. Por otra parte, en la Limpieza de EPS reciclado, tanto para el Molino de aspas como la cortadora, se considera una eficiencia energética de motor de 75 %, obteniéndose una salida 41 kWh y una pérdida 13 kWh.

Posteriormente para el proceso de fundición y desgasificación también al considerarse una eficiencia del motor de 75%, se tiene una pérdida de aproximadamente 723kWh. A esta pérdida energética también se les suma la asociada a las pérdidas térmicas, es decir el 96% de 3405 kWh. De esta manera las pérdidas totales en esta unidad de operación son de 4106 kWh. Es así que se determina que el requerimiento energético para el procesamiento de 28110 kg de materia prima de EPS reciclado es de 7350 kWh, con salidas energéticas de 3274 kWh (44%) y pérdidas de 4076 kWh (56%).

Partiendo de lo anterior y comparando dichos resultados con requerimientos energéticos reportados en procesos de uso de EPS postconsumo, para la generación de nuevos productos disponibles en la base de datos ECOINVENT, se encontró una alta similitud en cuanto a requerimientos energéticos para la producción de losas de espuma de Poliestireno reciclado al 10% donde se tuvo un requerimiento de 6255.31 kWh (ECOINVENT, 2022.) .Si bien los procesos para la generación de ambos productos (Poliestireno densificado y Losas de espuma de poliestireno) son diferentes, es fundamental conocer datos reportados en la literatura, específicamente en cuanto al uso de EPS Reciclado y su incorporación a nuevas cadenas productivas con un enfoque de economía circular (Hidalgo-Crespo, Moreira, et al., 2022). Esto permitirá dilucidar el orden de magnitud en cuanto al uso de energía de esta clase de procesos, cuyo mayor requerimiento energético se encuentra en el uso de procesos térmicos que son potenciales fuentes de emisión de combustibles fósiles (Hidalgo-Crespo, Soto, et al., 2022).

Balace de Energía

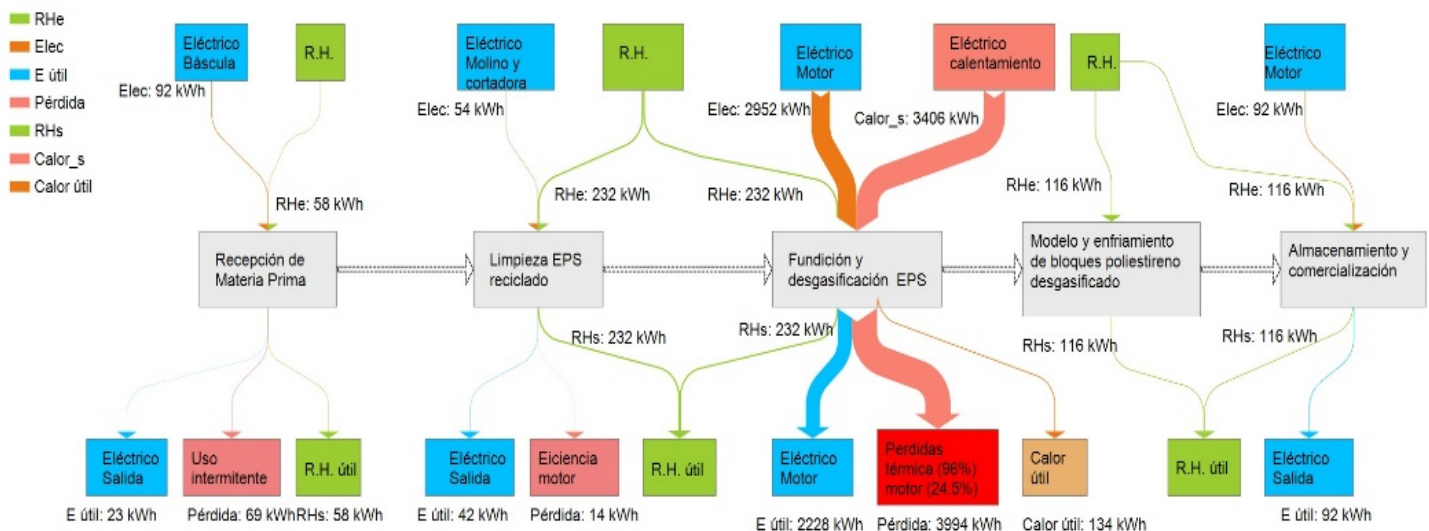


Figura 1. Diagrama de Sankey – Flujo de Energía

Análisis Tecno – Económico

Conforme a los resultados obtenidos, la viabilidad financiera a 8 años del proceso de generación de Poliestireno Densificado realizando la inversión inicial en el 2023 e iniciando los pagos desde el 2024 – 2031, se encontró que al sumar los flujos netos de los periodos y la inversión inicial se obtuvo un VPN negativo (alrededor de -\$104 millones de pesos) con una tasa de oportunidad del 9%, es decir que al periodo 8, la empresa aún no logra recibir más de lo que invirtió, por lo tanto posiblemente sea necesario aumentar los periodos donde la empresa logre recuperar la inversión . Por otra parte, la Tasa Interna de Retorno (TIR) que es del 2.47% comienza a indicar que la inversión posiblemente tenga una rentabilidad, lo cual se puede confirmar con la relación Beneficio/Costo, donde se obtuvo un valor de 0.72, demostrando que al periodo 8 los Beneficios son mayores a los costos. Sin embargo, y como se mencionó, en este periodo aún no se recupera la inversión, por lo tanto, se rechaza la viabilidad financiera del proceso a este periodo (Bedoya Betancur, 2022).

Proponiendo un escenario donde se incremente el número de periodos de 8 a 12 años, se encuentra que el VPN pasa de ser negativo a positivo (44.5 millones de pesos), demostrando que, al aumentar 4 periodos, la empresa comenzará a recibir más de lo que invirtió, por lo tanto, recuperará la inversión realizada desde el principio. Por otra parte, la TIR aumenta (11.02%), y por ende la relación Beneficio/costo se incrementa a 1.12, es decir los beneficios serán mayores en un escenario donde se contemplen 12 periodos. De esta manera se determina que existe viabilidad financiera de la actividad productiva en aproximadamente 12 años, ya que se recuperará la inversión inicial de \$751 millones de pesos y se empezarán a tener mayores ganancias en la producción de Poliestireno Densificado a partir de Poliestireno Expandido Postconsumo.

En este contexto es importante considerar los 9 Niveles de Madurez Tecnológica (TRL), por ejemplo, en la toma de decisiones relacionadas con la gestión y progreso en actividades concernientes a la investigación y el desarrollo dentro de una empresa. Esto permitirá dilucidar acciones de correctivas, preventivas y de mejora del sistema de estudio, así como potenciales modelos de negocio que pueden ser incorporados al proceso productivo, y que por ende pueden aumentar la viabilidad económica de la empresa de estudio. A continuación, en la Figura 3, se muestran dichos niveles, que pueden ser aplicados desde una perspectiva económica para evaluar el nivel de madurez en los conceptos de los programas, capacidad y requisitos tecnológicos, lo que constituye una importante herramienta para tener en cuenta en el análisis financiero de una compañía.

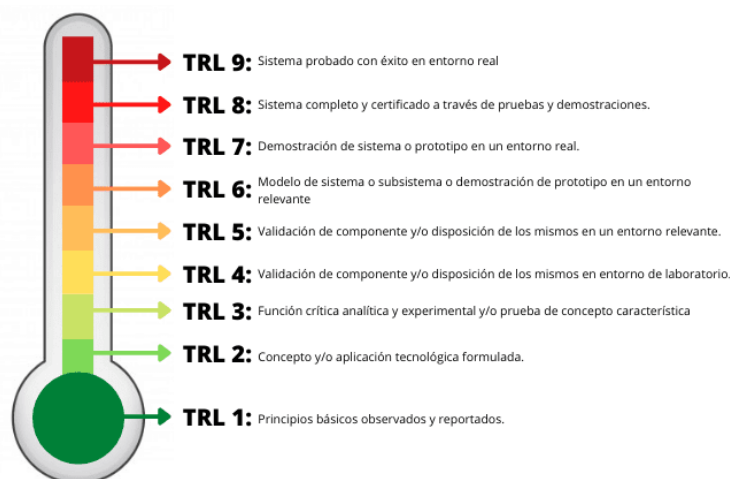


Figura 3. Niveles de Madurez Tecnológica (TRL) (AYMING, 2022.)

Análisis de la Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida

De acuerdo al resultados adquiridos por medio del método de evaluación de impacto de ciclo de vida ILCD 2011 Midpoint+, los impactos ambientales del proceso de obtención de Poliestireno Densificado, en las diferentes categorías de impacto como cambio climático (Figura 4), partículas (Figura 5), acidificación (Figura 6), eutrofización marina (Figura 7) se encuentran asociados a los sistemas y subsistemas que permiten la generación de energía hidroeléctrica y la proveniente de fuentes primarias no renovables como los fósiles, siendo la energía hidroeléctrica la más empleada en Colombia (Área metropolitana Valle de Aburrá, 2022.).

Como se puede observar en la Figura 4, esta categoría de impacto indica el potencial de calentamiento global en un horizonte temporal de 100 años, basado en las recomendaciones del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en el contexto del sistema de estudio y de acuerdo a las entradas y salidas tanto de masa y energía cuantificadas en el proceso. De forma similar sucede con la categoría de impacto de emisión de partículas a la atmosfera (Figura 5), donde se evalúan las partículas primarias como PM10 y PM2.5 y secundarias como óxidos de azufre, nitrógeno y gas amoníaco. Por otra parte, la acidificación (Figura 6) indica el exceso acumulado que caracteriza el cambio en la superación de carga crítica del área sensible en los principales ecosistemas terrestres y de agua dulce, en los que se depositan sustancias acidificantes. Finalmente la eutrofización marina expresa el grado en que los nutrientes emitidos alcanzan el compartimiento final marino (Figura 7) (OpenLCA, 2017). Para este caso cada categoría de impacto indicó que los impactos ambientales del sistema de estudio están asociados al uso de energía, lo que se

evidencia en pérdidas energéticas de hasta el 56%, siendo la etapa de fundición y desgasificación del EPS (Figura 2) la de mayor requerimiento energético.

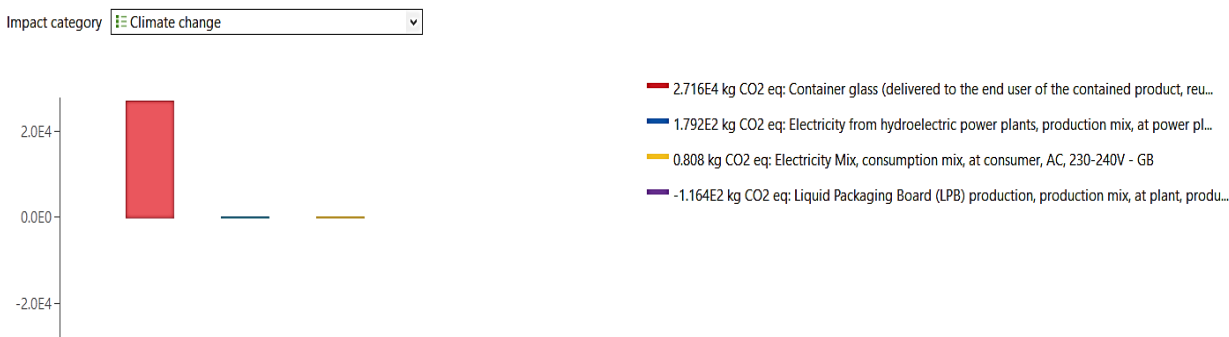


Figura 4. Contribución al Cambio Climático

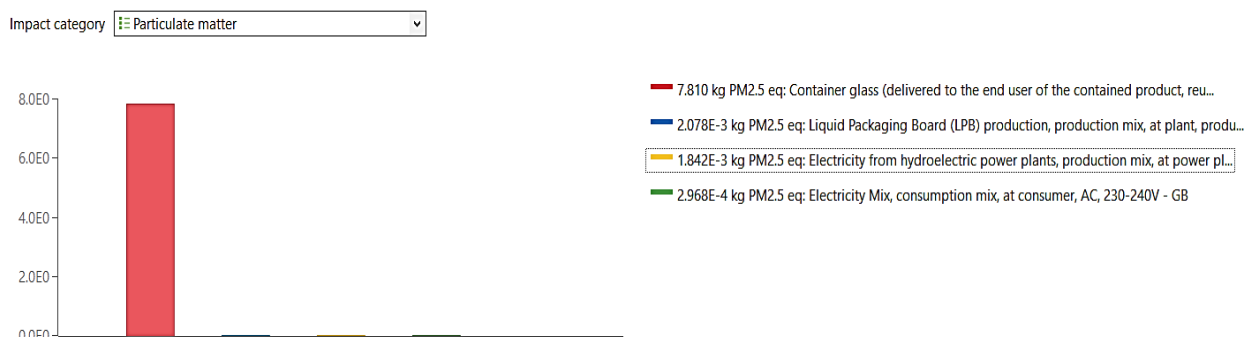


Figura 5. Contribución de Partículas a la atmósfera

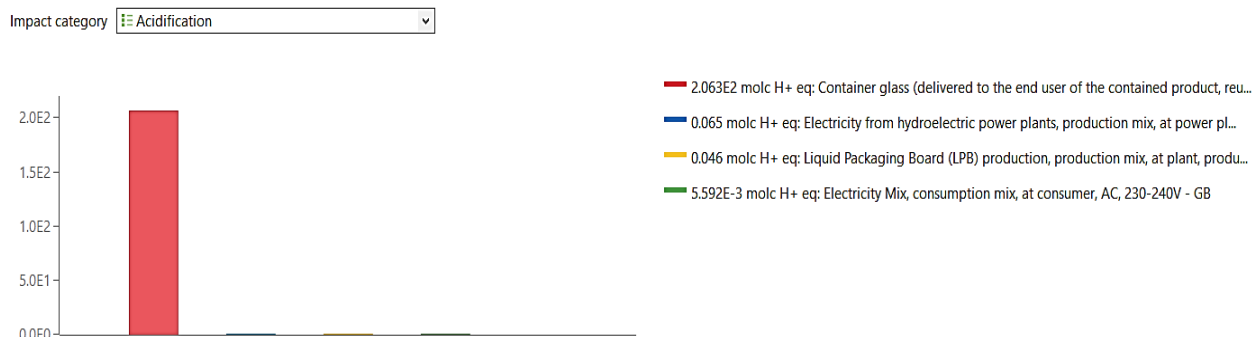


Figura 6. Contribución a la acidificación

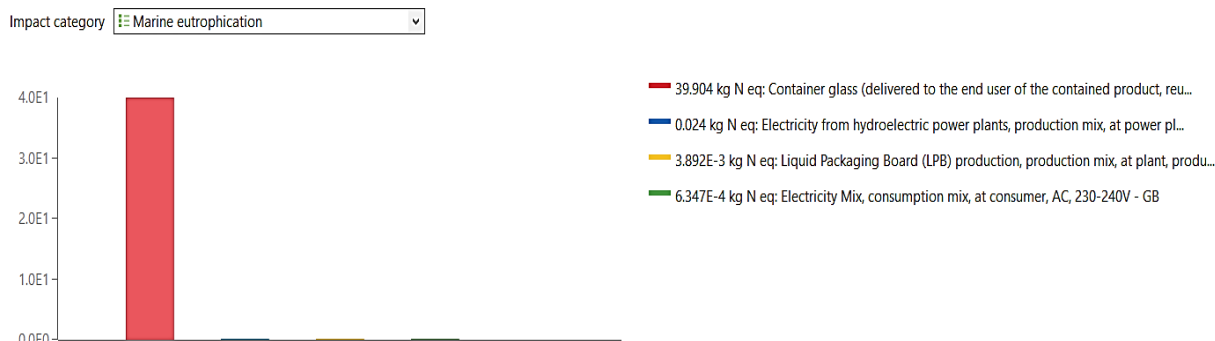


Figura 7. Contribución a la eutrofización marina

Si bien la energía hidroeléctrica ha jugado un papel fundamental dentro del desarrollo de Colombia, ya que se ha logrado satisfacer los requerimientos energéticos tanto a nivel industrial como doméstico, además de ser una fuente de energía renovable que es menos contaminante que las fuentes energéticas convencionales provenientes de combustibles fósiles como el petróleo, gas natural o carbón, no se puede dejar de lado que en esta forma de generación de energía, también se presentan riesgos e impactos considerables según sea el tipo y escala de central hidroeléctrica y su ubicación, debido a que factores como la inundación de grandes superficies de terrenos, reasentamiento de comunidades y cambios en ocasiones irreversibles en ecosistemas fluviales, principalmente por los transformaciones en flora, fauna y clima, calidad, fluidez y disponibilidad del recurso hídrico (Osorio Rosado, 2017) así como altos costos de capital en inversión, son impactos ambientales que suman y que son inherentes al consumo de energía hidroeléctrica.

Con respecto a las emisiones, específicamente huella de carbono, según la metodología ILCD 2011 Midpoint+, la categoría de impacto llamada cambio climático, indica un valor de 326636.40 kg CO₂ emitidos de forma anual (326.64 Ton CO₂). Un resultado similar y aproximado se obtuvo aplicando el método IPCC 2013 GWP 100a, una metodología de evaluación de impactos desarrollada por el panel intergubernamental sobre cambio climático en un marco temporal de 100 años (IPCC, 2013). Con este método se determinó un valor de emisión anual de 333226.80 kg CO₂ (333.23 Ton CO₂) (Figura 8).

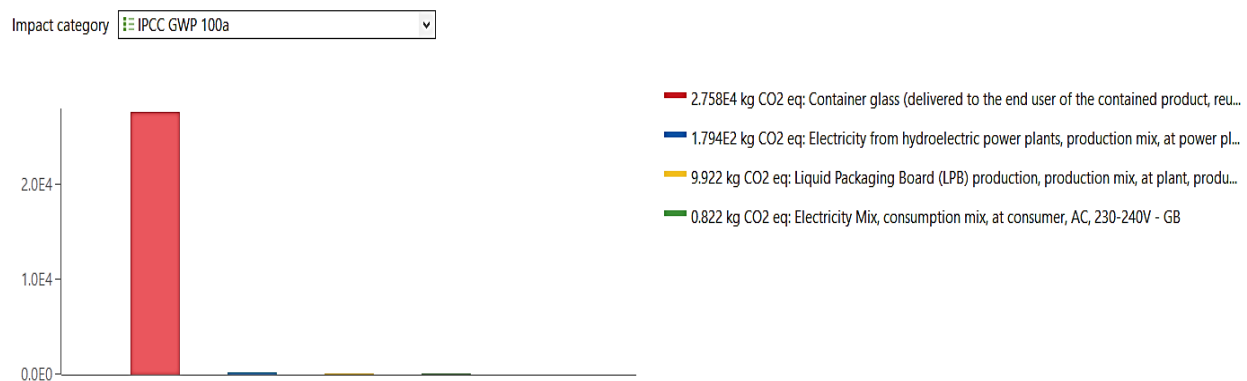


Figura 8. Contribución de CO₂ - Método IPCC GWP 100a

Si bien, por ambas metodologías (ILCD 2011 Midpoint+ e IPCC GWP 100a) y según los datos ingresados de masa y energía al software openLCA, las emisiones a la atmósfera son alrededor de 332 – 333 Ton de CO₂, es importante considerar que en la base de datos empleada ELCD se encuentran una amplia variedad de flujos de materia y energía de todo tipo de residuos asociados a los mismos procesos del sistema de estudio, pero desarrollados en Europa (OpenLCA, 2017). Por tal razón también realizó el cálculo de la huella de carbono empleando los factores de emisión reportados según la normatividad colombiana, donde se determinó una emisión anual de 237.82 TonCO₂.

Comparando estos resultados con un escenario donde en lugar de valorizarse los residuos de EPS se incineren, se logra dilucidar que si existe una disminución significativa de emisión de dióxido de carbono a la atmósfera en procesos que se encuentran en un contexto de economía circular. De acuerdo a la base de datos Ecoinvent, un proceso de incineración de EPS municipal emite 3.13 kg de CO₂ por cada 1 kg de Poliestireno Expandido que se incinere (Hischier, 2022.). Es así y como se muestra en la Tabla 1 que, bajo un escenario de economía lineal, donde el ciclo de vida del EPS postconsumo termina en un proceso de incineración, se generaría una emisión anual a la atmósfera de 1055.82 TonCO₂.

Tabla 1. Emisiones - Incineración de EPS municipal

ECONOMÍA LINEAL – INCINERACIÓN				
Residuo	Cantidad (kg) mensual	Emisiones a la atmósfera mensual kgCO ₂ eq	Emisiones a la atmósfera anual kgCO ₂ eq	Emisiones a la atmósfera anual Ton CO ₂ eq
Poliestireno Expandido	28110	87984.3	1055811.6	1055.81

(Base de datos Ecoinvent: Treatment of waste expanded polystyrene, municipal incineration)

Tabla 2. Disminución de Huella de Carbono

Huella de Carbono - IPCC GWP 100a Ton CO ₂	333.23
Huella de Carbono - ILCD 2011 Midpoint+ Ton CO ₂	326.64
Huella de carbono – Incineración de EPS postconsumo Ton CO ₂	1055.81
Disminución de Huella de Carbono Ton CO ₂	729.18
% Disminución de Huella de Carbono	68.44

Acorde a dicho resultado y comparándolo con el obtenido por las metodologías normalizadas de IPCC y ILCD, se determina que la reincorporación de residuos como el EPS postconsumo a nuevas cadenas productivas, en lugar de su disposición final en rellenos sanitarios donde tarda varios cientos de años en descomponerse (Hidalgo-Crespo, Moreira, et al., 2022) o por medio de procesos de incineración (Hischier, 2022), se puede alcanzar una reducción en emisión de hasta 729.18 toneladas de dióxido de carbono anual, es decir una disminución hasta del 68.44% de emisiones (Tabla 2), que contribuyen directamente en el cambio climático (IPCC, 2013).

Por otra parte, además de la contribución positiva en cuanto a la huella de carbono del proceso de reciclaje de EPS y su valorización, también se encuentra el aprovechamiento de todos los residuos reciclables que se generan después de la limpieza del mismo (Plástico, PET, Cartón, Chatarra, Zuncho). Como se mencionó en el Análisis Tecno – Económico, estos productos postconsumo representan una fuente de ingresos para la empresa, ya que son vendidos a recicladores de oficio, y a otras empresas que los reintegran nuevas cadenas productivas. De esta manera se determina que el sistema de estudio es amigable ambientalmente en cuanto a su contribución en la gestión de residuos sólidos reciclables y disminución de huella de carbono del EPS postconsumo.

Conclusiones

Se encontró que el rendimiento total del sistema de estudio en cuanto al flujo de materiales fue del 78%, cuyas pérdidas se encontraron asociadas a la cantidad de residuos ordinarios generados en el proceso de limpieza del EPS reciclado y a la cantidad de agua empleada para el enfriamiento de los bloques del producto terminado (Poliestireno densificado). Por otra parte, los residuos reciclables obtenidos en proceso de limpieza del EPS postconsumo son dispuestos por recicladores y otras empresas para su aprovechamiento, lo que se convierte en un impacto ambiental positivo en la gestión integral de residuos. No obstante, actualmente la empresa no valoriza los residuos ordinarios, y son dispuestos finalmente por otra empresa gestora en rellenos sanitarios. Con respecto al flujo de energía, se determinó una pérdida energética del 56 % y una salida o aprovechamiento energético del 44 %, donde el mayor flujo de energía se da en la fase de fundición y desgasificación, principalmente por las pérdidas térmicas y de eficiencia del motor del equipo principal.

Actualmente la empresa se encuentra funcionando financieramente, sin embargo, el Análisis Tecno – Económico demuestra que tendrá una viabilidad financiera en 12 años, es decir, logrará recuperar la inversión inicial y obtendrá beneficios económicos mayores a los costos de producción. Una forma de lograr disminuir este número de años, es aumentando la cantidad de materia prima, para incrementar la producción e ingresos; o incursionando en nuevos mercados. No obstante, a pesar de ser un tiempo significativo (12 años), es importante considerar que dicho sistema tiene una retribución ambiental significativa; Esto se pudo mostrar con la evaluación de impactos ambientales según método ILCD 2011 Midpoint+ e IPCC GW 100a, donde se logró determinar una huella de carbono anual de 332 – 333 Ton de CO₂, que es inferior hasta en un 68.44% a la huella de carbono generada cuando se incinera el EPS postconsumo. Por tal razón el sistema de estudio representar un modelo de gestión de residuos plásticos, no solo por la valorización del EPS postconsumo, sino también de otros plásticos reciclables que tienen un valor en otros mercados circulares.

Con respecto a la perspectiva social, los recicladores juegan un papel fundamental para que se lleve a cabo la actividad productiva de esta empresa. Dicha perspectiva hace parte de uno de los beneficios más significativos de los modelos de negocios enfocados en la economía circular, que es precisamente la generación de empleo, donde actualmente numerosas familias colombianas subsisten. Es importante que la empresa inicie con programas tanto ambientales como sociales, para que exista una integración entre los actores que permiten la obtención de materia prima, así como comercialización del producto final, incluyendo las acciones de mejora, que permitan dignificar dicho trabajo.

Teniendo en cuenta el análisis de pérdidas de materiales y energía, económico, social y ambiental, el sistema de estudio es viable técnicamente y cuenta con las herramientas para continuar como una actividad productiva que es amigable con el medio ambiente. Esto debido a que existe una mitigación de impactos ambientales en comparación con los generados cuando no existe una gestión integral de residuos reciclables y aprovechables. Por otra parte, es viable financieramente a largo plazo, cuyo escenario es dinámico de acuerdo a las alternativas económicas que se implementen, por ejemplo, en cuanto la generación de alianzas con otros gremios, montaje de nuevas sedes de la empresa e implementación de programadas de reciclaje y valorización de residuos de EPS.

Agradecimientos y financiamiento: Los autores agradecen al Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cavidad por la financiación del presente proyecto de investigación.

Referencias

- Allied Market Research. (2022). Expanded Polystyrene Market. Retrieved from <https://www.alliedmarketresearch.com/expanded-polystyrene-eps-market>
- Aranda Usón, Alfonso; Zabalza Bribián, I. (2010). *Eficiencia Energética - Ecodiseño y Análisis de Ciclo de Vida*. España: Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Área metropolitana Valle de Aburrá. (2022). Energías Renovables. Retrieved from <https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/Energias-Renovables.aspx#:~:text=En Colombia la producción de, reservas ya se están agotando.>
- Arguillarena, A., Margallo, M., Urriaga, A., & Irabien, A. (2021). Life-cycle assessment as a tool to evaluate the environmental impact of hot-dip galvanisation. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125676. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125676>
- AYMING. (2022). ¿Qué son los TRL (Technology Readiness Levels) o Niveles de Madurez Tecnológica? Retrieved from <https://www.ayming.es/insights-y-noticias/noticias/trl-technology-readiness-levels/>
- Bedoya Betancur, S. (2022). *Tesis de Maestría para optar al título de Magíster en Ingeniería - Simulación y Evaluación Tecno - Económica de la producción de ácido Clavulánico en Colombia*. Universidad de Antioquia.
- Betancourt-S., D.-J., & Solano-M., J.-K. (2016). Síntesis y caracterización de la mezcla polipropileno-poliestireno expandido (icopor) reciclado como alternativa para el proceso de producción de autopartes. *Luna Azul*, 43(43), 286–310. <https://doi.org/10.17151/luaz.2016.43.13>
- Camacho-Otero, J., Boks, C., & Pettersen, I. N. (2018). Consumption in the circular economy: A literature review. *Sustainability (Switzerland)*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/su10082758>
- Center, B. E. (2016). ILCD 2011 + (versión 1.0.9, mayo 2016). Retrieved from <http://www.basqueecodesigncenter.net/Paginas/Ficha.aspx?IdMenu=f86840d2-0d70-43b2-8e0d-323d392cd026&Idioma=es-ES>
- Centro de Información Técnica - CIT ECOPLAS. (2011). Boletín Técnico Informativo No°38 - Poliestireno, Características y Ventajas respecto al Medio Ambiente.
- Chaukura, N., Gwenzi, W., Bunhu, T., Ruziwa, D. T., & Pumure, I. (2016). Potential uses and value-added products derived from waste polystyrene in developing countries: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 107, 157–165. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.10.031>
- de Oliveira, C. T., Mônica, M. M. M., & Campos, L. M. S. (2019). Understanding the Brazilian expanded polystyrene supply chain and its reverse logistics towards circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 235, 562–573. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.319>
- de Souza Junior, H. R. A., Dantas, T. E. T., Zanghelini, G. M., Cherubini, E., & Soares, S. R. (2020). Measuring the environmental performance of a circular system: Energy and LCA approach on a recycle polystyrene system. *Science of the Total Environment*, 726, 138111. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138111>
- ECOINVENT. (2022). Selected database: Version 3.7.1 - Polystyrene foam slab, 100% recycled. Retrieved from <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/>
- García, M. T., Gracia, I., Duque, G., de Lucas, A., & Rodríguez, J. F. (2009). Study of the solubility and stability of polystyrene wastes in a dissolution recycling process. *Waste Management*, 29(6), 1814–1818.
- Gil-jasso, N. D., Segura-gonzález, M. A., Soriano-giles, G., Neri-hipolito, J., López, N., Mas-hernández, E., & Barrera-díaz, C. E. (2019). Dissolution and recovery of waste expanded polystyrene using alternative essential oils. *Fuel*, 239(November 2018), 611–616. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.055>
- Gobierno de la Republica de Colombia,. (2019). *Estrategia Nacional de Economía Circular - Cierre de ciclos de materiales, innovación tecnológica, colaboración y nuevos modelos de negocio*. Bogotá, Colombia: Presidencia de la República; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible; Ministerio de Comercio, Industria y Turismo.
- Gomes, R., Silvestre, J. D., & de Brito, J. (2020). Environmental life cycle assessment of the manufacture of EPS granulates, lightweight concrete with EPS and high-density EPS boards. *Journal of Building Engineering*, 28(July 2019). <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101031>
- GRAND VIEW RESEARCH. (2022). Expanded Polystyrene Market Growth & Trends.
- Heshmati, A. (2017). A review of the circular economy and its implementation. *International Journal of Green Economics*, 11(3–4), 251–288. <https://doi.org/10.1504/IJGE.2017.089856>
- Hidalgo-Crespo, J., Jervis, F. X., Moreira, C. M., Soto, M., & Amaya, J. L. (2020). Introduction of the circular economy to expanded polystyrene household waste: A case study from an Ecuadorian plastic manufacturer. *Procedia CIRP*, 90, 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.089>
- Hidalgo-Crespo, J., Moreira, C. M., Jervis, F. X., Soto, M., Amaya, J. L., & Banguera, L. (2022). Circular economy of expanded polystyrene container production: Environmental benefits of household waste recycling considering renewable energies. *Energy Reports*, 8, 306–311. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.01.071>

- Hidalgo-Crespo, J., Soto, M., Amaya-Rivas, J. L., & Santos-Méndez, M. (2022). Carbon and water footprint for the recycling process of expanded polystyrene (EPS) post-consumer waste. *Procedia CIRP*, 105, 452–457. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.075>
- Hischier, R. (2022). Selected Database Ecoinvent: Version 3.7.1 - Waste treatment of Expanded Polystyrene, Municipal incineration.
- Ingrao, C., Lo Giudice, A., Bacenetti, J., Mousavi Khaneghah, A., Sant'Ana, A. de S., Rana, R., & Siracusa, V. (2015). Foamy polystyrene trays for fresh-meat packaging: Life-cycle inventory data collection and environmental impact assessment. *Food Research International*, 76, 418–426. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2015.07.028>
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013 - The physical Science Basis*. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL.pdf
- Ishrat, S. I., Khan, Z. A., Siddiquee, A. N., Badruddin, I. A., Algahtani, A., Javaid, S., & Gupta, R. (2019). Optimising parameters for expanded polystyrene based pod production using Taguchi method. *Mathematics*, 7(9). <https://doi.org/10.3390/math7090847>
- Ismail, H., Irani, M., & Ahmad, Z. (2013). Superabsorbent hydrogels prepared from waste polystyrene and linear low-density polyethylene. *Journal of Elastomers and Plastics*, 45(6), 536–550. <https://doi.org/10.1177/0095244312458604>
- Noguchi, T., Miyashita, M., Inagaki, Y., & Watanabe, H. (1998). A new Recycling System for Expanded Polystyrene using a Natural Solvent. Part 1. A new Recycling Technique. *Packaging Technology and Science : An International Journal*, 11(1), 19–27.
- OpenLCA. (2017). LCIA methods: ILCD 2011 V1.0.10 method update in openLCA. *Open LCA, ILCD 1.0.1*(August 2016), 1–42.
- Osorio Rosado, C. (2017). *Consulta popular ante los impactos ambientales de la construcción de Proyectos Hidroeléctricos en Colombia. Estudio del Caso de la hidroeléctrica El Quimbo*. Retrieved from <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/15905/1/Impactos%ambiantales%de%los%proyectos%hidroelectricos%en%Colombia.pdf>
- Pargana, N., Pinheiro, M. D., Silvestre, J. D., & De Brito, J. (2014). Comparative environmental life cycle assessment of thermal insulation materials of buildings. *Energy and Buildings*, 82, 466–481. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.057>
- The World Bank (2022). *What a Waste 2.0 - A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050 : Trends in Solid Waste Management*. Washington, DC: Library of Congress Cataloging. Retrieved from <https://datatopics.worldbank.org/what-a-waste/trends-in-solid-waste-management.html>