

TESIS DE LA UNIVERSIDAD  
DE ZARAGOZA

2021

353

José Eduardo Galve Villa

# Evaluación del impacto ambiental del proceso de reciclado de materiales plásticos.

Director/es

Dr. D. Carmelo Pina Gadea  
Dr. D. Daniel Elduque Viñuales

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

ISSN 2254-7606



Prensas de la Universidad  
Universidad Zaragoza





**Universidad**  
Zaragoza

Tesis Doctoral

**EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL DEL  
PROCESO DE RECICLADO DE MATERIALES  
PLÁSTICOS.**

Autor

José Eduardo Galve Villa

Director/es

Dr. D. Carmelo Pina Gadea  
Dr. D. Daniel Elduque Viñuales

**UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA**  
Escuela de Doctorado

2021





**Universidad**  
Zaragoza

# Tesis Doctoral

---

Evaluación del impacto ambiental del proceso de  
reciclado de materiales plásticos.

Autor

José Eduardo Galve Villa

Director/es

Dr. Daniel Elduque Viñuales

Dr. Carmelo Pina Gadea

Programa de Doctorado en Ingeniería Mecánica

Departamento de Ingeniería Mecánica

Universidad de Zaragoza

Julio 2021



## Tesis por compendio de publicaciones

Esta tesis doctoral se presenta como compendio de publicaciones realizadas a lo largo de la fase de desarrollo del presente trabajo de investigación.

En el siguiente listado se incluyen las referencias de las publicaciones por orden cronológico de aceptación, así como los congresos internacionales. En aquellas publicaciones realizadas en revistas indexadas JCR se indica el factor de impacto.

### Revistas JCR:

- Galve, J.E.; Elduque, D.; Pina, C.; Javierre, C. Sustainable Supply Chain Management: The Influence of Disposal Scenarios on the Environmental Impact of a 2400 L Waste Container. **Sustainability** **2016**, **8**, **564**. JCR 2016: 1.789, **Q2**, 47/105 DOI 10.3390/su8060564
- Galve, J.E.; Elduque, D.; Pina, C.; Clavería, I.; Acero, R.; Fernández, Á.; Javierre, C. Dimensional Stability and Process Capability of an Industrial Component Injected with Recycled Polypropylene. **Polymers** **2019**, **11**, **1063**. JCR 2019: 3.426, **Q1**, 16/89 DOI 10.3390/polym11061063
- Galve, J.E.; Elduque, D.; Pina, C.; Javierre, C.; “Life Cycle Assessment of a Plastic Part Injected with Recycled Polypropylene. A Comparison with Alternative Virgin Materials”, **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology** (2021) (JCR 2020: 5.671, **Q1-D1**, 9/135 DOI: 10.1007/s40684-021-00363-2

### Congresos Internacionales:

- José E. Galve, Daniel Elduque, Carmelo Pina, Isabel Clavería, Carlos Javierre. Dimensional stability and process capability of an industrial component injected with recycled polypropylene. 30<sup>th</sup> **European Modelling and Simulation Symposium, EMSS 2018**; Budapest; Hungary; 17 September 2018 through 19 September 2018; Code 140342 Pages 241-247. Publicado en Scopus.



## Agradecimientos

Quiero agradecer en primer lugar a mis directores Carmelo y Dani por el tiempo y su esfuerzo que han empleado en guiarme, apoyarme y empujarme hasta la consecución de esta tesis. También a Carlos, que fue quien me enseñó los primeros pasos y quien me pasó el gusanillo de la sostenibilidad.

A todos mis compañeros de BSH por el apoyo a lo largo de los años. Nunca he recibido una mala palabra ni una mala contestación tras años de pedir datos, detalles o información. Gracias por el interés y las ganas de ayudar.

A Rialti, que ha proporcionado una información valiosa con el fin de aprender, sin pedir nunca nada a cambio. Elena, Marco, gracias por las respuestas y por la disposición.

A mis padres y mi hermana, que siempre me han empujado a dar un paso más, a seguir adelante.

Y sobre todo a Eva. Gracias por ser siempre el soporte y darme la energía que necesitaba cuando ya no la encontraba.

*Tengo la teoría de que, si das el 100% todo el tiempo, de alguna manera las cosas funcionarán al final.*

*Larry Bird*



## Introducción General

El consumo de plástico a nivel mundial ha sufrido un aumento continuo desde la invención del mismo. La flexibilidad que ofrece en cuanto a propiedades físicas, métodos de fabricación o coste lo convierten en uno de los materiales más útiles y flexibles a la hora de diseñar productos. Sin embargo, en las últimas décadas el uso excesivo y el inadecuado tratamiento tras su fase de uso nos ha hecho enfrentarnos al problema de la gestión de estos residuos.

A la vez que el volumen de plástico acumulado en el mundo aumentaba, también lo ha hecho la conciencia medioambiental de la sociedad. Se ha promovido un cambio en el modelo económico y social que obliga a las empresas a hacer frente al reto de generar menos residuos y gestionar de la manera más eficiente posible los generados.

El aspecto medioambiental llegó al diseño de producto con una metodología que buscaba disminuir el impacto ambiental de los productos desde la misma fase de concepción de los mismos. El conocido como “Ecodiseño” propone adicionalmente, mediante diferentes enfoques, la valoración del impacto ambiental como un factor más sobre el que se puede influir en la fase de diseño. Algunos de estos enfoques pasan por seleccionar materiales y procesos de fabricación con cargas ambientales menores a otras alternativas y seleccionar métodos de unión entre componentes que permitan una rápida y fácil separación y reciclabilidad.

Esta tesis se centra en la evaluación ambiental del plástico reciclado y en el análisis de viabilidad de su uso para procesos industriales. El impacto ambiental se ha analizado de forma comparativa para una misma unidad funcional que puede ser fabricada en distintos materiales de origen virgen y un material reciclado, de forma más concreta, buena parte de la tesis doctoral se ha centrado en el estudio de una pieza de plástico utilizada en encimeras de inducción cuyo principal objeto es el alojamiento de placas electrónicas y la gestión del cableado interno del aparato. El resultado, publicado en el artículo “Life Cycle Assessment of a Plastic Part Injected with Recycled Polypropylene. A Comparison with Alternative Virgin Materials”, muestra la reducción del impacto desglosada en las diferentes etapas del ciclo de vida del producto. El análisis parte de la descomposición del proceso completo en fases y el estudio de todos los procesos llevados a cabo para recuperar desechos post-industriales de plástico. Este proceso se realiza hasta la obtención de material reciclado, cuyas características físicas son equiparables, según los resultados de la investigación, a las de materiales vírgenes.

Esta reducción supone el 30% del impacto, según la metodología ReCiPe, para el caso de la sustitución directa de un material virgen por otro reciclado. Se debe principalmente al descenso de los impactos asociados a la fabricación de la materia prima. Se puede afirmar, por tanto, que en un escenario en el que técnicamente sea viable el uso de materiales reciclados, se obtendrá un mayor ahorro medioambiental al sustituir dichos materiales vírgenes por su correspondiente alternativa de fuentes recicladas.

El análisis de las propiedades mecánicas del material reciclado comienza con la realización de una simulación del proceso de inyección comparativa entre ambas fuentes de material para una pieza de plástico utilizado como soporte de electrónica y gestión de cableado en encimeras de inducción del grupo BSH. Para la caracterización de las propiedades mecánicas del material se requerían muestras inyectadas con dicho material en un molde ya existente. Para asegurar la factibilidad, se realizó una caracterización reológica y posteriormente una simulación del proceso de inyección. El análisis de la grana demuestra una mayor viscosidad en el material reciclado que, sin embargo, no afecta de forma considerable al proceso de moldeo por inyección. Los resultados fueron presentados en el *30º Congreso Europeo de Modelado y Simulación (EMSS)* de 2018 en Budapest, con el artículo titulado: “*PROCESSABILITY ANALYSIS OF AN INJECTED PART IN VIRGIN OR RECYCLED POLYPROPYLENE*”

Debido al origen post-industrial de los desechos y al proceso de reciclaje mecánico sufrido para llegar a su nuevo estado, el material reciclado sufre una serie de daños en su estructura interna, como el acortamiento de sus cadenas poliméricas, que pueden alterar, entre otros aspectos, su comportamiento

dimensional en piezas inyectadas o bien generar alabeos o deformaciones debido a las tensiones internas. En el artículo *“Dimensional Stability and Process Capability of an Industrial Component Injected with Recycled Polypropylene”* se analizan las variaciones dimensionales sufridas por un componente inyectado en material reciclado sometido a diferentes ensayos térmicos y comparados con el material original. Se comprueba el efecto del aumento de viscosidad observado en el material reciclado, generando mayor cantidad de tensiones internas en la pieza analizada. Estas tensiones, liberadas ante la aportación de energía en el calentamiento a diferentes temperaturas, provocan alteraciones dimensionales distintas en piezas de diferentes materias primas. Esto se ve agravado por la geometría de la pieza por la que se observa el efecto de la menor rigidez del material reciclado. La mayor contracción se obtiene en las dimensiones afectadas por geometrías menos rígidas. Sin embargo, la variación dimensional, si bien tiende a ser mayor en material reciclado, no es significativa a efectos prácticos, por lo que se ha determinado viable la utilización de estos materiales para la pieza estudiada.

También se realiza un estudio de la estabilidad del proceso de inyección para ambos materiales. El resultado arroja la viabilidad de utilizar materiales reciclados, obteniendo parámetros aceptables de los valores de  $C_p$  y  $C_{pk}$  en todos los casos. Sin embargo, sí se muestra una mayor variabilidad en las medidas obtenidas en materiales reciclados, estando los resultados de las muestras analizadas en material virgen, comprendidos en un rango de medidas menor.

Por último, se analizan las propiedades mecánicas en base a muestras obtenidas a partir de piezas inyectadas en ambos materiales. De nuevo se analizan las propiedades consideradas de mayor interés (tensión de fluencia y módulo elástico) a tres diferentes temperaturas: temperatura ambiente, 50°C y 80°C. Estas temperaturas de análisis se han seleccionado por considerarse situaciones reales durante su etapa de almacenamiento previo a su ensamblaje, y en su etapa de uso.

El resultado de éste análisis muestra una pérdida de propiedades del 22% del módulo elástico en el material reciclado con respecto al material virgen y de ambos con respecto a sus fichas técnicas. Esta disminución, sin embargo, tiende a igualarse cuando el material se encuentra a temperaturas mayores, siendo el límite elástico un 13% mayor para el material virgen a 50°C y de nuevo un 11% menor con respecto al material virgen a 80°C.

Por tanto, con que esta tesis doctoral se ha logrado evaluar la viabilidad técnica y ambiental del uso de material reciclado. Los resultados obtenidos han servido para introducir un PP reciclado en la producción de encimeras de inducción.

## Índice

Tesis por compendio de publicaciones.....	3
Agradecimientos.....	5
Introducción General.....	7
Índice.....	9
Listado de Figuras.....	11
Listado de Tablas.....	12
1. INTRODUCCIÓN.....	15
Justificación.....	17
Metodología.....	17
Objetivos.....	18
Esquema y Desarrollo del Documento.....	19
2. ESTADO DEL ARTE.....	23
3. ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL DE MATERIALES RECICLADOS.....	33
Obtención de los desechos post-industriales.....	34
Producción de PP reciclado.....	35
Distribución.....	39
Fin de vida.....	39
Resultados.....	41
4. COMPORTAMIENTO EN INYECCIÓN DEL MATERIAL RECICLADO.....	47
Análisis de la inyección del material reciclado.....	49
Resultados de la simulación de inyección de material virgen.....	52
Resultados de la simulación de inyección de material reciclado.....	54
5. COMPORTAMIENTO DIMENSIONAL DEL MATERIAL RECICLADO.....	61
Variación dimensional en condiciones extremas.....	67
Comportamiento dimensional con temperatura.....	69
Análisis de estabilidad de proceso.....	71
6. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL RECICLADO.....	77
Límite de fluencia.....	81
Módulo Elástico.....	82
7. CONCLUSIONES GENERALES.....	87
Conclusiones ACV.....	87
Conclusiones sobre el Proceso de Inyección del Material Reciclado.....	88
Conclusiones sobre el Análisis Dimensional del Material Reciclado.....	89
Conclusiones sobre el Análisis de las Propiedades Mecánicas.....	89
8. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	93
9. BIBLIOGRAFÍA.....	97

10. PUBLICACIONES.....	105
Sustainability: Sustainable Supply Chain Management: The Influence of Disposal Scenarios on the Environmental Impact of a 2400 L Waste Container.....	107
EMSS: Processability Analysis of an Injected part in virgin or recycled polypropylene.....	121
Polymers: Dimensional Stability and Process Capability of an Industrial Component Injected with Recycled Polypropylene.....	129
International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology: Life Cycle Assessment of a Plastic Part Injected with Recycled Polypropylene. A Comparison with Alternative Virgin Materials.....	147
Patente EP3679304A1: HOB APPARATUS.....	163

## Listado de Figuras

Figura 1 Modelo de Economía Lineal (21) .....	24
Figura 2 Modelo de Economía Circular (21) .....	24
Figura 3 Etapas del Ciclo de Vida del producto: enfoque circular, (88).....	26
Figura 4 Evolución de reciclado total de plásticos en España (89) .....	27
Figura 5 Porcentajes de fin de vida de materiales plásticos en países de la UE (1).....	28
Figura 6 Evolución en índice del reciclado de envases de plástico en España (89) .....	29
Figura 7 Soporte de electrónica utilizado para el análisis. ....	33
Figura 8 Desechos post-industriales preparados para su procesado .....	34
Figura 9 Proceso productivo de reciclaje de PP. (62) .....	36
Figura 10 Granza resultante del proceso de reciclado. ....	38
Figura 11 Diagrama de material y transportes del SC4 (bucle cerrado) .....	40
Figura 12 Impacto porcentual de los procesos en material reciclado y virgen, ReCiPe .....	42
Figura 13 Impacto porcentual de los procesos en material reciclado y virgen, Huella de Carbono .....	43
Figura 14 Reómetro capilar Instron Ceast sr20 .....	49
Figura 15 Resultados del análisis de viscosidad de material virgen y reciclado .....	49
Figura 16 Soporte plástico de encimeras de inducción utilizado como base para el análisis. ....	50
Figura 17 Definición de los puntos de inyección y refrigeración del molde .....	51
Figura 18 Distribución de llenado, material virgen .....	52
Figura 19 Presión de conmutación V/P, material virgen .....	52
Figura 20 Distribución de temperatura, material virgen. ....	53
Figura 21 Presión en el punto de inyección, material virgen. ....	53
Figura 22 Fuerza de cierre, material virgen. ....	54
Figura 23 Distribución de llenado, material reciclado. ....	55
Figura 24 Presión de conmutación V/P, material reciclado.....	55
Figura 25 Distribución de temperatura, material reciclado. ....	56
Figura 26 Presión en el punto de inyección, material reciclado.....	56
Figura 27 Fuerza de cierre, material reciclado .....	57
Figura 28 Detalle de la ubicación de los puntos de análisis de medición. $D_i$ .....	64
Figura 29 Mesa de medición por coordenadas. ....	65
Figura 30 Eje de coordenadas utilizado en la medición. ....	65
Figura 31 Distribución de temperatura a la salida del molde.....	67
Figura 32 medición $D_i$ bajo diferentes condiciones ambientales para material virgen y reciclado (en mm) (a) $D_1$ ; (b) $D_2$ ; (c) $D_3$ ; (d) $D_4$ ; (e) $D_5$ . ....	68
Figura 33 Variación dimensional entre muestras calentadas y no calentadas tras la estabilización a temperatura ambiente. ....	69
Figura 34 Variación dimensional entre muestras calentadas a 50°C y muestras calentadas a 80°C tras estabilización a temperatura ambiente. ....	70
Figura 35 Distribución para $D_1$ en material virgen.....	72
Figura 36 Distribución para $D_4$ en material virgen.....	72
Figura 37 Distribución para $D_1$ en material reciclado. ....	73
Figura 38 Distribución para $D_4$ en material reciclado .....	73
Figura 39 Obtención de las probetas a partir del soporte ELIN.....	77
Figura 40 Dimensiones de las probetas mecanizadas. ....	78
Figura 41 Máquina Instron del área del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza .....	78
Figura 42 Caracterización de las muestras a 50°C y 80°C con cámara climática. ....	79
Figura 43 Curvas tensión deformación para material virgen y reciclado a diferentes temperaturas. ....	79
Figura 44 Curvas módulo- deformación para material virgen y reciclado a diferentes temperaturas .....	80
Figura 45 Comparativa de tensión de fluencia .....	81

Figura 46 Valores del módulo elástico [MPa] a diferentes condiciones de temperatura, para el material virgen y reciclado, (a) módulo al 0,2%; (b) módulo al 1% .....	82
Figura 47 Diferencias del módulo elástico entre muestras calentadas a 50°C y 80°C, .....	83
Figura 48 Diferencias entre materiales para las temperaturas 23°C, 50°C y 80°C, (a) módulo al 0,2%; (b) módulo al 1% .....	83

## Listado de Tablas

Tabla 1 Transporte promedio del PP Post-industrial al reciclador. Asignación en Ecoinvent. ....	34
Tabla 2 Transporte máximo del PP Post-industrial al reciclador. Asignación en Ecoinvent. ....	35
Tabla 3 Composición química del talco dolomítico. Asignación en Ecoinvent. ....	37
Tabla 4 Composición química del talco clorítico. Asignación en Ecoinvent. ....	37
Tabla 5 Asignación de consumos auxiliares en Ecoinvent. ....	38
Tabla 6 Porcentajes de reciclado para termoplástico y metal según los escenarios de fin de vida definidos .....	40
Tabla 7 Resultados de impacto del SC4 según el método de transporte seleccionado .....	40
Tabla 8 Impacto de la obtención de 1kg de PP + 40% talco, ReCiPe. ....	41
Tabla 9 Impacto de la obtención de 1kg de PP + 40% talco, Huella de Carbono. ....	41
Tabla 10 Impactos por proceso para un componente, ReCiPe. ....	42
Tabla 11 Impactos por proceso para un componente, Huella de Carbono. ....	43
Tabla 12 Comparativa de propiedades de material virgen y reciclado. ....	63
Tabla 13 Mediciones (en mm) en condiciones $M_0$ .....	66
Tabla 14 Variación dimensional para $\Delta T=20^{\circ}\text{C}-50^{\circ}\text{C}$ y $\Delta T=50^{\circ}\text{C}-80^{\circ}\text{C}$ . En mm. ....	70
Tabla 15 $C_p$ y $C_{pk}$ calculados para ambos materiales .....	71
Tabla 16 Resultados de los ensayos de tracción .....	81
Tabla 17 Resultados de módulo elástico [MPa] para material virgen y reciclado .....	82

---

# *Capítulo 1*

---

## *Introducción*



## INTRODUCCIÓN

La tesis doctoral “Evaluación del impacto ambiental del proceso de reciclado de materiales plásticos” se ha desarrollado gracias a la colaboración del grupo de investigación i+ de la Universidad de Zaragoza con el Centro de Tecnología de Inducción de BSH Electrodomésticos S.A. Ha sido dirigida por el Dr. Daniel Elduque Viñuales y el Dr. Carmelo Pina Gadea. Esta tesis se presenta mediante compendio de publicaciones, las cuales pueden verse en capítulos posteriores de esta memoria.

Esta tesis supone la continuación de la línea de trabajo iniciada con el proyecto de fin de carrera del doctorando sobre metodologías de diseño mecánico considerando como criterio de diseño el mínimo impacto ambiental, y que fue dirigido por el profesor Carlos Javierre del Área de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza, dentro del grupo de investigación i+ (ingeniería mecánica avanzada sostenible).

Durante dicho proyecto fin de carrera se analizaron conjuntos mecánicos desde el punto de vista del impacto ambiental, aplicando metodologías de diseño considerando el factor medioambiental. La introducción del impacto ambiental dentro del proceso de diseño es un concepto relativamente reciente, sobre el cual muchos autores están investigando. Así mismo, muchas empresas están incorporando el punto de vista del impacto ambiental dentro de sus procesos de toma de decisiones.

Los equipos de desarrollo de producto nos vemos influidos cada día por la creciente conciencia medioambiental de las empresas. Estas, a su vez, se sienten influidas por la conciencia social y empujadas por cambios normativos y legislativos a nivel europeo, siendo estos una tendencia creciente. Algunas de estas normativas se centran en la mejora de la gestión, y en la integración del diseño ecológico en la industria. Una buena estrategia para muchas compañías es intentar adelantarse, de forma progresiva, a las tendencias y futuras normativas/legislaciones sobre productos sostenibles que condicionarán el diseño.

Dentro del trabajo de un ingeniero de desarrollo mecánico se toman decisiones que afectan a criterios tradicionales como el económico, o el técnico, pero que además influyen en el impacto ambiental de producto. Algunos de los aspectos en los que puede influir el diseñador son la selección de materiales, las uniones entre componentes, los procesos de fabricación, el transporte o el fin de vida. Para poder evaluar cada una de estas decisiones, es necesario investigar de forma detallada sobre los factores que influyen, generando, por tanto, conocimiento que puede ser luego extrapolado a otros componentes y productos.

Una de las decisiones más críticas, y con mayor relevancia dentro del diseño mecánico, es la selección de materiales. La gran mayoría de los productos industriales contienen componentes poliméricos, siendo los más utilizados los denominados termoplásticos que cada vez son más empleados frente a los termoestables o elastómeros, principalmente porque el hecho de que fundan por calor facilita su procesado y su reaprovechamiento tras su utilización. Sin embargo, pese a que su reciclaje es teóricamente factible, el plástico es un material recuperado en contadas ocasiones en piezas de carácter técnico, ya que existe una gran diversidad de materias primas, así como de cargas utilizadas. Todo ello dificulta la identificación del material y, por tanto, su reciclado. Únicamente productos muy específicos como botellas o envases, con materias primas conocidas y fácilmente identificables, son recuperados de forma habitual. Muchas empresas e investigadores trabajan en la identificación de fuentes estables de materia prima reciclable, siendo esta estabilidad en el suministro un punto crítico para el uso de estas materias primas recicladas.

Una de las dificultades del reciclaje, es el hecho de que los materiales plásticos reciclados pueden sufrir una considerable pérdida de propiedades mecánica, físicas, etc., si el proceso de reciclaje no se realiza de forma adecuada.

Por todos estos motivos, se consideró interesante comenzar un trabajo de investigación doctoral que profundizase en el análisis del impacto ambiental de plásticos reciclados, teniendo en cuenta sus

propiedades mecánicas y su proceso de reciclaje, desarrollando una metodología que permitiera que un diseñador pudiera llegar a compararlos con materiales convencionales, tanto desde el punto de vista de impacto ambiental, como el técnico, y teniendo en cuenta las propiedades mecánicas.

Al estar actualmente trabajando dentro del equipo de desarrollo de encimeras de inducción de BSH, se ha considerado adecuado centrar esta investigación principalmente en materiales utilizados/utilizables dentro de este producto, pudiendo considerar materiales 100% reciclados.

Para ello, se ha estudiado la modificación de propiedades en dichos materiales, utilizando los medios de los laboratorios de la planta de BSH en Montañana, los del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza, y también los del proveedor del material reciclado, localizado en Italia.

El grupo de investigación donde se desarrolla esta tesis tiene una amplia experiencia tanto en la caracterización de materiales termoplásticos reciclados, como en la caracterización de procesos industriales desde el punto de vista de impacto ambiental. Esto se ha visto reflejado en la publicación de numerosos artículos en revista de gran prestigio científico y en el desarrollo de tesis doctorales y otros trabajos de investigación.

Para confirmar la viabilidad del uso de materiales 100% reciclados con origen post-industrial se han analizado sus propiedades reológicas y se ha simulado, comparando con materiales vírgenes, la variación producida por el uso de uno u otro material durante el proceso de inyección. Posteriormente, y en base a muestras reales inyectadas en ambos materiales, se ha analizado la variación dimensional y la estabilidad del proceso que se puede alcanzar utilizando ambos materiales y la variación de propiedades físicas producidas por el aumento de temperatura en ambos casos.

Con todo esto, en esta tesis doctoral se ha logrado evaluar la viabilidad técnica y ambiental del uso de material reciclado. Los resultados obtenidos han servido para introducir un PP reciclado en la producción de encimeras de inducción.

## Justificación

La creciente conciencia ambiental de la sociedad ha aportado nuevas vías de negocio y tratamiento de materiales como son el tratamiento de residuos y el reciclaje. La presión existente para la reducción del impacto ambiental ha provocado que organismos de la Unión Europea generen regulaciones específicas y nuevos marcos normativos.

Las regulaciones más conocidas afectan a la composición de los materiales como la RoHS, RoHS2 y REACH, y al tratamiento de residuos como la WEEE y WEEE2. El marco normativo es un ámbito mucho más amplio que se centró, en un primer momento, en la definición de la metodología de análisis del impacto ambiental mediante la ISO 14040.

El incremento del reciclaje y la mejora en los procesos, tanto industriales como los procesos de trazabilidad e identificación de los materiales, ofrece la posibilidad de reutilizar estos materiales una vez recuperados tras su fase industrial o su ciclo de vida. Si bien el proceso de reciclado de un material es algo conocido en muchos ámbitos, no lo es tanto en cuanto se refiere a plásticos técnicos y materiales con cargas o aditivos que requieren una separación y tratamiento mucho más cuidadoso. De ahí que los materiales reciclados se separan en dos grandes familias dependiendo de su procedencia: post-industriales y post-consumo.

El polipropileno representa el 20% del consumo anual europeo de materiales plásticos, aproximadamente 10Mt, gran parte de los mismos dedicados a embalaje, automoción o construcción (1). Grandes empresas del sector de la electrónica de consumo representan también buena parte del consumo, como el fabricante de electrodomésticos BSH, cuyo consumo anual de Polipropileno en el año 2020 fue de 90.000Tn.

Esta tesis doctoral trata de obtener una caracterización exhaustiva del impacto ambiental del proceso de reciclado del material Polipropileno de forma que se pueda conocer con exactitud los valores asociados al proceso. Este valor de impacto calculado permite establecer comparativas realistas sobre los valores de impacto ambiental de un producto concreto fabricado en material virgen o reciclado.

Uno de los objetivos de esta tesis será desarrollar una metodología que permita cuantificar el impacto ambiental del proceso de reciclaje de materiales plástico; así como analizar la factibilidad de su uso en procesos industriales gracias al análisis de las propiedades mecánicas del material reciclado y su comparación con el material virgen.

La potencial sustitución del PP virgen por material reciclado es un objetivo ambiental ambicioso que, de hacerse realidad, alinearía la realidad de la empresa con los objetivos definidos de economía circular y sostenibilidad.

Esta tesis define y aplica una metodología para el análisis de la sustitución de materiales poliméricos vírgenes por alternativas recicladas. Sin embargo, la metodología podría aplicarse al reciclaje y evaluación del impacto ambiental de otros materiales, productos o procesos.

## Metodología

El impacto ambiental de un producto, o servicio se calcula, de forma científica, a través del Análisis del Ciclo de Vida (LCA por sus siglas en inglés: Life Cycle Assessment), que se define en las normas ISO 14040 (2) y 14044 (3). El LCA permite un estudio completo, teniendo en cuenta todas las fases del ciclo de vida (4) (5), (6) realizándolo de una forma sistemática y objetiva. El LCA se realiza mediante el uso de herramientas profesionales, como Simapro 9, (7) o con aquellas desarrolladas para su utilización con un propósito específico como Ecotool (desarrollada por la Universidad de Zaragoza y adaptado para diversas empresas como BSH).

En la aplicación práctica, el LCA se utiliza para la evaluación y comparación de productos, procesos o servicios. Esta metodología se ha utilizado para analizar el impacto de la fabricación de materias primas (8) (9) o de productos (10), infraestructuras (11) o procesos (12) (13).

El impacto ambiental se calcula utilizando bases de datos, entre las que destaca EcoInvent v3.5 (14), que ofrece una gran cantidad de datos de impacto ambiental de materiales, procesos, y permite realizar el cálculo según diferentes metodologías.

Se ha utilizado, como cálculo de referencia, la metodología ReCiPe, que transforma el inventario realizado y clasifica su impacto ambiental en 18 indicadores “midpoint” y 3 “endpoint”. Posteriormente se calcula un resultado de impacto final que permite una comparación directa entre materiales, productos y procesos. (15)

La metodología LCA permite la evaluación en múltiples categorías de impacto, como la huella de carbono. Debido a su relevancia social, esta también se ha incluido en el estudio, calculándola a partir de la IPCC 2013 GWP que ofrece un valor de impacto muy claro y de sencilla comprensión (16) y cuya aplicación está también extendida como parámetro para evaluar determinadas afecciones al medio ambiente (17)

## Objetivos

Dentro del objetivo principal de esta tesis se encuentra la caracterización, desde el punto de vista de impacto ambiental y técnico, del proceso de reciclado que puede sufrir un material plástico. Se pretende parametrizar de forma detallada las diferentes operaciones que intervienen en dicho proceso y calcular el impacto ambiental que tiene la generación de un kilo de material termoplástico en función de dichos parámetros. Al mismo tiempo se quiere desarrollar una metodología de caracterización mecánica del material reciclado de cara a ponderar el impacto ambiental y la pérdida de propiedades del material en función de la variación respecto a un material virgen.

Así pues, se han definido los siguientes objetivos fundamentales:

- Desarrollo de una metodología para la comparación de material virgen y reciclado desde el punto de vista ecológico y técnico. A través de esta metodología será posible comparar en igualdad de condiciones ambos tipos de material de forma que sus propiedades físicas e impacto ambiental sean valorados de forma objetiva de cara a su selección para su utilización a nivel industrial.
- Cuantificación del impacto ambiental del proceso de reciclaje de materiales plásticos.
- Cuantificación de la modificación en las propiedades mecánicas y ambientales tras el proceso de reciclado.
- Estudio comparativo de la fabricación y propiedades físicas de una pieza inyectada desde el punto de vista ambiental y funcional.
- Evaluación de la viabilidad de uso de materiales reciclados. Estudio de la trazabilidad del proceso de cara a garantizar un flujo de material y propiedades estables en el tiempo. Búsqueda e implementación de un material reciclado adecuado para su utilización en la fabricación de componentes de encimeras de inducción.
- Cuantificación del impacto del lugar de reprocesamiento y/o reciclaje. Estudio de la variación del impacto y viabilidad del reciclaje desde el punto de vista ambiental en función del tratamiento seleccionado, del modo de transporte disponible y de las distancias.
- Estudio comparativo del comportamiento y evolución dimensional del material reciclado y virgen bajo temperaturas de uso en encimeras de inducción.
- Estudio comparativo del comportamiento teórico durante el proceso de inyección con herramientas de simulación informática.

## Esquema y Desarrollo del Documento

Una vez expuestos los objetivos y la metodología de esta tesis doctoral, se expone la estructura que del presente documento:

- Estado del arte.
- Análisis del impacto ambiental de materiales reciclados.
- Comportamiento durante la inyección del material reciclado.
- Propiedades dimensionales del material reciclado.
- Propiedades mecánicas del material reciclado.
- Conclusiones.
- Futuras líneas de investigación.
- Bibliografía.
- Publicaciones.



---

# *Capítulo 2*

---

*Estado Del Arte*



## ESTADO DEL ARTE

A lo largo del siglo XX, los materiales plásticos han sufrido un gran incremento en su uso e importancia en sectores industriales (1). Su capacidad para sustituir otros materiales con un amplio rango de propiedades mecánicas lo hacen imprescindible en el diseño de productos y componentes del día a día.

Los materiales plásticos están formados por cadenas moleculares de compuestos orgánicos, y su forma es fácil de modificar mediante presión y temperatura, dando como resultado el ajuste del material a la geometría definida por los útiles utilizados en el conformado. La gran variedad de compuestos existentes permite seleccionar entre una amplia gama de propiedades físicas en función de los requerimientos exigidos.

Sin embargo, los materiales plásticos también tienen limitaciones intrínsecas a su composición, como una baja resistencia a las altas temperaturas, ya que pueden modificar sus propiedades a temperaturas cercanas a la de fusión del material.

Los materiales plásticos pueden estructurarse en tres grandes grupos según su composición interna: termoplásticos, termoestables y elastómeros.

- Los materiales termoplásticos son aquellos cuya estructura interna no se ve afectada por el calentamiento, dando como resultado la capacidad de fundir y moldearse tantas veces como sea necesario con un mínimo efecto en la estructura molecular.
- Los materiales termoestables sí sufren un cambio en su estructura molecular una vez pasan por el proceso de moldeo. El calor transforma sus cadenas moleculares de forma que ya no es posible volverlos a moldear debido a los fuertes enlaces internos que se generan. Los elastómeros son polímeros formados por cadenas elásticas que permiten grandes deformaciones.

Pueden tener origen natural o sintético. Los materiales termoplásticos se modifican mediante aditivos o cargas que complementan al polímero modificando sus características físico-químicas (18), y que pueden llegar a suponer hasta un 65% del peso del compuesto.

El uso de estas cargas mejora tanto las propiedades físicas como la factibilidad de uso en entornos y procesos industriales (19) (20). Sin embargo, dificulta la recuperación y reciclaje de los materiales.

A partir de la Revolución Industrial del siglo XVIII apareció un modelo de consumo lineal, promovido por el crecimiento económico, y el incremento del poder adquisitivo de los trabajadores. Este modelo se basa en el empleo de los recursos naturales, su transformación y uso y, finalmente, su desecho en forma de residuo.

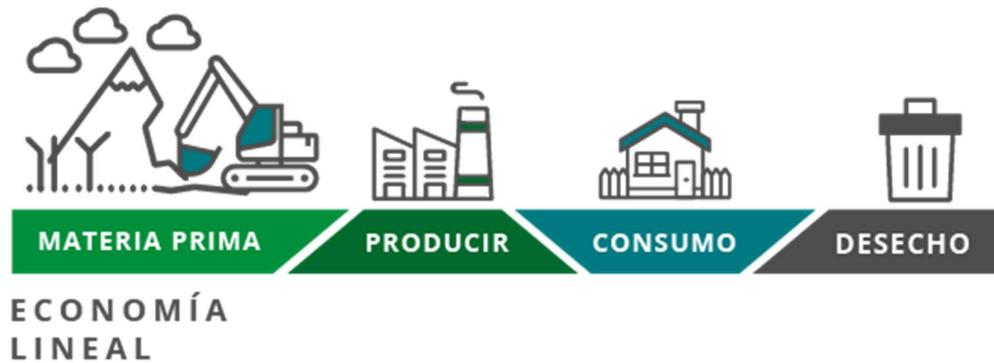


Figura 1 Modelo de Economía Lineal (21)

Este modelo, llevado al extremo por la sociedad actual, genera problemas de abastecimiento de recursos materiales y energéticos, así como medioambientales a la hora de gestionar los residuos generados, que se han convertido en grandes desafíos a nivel global.

En busca de un modelo que permita mantener el ritmo de crecimiento, surge el concepto conocido como “Economía Circular”. Este concepto pretende mantener el valor de los productos, materiales y recursos durante un mayor tiempo, reduciendo al máximo los residuos generados (22). El llamado “Desarrollo Sostenible” nace de la pretensión de conservar y fortalecer el desarrollo socio-económico sin comprometer los recursos naturales (23).



Figura 2 Modelo de Economía Circular (21)

El papel de la Comisión Europea es especialmente relevante en cuanto al fomento de la Economía Circular se refiere. En julio de 2014, fue publicada una Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, (24), en la que se vio reflejada la necesidad de establecer un programa de cero residuos para Europa, enmarcado en la filosofía de Economía Circular.

La Economía Circular relaciona los conceptos de economía y sostenibilidad con el fin de mantener el mayor tiempo posible el valor de productos, materiales y recursos y reducir así los residuos generados.

En Economía Circular se parte de la premisa de la eficiencia de los ciclos naturales del ecosistema. Los desechos son materia prima para otros procesos de forma que todo vuelve a la tierra. Esta filosofía extrapola este concepto al funcionamiento económico de la sociedad, de forma que no se generen desperdicios en los recursos naturales e industriales.

Desde la introducción del concepto de Diseño Ecológico de los productos o “Ecodiseño” a finales de los 80, toma importancia el enfoque medioambiental en la selección de materiales, procesos de fabricación (25) y uniones entre elementos (26) (27). La norma ISO 14001:2015 “Sistemas de Gestión Ambiental” (28) propone identificar y evaluar el impacto ambiental desde la perspectiva del Ciclo de Vida completo.

Esta misma norma define el Ciclo de Vida en su apartado 3.3.3 como las *“etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema de producto (o servicio), desde la adquisición de materia prima o su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final.”* Y recalca como nota que *“las etapas del ciclo de vida incluyen la adquisición de materias primas, el diseño, la producción, el transporte/entrega, el uso, el tratamiento al finalizar la vida útil y la disposición final.”*

En la directiva 2008/98/CE , (29) se fijaron los conceptos básicos relativos a la gestión de residuos. Esta directiva define los conceptos de reutilización, reciclado y valorización. Esta directiva fue actualizada por la directiva 2018/851 (30).

Debido a la elevada cantidad de desechos proveniente de aparatos electrodomésticos, aparatos de electrónica de consumo y dispositivos similares (31), la UE implementó directivas como la WEEE (Waste Electrical and Electronic Equipment o RAEE por sus siglas en español) (32) para promover el reciclaje, recuperación (33) y reutilización (34) de materiales.

En el artículo 4 de dicha directiva se establece una referencia directa a la preferencia de la reutilización, reparabilidad y reciclabilidad, sobre la disposición en vertedero de los residuos generados en el fin de vida de los productos. Ésta indica que: *“los Estados miembros fomentarán la cooperación entre productores y responsables del reciclado, y las medidas para favorecer la cooperación entre productores y responsables del reciclado, y las medidas para favorecer el diseño y la producción de aparatos eléctricos y electrónicos (AEE), especialmente con el fin de facilitar la reutilización, el desarmado y la valorización de RAEE, sus componentes y materiales. A tal efecto, los Estados miembros adoptarán las medidas adecuadas para que se apliquen los requisitos de diseño ecológico que facilitan la reutilización y el tratamiento de los RAEE establecidos en el marco de la Directiva 2009/125/CE” (Directiva de Ecodiseño)”*.

La directiva WEEE fue complementada posteriormente por la WEEE2 (35) que clasifica y diferencia entre productos y componentes teniendo en cuenta tanto componentes internos como embalaje.

El *Ecodiseño* o *“Diseño Ecológico”* se plantea con el objetivo de plantear una filosofía de diseño de producto que acompañe a este enfoque global de residuos cero. La directiva 2009/125/CE (36) genera un marco normativo que establece las directrices para un diseño orientado a la reutilización y reciclado.

Esta directiva tiene como objetivo una mayor eficiencia energética y ambiental en los productos que utilizan energía o que están relacionados con ella (Energy-using Products / Energy-related Product; EuP/ErP)

Esta tendencia continua, y el Plan de Acción hasta 2020 para la Economía Circular de la Unión Europea (37) establece una serie de puntos prioritarios que hacen referencia el Ecodiseño:

- En materia de producción, ha solicitado a las organizaciones europeas de normalización la elaboración de normas sobre la eficiencia de los materiales con vistas al establecimiento de futuros requisitos de diseño ecológico sobre la durabilidad, la reparabilidad y la reciclabilidad de los productos que se establecen dentro del marco de la Directiva sobre diseño ecológico.
- En cuanto al empleo de materias primas, la comisión desarrollará normas de calidad para materias primas secundarias, en particular sobre los plásticos. En enero de 2018 se adoptó una nueva estrategia europea sobre residuos plásticos (38), buscando que su reciclaje sea rentable

para las empresas, fomentando una menor generación de residuos plásticos y eliminando la basura marina.

Además, la Unión Europea intenta limitar a través de la legislación el uso de materiales peligrosos. La reducción de impacto en los productos pasa, en parte, por la limitación del uso de estos materiales de alto impacto ambiental. Con el objeto de registrar y limitar el uso de sustancias tóxicas o peligrosas para la salud o el medio ambiente surgen los Reglamentos Europeos REACH (39), RoHS (40) y ROHS2 (41).

Los reglamentos europeos, a diferencia de las Directivas no necesitan de trasposición en los países miembros para convertirse de forma inmediata en Ley. El Registro, Evaluación, Autorización y Restricción de Sustancias Químicas (REACH por sus siglas en inglés) trata de garantizar la salud humana y el medio ambiente mediante el control de los productos químicos.

El objetivo de este registro es el de disponer de un cierto control de las sustancias utilizadas con el fin de eliminarlas de forma progresiva, (42). Toda sustancia no registrada no puede comercializarse en la Unión Europea.

Por otro lado, RoHS2 fijan reglas para la restricción del uso de sustancias peligrosas en equipos eléctricos y electrónicos. Sustituye al reglamento anterior RoHS ampliando y fijando límites máximos de la concentración en peso de determinados elementos:

- Plomo (0,1%)
- Mercurio (0,1%)
- Cadmio (0,01%)
- Cromo Hexavalente (0,1%)
- Bifenilos Polibromados, PBB (0,1%)
- Polibromodifeniléter PDBE, (0,1%)

El Ecodiseño está directamente relacionado con la Economía Circular en lo relativo al estudio de la reutilización (43) y valorización de los desechos (44) y su efecto tanto en el medio ambiente (45) como en el impacto económico (46).

Aplicando la filosofía de Economía Circular pueden definirse nuevas etapas del ciclo de vida en “Bucle Cerrado” como: Renovación, Reutilización, Refabricación y Reciclado”. En el esquema de la figura pueden incluirse estas nuevas etapas al enfoque circular del Ciclo de Vida. En este punto cobran importancia las fases de Diseño y Fabricación de los componentes (47) ya que deberán estar enfocados a la reutilización, reparación (48), separación o reciclabilidad (49) de los componentes.



Figura 3 Etapas del Ciclo de Vida del producto: enfoque circular, (88)

En la industria del plástico se tratan de implementar acciones como prohibir la valorización energética de plásticos considerados como reciclables e implementar un mercado de materiales recuperados con el fin de reciclarlos. Estas acciones se plantean con el objetivo de reducir el impacto negativo que produce su uso y apostar por la economía circular (50). Sin embargo, la propia variabilidad en los tipos de materiales y aditivos utilizados en su fabricación dificulta este objetivo, como ya se ha comentado anteriormente.

El reciclado es, junto a la valorización energética y al vertedero, uno de los posibles fines de vida para un material plástico. La recolección y separación de los materiales se ha incrementado en los últimos años gracias al esfuerzo colectivo y a la conciencia social en todos los países de la Unión Europea, tal y como demuestran las figuras 4 y 5, en las que se muestra la evolución de la cantidad de plástico reciclado en España, y la distribución de los distintos fines de vida de los materiales plásticos en los países de la Unión Europea.



Figura 4 Evolución de reciclado total de plásticos en España (89)

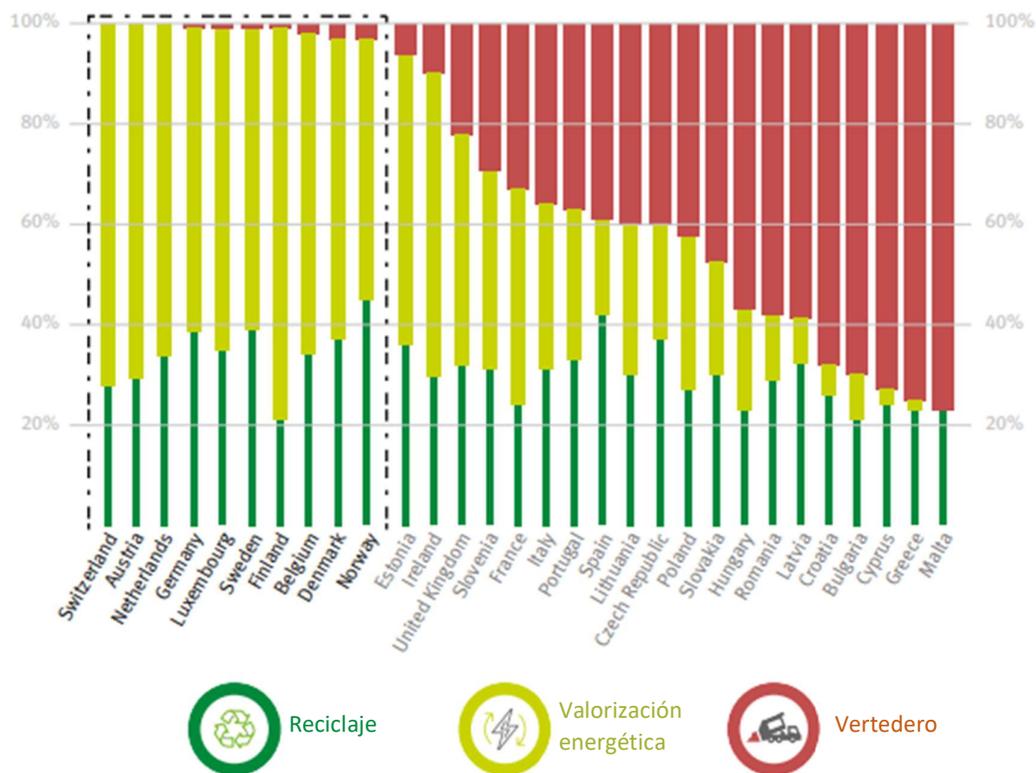


Figura 5 Porcentajes de fin de vida de materiales plásticos en países de la UE (1)

El aumento del porcentaje de reciclado de materiales se ha duplicado desde el año 2006 mientras que el depósito en vertedero de estos materiales se ha reducido en un 44% en el mismo periodo (1). Mientras tanto, la valorización energética es una alternativa muy utilizada en varios países de la unión europea para materiales post-consumo.

Al mismo tiempo, se han invertido esfuerzos en mejorar los procesos de separación de materiales para mejorar el porcentaje de recuperación y posterior reaprovechamiento de determinados materiales. Los envases son un claro ejemplo de uso de materiales específicos como el PET, lo que facilita la identificación de las materias primas y su reciclado (51), (52). En otras industrias, como la de los electrodomésticos, este proceso de clasificación, es mucho más complejo.



Figura 6 Evolución en índice del reciclado de envases de plástico en España (89)

Como se ha explicado anteriormente, los materiales plásticos dedicados al reciclaje pueden caracterizarse en dos grandes grupos según su proveniencia. Los materiales post-consumo serán aquellos que son depositados en contenedores específicos y posteriormente separados en plantas de tratamiento (53). Su uso en la industria del reciclado está habitualmente dedicado a productos con muy bajos o nulos requerimientos técnicos (54) (55) ya que es difícil asegurar una trazabilidad de los materiales (56) y, por tanto, que éstos sean puros y estén libres de elementos que contaminen el resultado.

Los materiales con origen post-industrial son los productos de desecho de fábricas o plantas productivas en los que, por su tratamiento y control en la cadena de suministro se puede asegurar su composición (57). Estos materiales son muy valiosos para la industria del reciclaje ya que aseguran un material libre de impurezas y con un elevado control previo, generando materiales reciclados con propiedades y características muy similares a los vírgenes (58).

El reciclado puede realizarse mediante dos tecnologías. Reciclaje mecánico o reciclaje químico.

- El reciclaje mecánico es un procedimiento de recuperación del material que se alimenta de los desechos recuperados, triturados y lavados y secados para posteriormente introducirlos en un extrusor hasta obtener granza reciclada. Esta granza puede ir acompañada de aditivos y cargas según determinen los requerimientos mecánicos a obtener.

Se trata de un proceso industrializado en la actualidad cuya mayor dificultad es la obtención de materiales adecuadamente identificados y trazados.

- El reciclaje químico descompone las moléculas de los polímeros para obtener nuevas materias primas. La principal ventaja es que no requiere de la separación y limpieza de los materiales a reciclar (59).

El principal problema del reciclaje químico es que a día de hoy no se considera todavía un proceso industrial que permita tratar grandes cantidades de desechos.

El aumento de las tasas de reciclaje, junto con la mejora de los procesos industriales, trata de acompañar la aparición de un amplio normativo y jurídico generados por la Unión Europea. Estas herramientas e incentivos son acordes con el modelo de Economía Circular:

- La política sobre residuos busca prevenir su generación, haciendo prevalecer las técnicas de reutilización y reciclado frente a la disposición en vertedero.
- El Diseño Ecológico en productos energéticos impone requisitos sobre durabilidad y técnicas que favorezcan la reparación y el reciclado.
- La política sobre sustancias y productos químicos limita o restringe la utilización de ciertas sustancias, promoviendo su eliminación.

- La política climática propone incentivos para favorecer el ahorro de energía y la reducción de emisiones de gases que provocan el efecto invernadero.

La Unión Europea publicó en 2018 la “*Estrategia Europea para el Plástico en una Economía Circular*” (60) en la que propone cuatro puntos principales de desarrollo de la industria de plásticos para permitir su adaptación a los nuevos modelos económicos propuestos:

- Mejorar la economía y la calidad del reciclaje de plásticos
- Dirigir la inversión y la innovación a la búsqueda de soluciones a los problemas propuestos por la economía circular.
- Reducción de los residuos plásticos.
- Aprovechar la acción global y los movimientos sociales.

---

# *Capítulo 3*

---

Análisis del Impacto Ambiental de  
Materiales Reciclados



## ANÁLISIS DEL IMPACTO AMBIENTAL DE MATERIALES RECICLADOS

Tras mostrar de forma breve el estado del arte, se continua esta memoria con el cálculo del impacto ambiental del proceso de reciclado, para posteriormente, mostrar los análisis desde el punto de vista reológico, dimensional y mecánico.

Este apartado analiza las distintas etapas del ciclo de vida del material, caracterizando los impactos en cada proceso: obtención, reciclado y fabricación del polipropileno reciclado, así como de su posterior uso como materia prima de nuevos productos. El resultado de la suma de los impactos ambientales de cada una de las diferentes fases y procesos dará como resultado el impacto global del material. Este análisis se ha publicado en la revista *"International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology"* con el título: *"Life Cycle Assessment of a Plastic Part Injected with Recycled Polypropylene. A Comparison with Alternative Virgin Materials"* (61).

Para su análisis, se han estructurado las diferentes fases de la vida del producto en los siguientes bloques:

- Obtención de los desechos post-industriales
- Producción de PP reciclado.
- Distribución.
- Fin de vida.
- Resultados

El análisis se ha realizado tomando como unidad funcional una pieza soporte de placas electrónicas de encimeras de inducción. Esta pieza, con unas medidas aproximadas de 530x470x30mm e inyectada en polipropileno virgen con 40% de talco, se utiliza para la sujeción de los componentes electrónicos de las encimeras de inducción del grupo BSH, así como para la gestión del cableado interno y el alojamiento de pequeños componentes o muelles que aseguran la funcionalidad del conjunto.

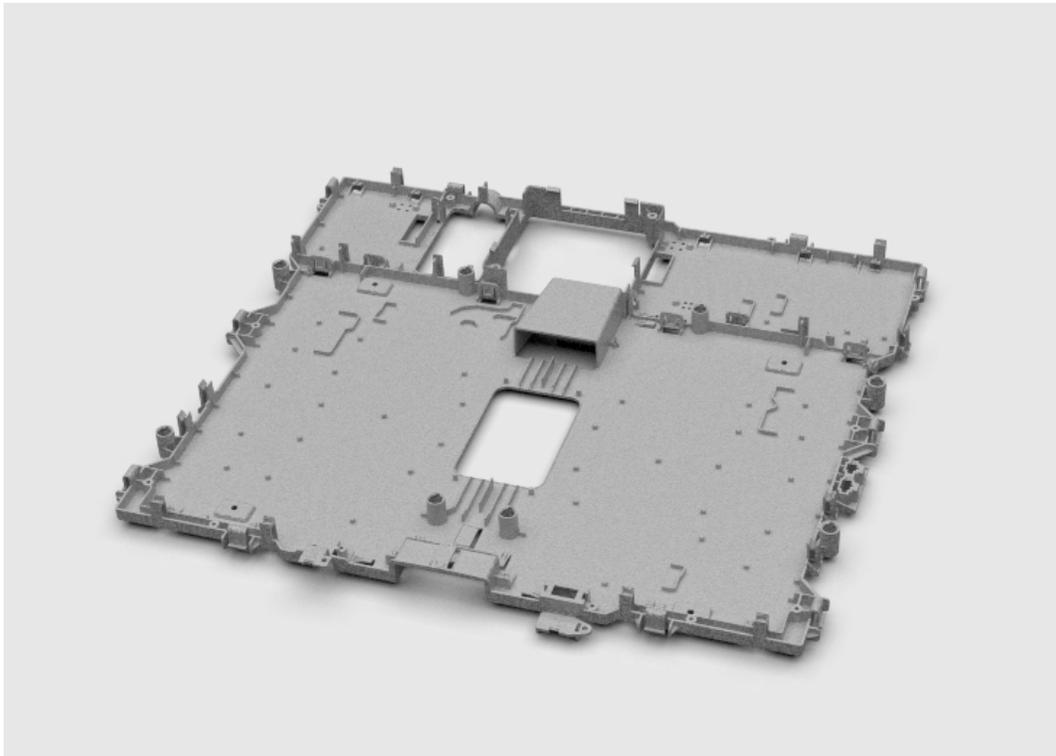


Figura 7 Soporte de electrónica utilizado para el análisis.

## Obtención de los desechos post-industriales

Pese a que la cultura de separación de los desechos es cada vez más amplia en la sociedad, como se ha explicado anteriormente, estos desechos post-consumo difícilmente son aptos para su recuperación y reutilización como fuente de materia primas de ámbito industrial.

Los desechos post-industriales permiten una mejor trazabilidad de su composición de forma que se evitan impurezas y contaminación por otros materiales. Esto permite que el material procesado (reciclado) y se asemeje en sus propiedades físicas al material virgen.



*Figura 8 Desechos post-industriales preparados para su procesado*

La principal fuente de esta materia prima es la industria transformadora. Los excedentes y no conformidades en sus productos o procesos mantienen la composición inicial. Debido a la dificultad de separar e identificar materiales ya aditivados, las principales fuentes de PP reciclable son la industria textil y de embalaje. Ambas fuentes utilizan material de alta pureza de forma que sus desechos son adecuados para otros usos.

Para el análisis del impacto ambiental se ha tenido en cuenta la media de los transportes realizados desde las fuentes de material a reciclar hasta la planta recicladora de RIALTI en Taino, localidad de la Lombardía en el norte de Italia, próxima a Varese (14). Estos valores son cambiantes y dependerán siempre del punto de partida de dichos materiales.

*Tabla 1 Transporte promedio del PP Post-industrial al reciclador. Asignación en Ecoinvent.*

Transporte	EcoInvent v3.5	Distancia [km]
Tren	Transport, freight train {GLO}  market group for   Alloc Def, U	288,7
Camión	Transport, freight, lorry, unspecified {GLO}  market for   Alloc Def, U	450,4
Barco	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}  market for   Alloc Def, U	524,8

Debido a la influencia de estos transportes, se ha considerado también un escenario pesimista en el que el 100% del desecho post-industrial proviene de ubicaciones textiles en Turquía, país en el que se sitúan los proveedores más lejanos de Rialti. Para este cálculo se consideró una combinación de transportes desde el este del país hasta el puerto de Estambul, su llegada al puerto de Génova y su traslado hasta la planta de transformación del PP reciclado.

Tabla 2 Transporte máximo del PP Post-industrial al reciclador. Asignación en Ecoinvent.

Transporte	Ecoinvent v3.5	Distancia [km]
Tren	Transport, freight train {GLO}   market group for   Alloc Def, U	290
Camión (Turquía)	Transport, freight, lorry, unspecified {GLO}   market for   Alloc Def, U	1828
Camión (Italia)		204
Barco	Transport, freight, sea, transoceanic ship {GLO}   market for   Alloc Def, U	2380

## Producción de PP reciclado

Tras la recepción de la materia prima, es necesario caracterizar las propiedades físicas de todos los lotes de forma que se puedan mezclar adecuadamente para obtener un resultado uniforme y conforme a las especificaciones técnicas del producto deseado.

El producto final, el polipropileno reciclado, es el resultante de la mezcla de tres fuentes (62):

- Material molido, triturado y almacenado en las instalaciones hasta su uso, y cuyo origen se ha explicado en el apartado anterior.
- Desechos de producciones y procesos internos que no cumplen con las especificaciones dadas, pero que se consideran reutilizables.
- Masterbatch, cargas, estabilizantes y otros componentes necesarios para obtener el producto especificado.

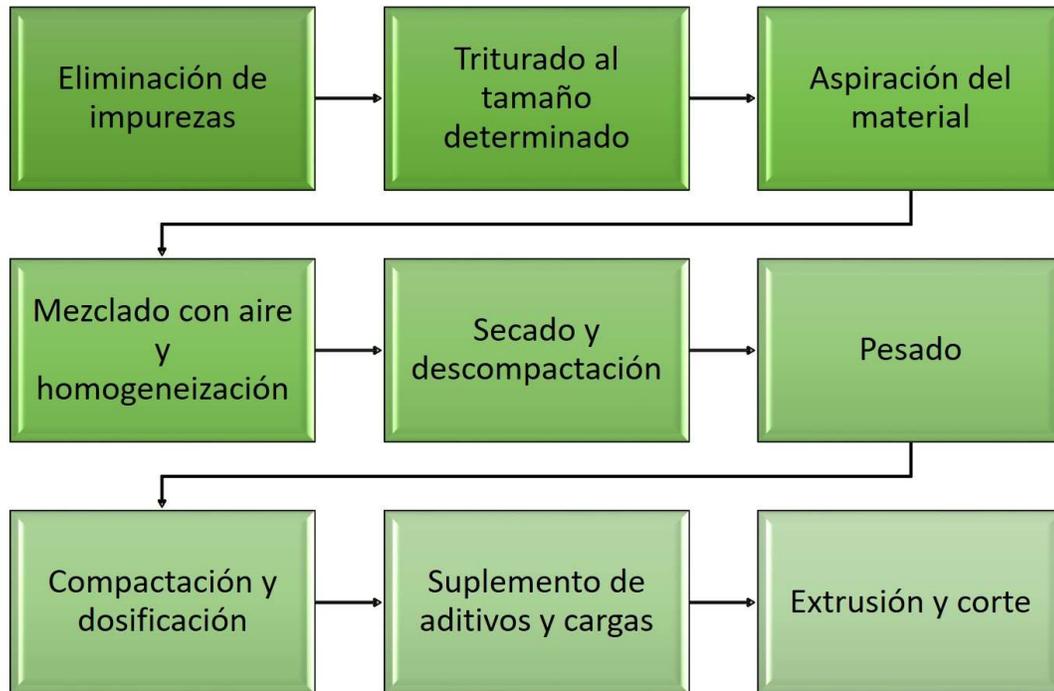


Figura 9 Proceso productivo de reciclaje de PP. (62)

La calidad y las propiedades del material resultante vendrán dadas por la pureza, propiedades y aditivos utilizados en la producción.

Tras el proceso de reciclado y fabricación, el resultante es un material con similares características mecánicas y físicas al material de partida, con aditivos y cargas para modificar las mismas en función de las necesidades de uso. En este caso se busca la sustitución del material virgen utilizado para la inyección de la pieza seleccionada para el estudio, polipropileno con 40% de talco. Estas propiedades pueden ser controladas para ofrecer una estabilidad similar a la de los materiales vírgenes siempre y cuando se asegure el control del proceso y los materiales de entrada al mismo.

La composición proporcionada por RIALTI para el material analizado E-RIALFILL H 07 40 T (polipropileno con 40% de talco) es la siguiente:

- 15% - PP postindustrial rechazado
- 40% - Residuos industriales de PP molido
- 40% - Talco
- 2% - Carbonatos
- 3% - MasterBatch: lubricantes, estabilizadores, desecantes...

Los consumos de materia prima y energía del PP reciclado se consideran nulos, ya que han sido obtenidos por medio del reaprovechamiento de materiales. Sus impactos asociados serán los derivados del transporte hasta el punto de reciclaje, tal y como se ha explicado en el apartado anterior. Tampoco se tiene en cuenta en el cálculo el impacto ambiental derivado de evitar el desecho en vertedero de estos residuos, lugar en el que hubieran acabado de no haber sido adquiridos para su reciclaje.

En cuanto al talco, se considera una mezcla de dos tipos: clorítico y dolomítico en una proporción al 50% de cada uno de ellos.

La composición utilizada en los cálculos se ha modelado en base a datos disponibles en la bibliografía sobre la composición de ambos materiales.

Tabla 3 Composición química del talco dolomítico. Asignación en Ecoinvent.

Compuesto	Porcentaje	Ecoinvent v3.5
SiO <sub>2</sub>	51%	Silica sand {GLO}  market for   Alloc Def, U
MgO	34%	Magnesium oxide {GLO}  market for   Alloc Def, U
CaO	15%	Calcium carbonate > 63 microns, production, at plant EU-27 S
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,2%	Pig iron {GLO}  market for   Alloc Def, U
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,051%	Aluminium oxide {GLO}  market for   Alloc Def, U
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,019%	Phosphate fertiliser, as P2O5 {GLO}  market for   Alloc Def, U

Tabla 4 Composición química del talco clorítico. Asignación en Ecoinvent.

Compuesto	Porcentaje	Ecoinvent v3.5
SiO <sub>2</sub>	56%	Silica sand {GLO}  market for   Alloc Def, U
MgO	31%	Magnesium oxide {GLO}  market for   Alloc Def, U
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,5%	Aluminium oxide {GLO}  market for   Alloc Def, U
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,9%	Pig iron {GLO}  market for   Alloc Def, U
CaO	0,9%	Calcium carbonate > 63 microns, production, at plant EU-27 S

Por razones de confidencialidad, cierta información no fue detallada por parte de la empresa, como es el tipo de carbonato empleado, así como la composición exacta del 3% de masterbatch, relacionado con otros compuestos utilizados como lubricantes, estabilizadores o desecantes. Por tanto, ha sido necesario realizar una serie de suposiciones basadas en bibliografía disponible:

- % Carbonato: el más común empleado en la industria es el carbonato cálcico.
- 3% MasterBatch: se consideran tres tipos de materiales auxiliares empleados.
  - Lubricantes: suele ser empleado carboxilato de calcio. En Ecoinvent no se dispone de dicho material caracterizado, por lo que se ha aproximado a carbonato cálcico.
  - Estabilizadores: En lo que refiere a estabilizadores, no se ha encontrado información sobre el tipo de material utilizado en industria.
  - Desecantes: corresponden a diferentes tipos de óxidos de calcio. De igual forma, no se dispone de este material caracterizado en Ecoinvent, por lo que se ha aproximado a carbonato cálcico.

Por ello, para este tipo de materiales auxiliares empleados para la producción del material reciclado se ha asignado el material de carbonato de calcio caracterizado en la base de datos de ELCD como “*Calcium carbonate > 63 microns, production, at plant EU-27 S*”.

También a partir de la información proporcionada por el reciclador se ha considerado el consumo energético asociado a cada uno de los pasos del proceso de producción de la granza de PP reciclado +40% de talco, los cuales son:

1. El PP post-industrial es cortado y triturado para homogeneizar el material de entrada para la fabricación del compuesto.
2. Según las necesidades de producción, el PP triturado puede ser almacenado antes de ser sometido al proceso de extrusión.
3. Durante el proceso de fabricación del compuesto, en primer lugar, se lleva a cabo la mezcla de las diferentes materias primas que formarán parte del compuesto final. En este caso, se mezcla el PP triturado, el talco, el carbonato y demás compuestos como estabilizadores, lubricantes o desecantes utilizados en la mezcla bajo las proporciones establecidas. Esta mezcla se introduce en la máquina extrusora, que calienta los materiales para dar lugar al compuesto final que es enfriado y cortado con el fin de obtener la granza del tamaño deseado.

4. Con el fin de dar lugar a lotes homogéneos, y debido a los diferentes orígenes del PP post-industrial, diferentes lotes de producción del material son mezclados y almacenados en silos.

El consumo energético total del proceso descrito fue proporcionado por la empresa recicladora para el análisis del impacto ambiental. Por motivos de confidencialidad no se muestra el valor exacto en este documento.

El consumo energético empleado para el proceso de producción se ha definido teniendo en cuenta el mix energético italiano presente en la base de datos de Ecoinvent. De la misma forma se tuvieron en cuenta los consumos auxiliares propios de la fábrica y no asociados directamente a la instalación productiva.

Tabla 5 Asignación de consumos auxiliares en Ecoinvent.

Material	Ecoinvent v3.5
Electricidad	Electricity, medium voltage {IT}  market for   Alloc Def, S
Diesel	Diesel {Europe without Switzerland}  market for   Alloc Def, U
Gas natural	Natural gas, low pressure {IT}  market for   Alloc Def, U
Agua	Water, deionised, from tap water, at user {GLO}  market for   Alloc Def, U
Lubricantes	Lubricating oil {GLO}  market for   Alloc Def, U
Embalaje	Packaging box factory {GLO}  market for   Alloc Def, U



Figura 10 Granza resultante del proceso de reciclado.

## Distribución

Una vez el material es fabricado y se ha homogeneizado en los silos, se procede al envío a la planta de transformación por inyección. En el caso analizado se trata de la fábrica del proveedor Inymon en La Puebla de Alfindén (Zaragoza). Se ha considerado un transporte en camión completo de >32Tm según la base de datos de Ecoinvent 3.5, con una distancia de 1272 Km para el material reciclado.

Para el material con el que se ha comparado el impacto ambiental, PP virgen, se consideran los mismos parámetros de transporte desde la planta productiva en el norte de Italia y hasta el mismo lugar de inyección: 1477 Km.

## Fin de vida

A la hora de realizar el análisis del fin de vida se plantean porcentajes de valorización energética y vertedero de acuerdo a la normativa TR 62635 de la Comisión Electrotécnica Internacional. Esta normativa establece los porcentajes teóricos con lo que pueden ser reciclados y valorizados los materiales.

El escenario de fin de vida difiere, en el caso de los plásticos, según su composición y uso. El caso más claro es el de los plásticos dedicados al embalaje, cuya identificación y separación es mucho más sencilla. En el caso del polipropileno con carga se considera difícilmente reciclable ya que requiere de una identificación y cuantificación de los aditivos presentes muy específica. Los valores de cálculo para el análisis realizado fueron de 95% para el depósito en vertedero y 5% para valorización energética.

Ante la dificultad del reciclado como escenario de fin de vida para los materiales frente a la valorización energética o a la deposición en vertedero cabe mencionar la necesidad de valorar este punto como un requerimiento desde la fase de diseño. Sin embargo, todavía existen limitaciones en cuanto a la tecnología del reciclaje para determinados componentes. Es por este motivo que impulsa la Economía Circular, que trata de aprovechar los recursos ya existentes en productos desechados o cuya vida ha llegado a su fin con el objeto de utilizarlos como origen para nuevos productos (63), (64), (65).

El efecto del fin de vida afecta en gran medida al impacto ambiental de un producto o materia prima. Si bien este impacto es difícilmente evitable, sí se puede tener en cuenta como factor a la hora de la selección de materiales, procesos o instalaciones productivas o de ensamblaje (66) (67). Esta selección dará pie a facilitar la separación y el tratamiento de los componentes tras la vida útil del producto.

Los escenarios de fin de vida analizados en el artículo *“Sustainable Supply Chain Management: The Influence of Disposal Scenarios on the Environmental Impact of a 2400 L Waste Container”* (68) evalúan el impacto en diferentes escenarios de reciclabilidad, reutilización o incluso bucle cerrado tras la vida útil de un producto.

Los escenarios se definen como:

- SC1: Vertedero
- SC2: Reciclado estándar
- SC3: Ciclo cerrado con reciclado de materiales termoplásticos
- SC4: Ciclo cerrado con reutilización parcial.

El SC4 se compara también utilizando transportes por carretera o por tren para evaluar el efecto de la logística en el impacto global.

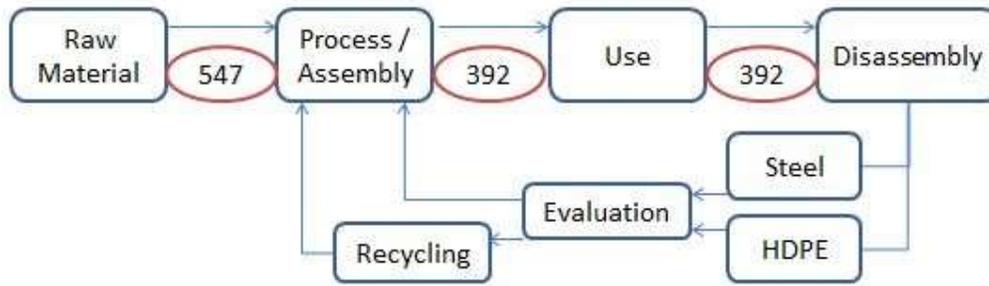


Figura 11 Diagrama de material y transportes del SC4 (bucle cerrado)

Tabla 6 Porcentajes de reciclado para termoplástico y metal según los escenarios de fin de vida definidos

	SC1		SC2		SC3		SC4	
	HDPE.	Metal	HDPE.	Metal	HDPE.	Metal	HDPE.	Metal
Reciclaje	0%	0%	26,30%	94%	100%	94%	95%	25%
Vertedero	100%	100%	38,10%	6%	0%	6%	0%	0%
Incineración	0%	0%	35,60%	0%	0%	0%	0%	0%
Reutilización	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	75%

El resultado muestra una reducción del impacto ambiental de hasta un 59% en ReCiPe y un 47% de huella de carbono para el escenario SC3 de reciclado en bucle cerrado con respecto al inicial de deposición completa en vertedero. El hecho de incluir la reutilización de componentes como se evalúa en el escenario SC4, reduce todavía más este impacto hasta un 66% en ReCiPe y 51% en huella de carbono.

También la selección de determinados factores o emplazamientos, así como un diseño adecuado y un medio de transporte determinado afectan claramente al impacto resultante (69) (70). Los transportes pueden ser optimizados de forma que se aproveche al máximo la capacidad de carga disponible en el medio seleccionado. De esta forma el impacto se diluye sobre una mayor cantidad de material (71).

En el caso del contenedor estudiado en el artículo (68) la influencia del método de transporte seleccionado en el escenario SC4, bien sea por carretera o por tren, modifica el impacto global asociado a la logística y transporte. La selección del tren por encima del transporte por carretera disminuye este impacto en un 52% según la metodología ReCiPe y en un 51% su huella de carbono.

Tabla 7 Resultados de impacto del SC4 según el método de transporte seleccionado

	Impacto del transporte en SC4 Camión	Impacto del transporte en SC4 Tren
ReCiPe (Pt)	6,546	3,138
kg CO <sub>2</sub> eq.	62,4	30,3

El diseño de los componentes puede adecuarse para limitar también este efecto. Al incrementar la apilabilidad de los componentes que han de ser transportados o al reducir el volumen del embalaje se ayuda a optimizar el volumen ocupado por el producto (72) (73).

## Resultados

Tras analizar el ciclo de vida completo de la pieza de PP, los resultados obtenidos de la evaluación del impacto ambiental de 1kg de material son los siguientes.

Tabla 8 Impacto de la obtención de 1kg de PP + 40% talco, ReCiPe.

<b>PP + 40 % Talco – Origen Virgen (EcolInvent)</b>	
	ReCiPe [mPt/kg]
<b>Total</b>	<b>48</b>
PP	38,56
Talco	9,44
<b>PP + 40% Talco – Origen Reciclado (RIALTI)</b>	
	ReCiPe [mPt/kg]
<b>Total</b>	<b>18,36</b>
Talco	9,44
Electricidad	5,44
Transporte	2,75
Otros	0,73

El impacto ambiental del PP con 40% de talco virgen es de 48 mPt/Kg, de los cuales 9,44 mPt/kg corresponden al impacto del talco. El material reciclado evaluado supone un impacto de 18,36 mPt/kg, por lo que la reducción es del 61,75%.

Según la metodología de huella de carbono (IPCC) los resultados son los siguientes:

Tabla 9 Impacto de la obtención de 1kg de PP + 40% talco, Huella de Carbono.

<b>PP + 40 % Talco – Origen Virgen (EcolInvent)</b>	
	Huella de Carbono [kg CO <sub>2</sub> eq./kg]
<b>Total</b>	<b>1,42</b>
PP	1,22
Talco	0,20
<b>PP + 40% Talco – Origen Reciclado (RIALTI)</b>	
	Huella de Carbono [kg CO <sub>2</sub> eq./kg]
<b>Total</b>	<b>0,430</b>
Talco	0,185
Electricidad	0,170
Transporte	0,065
Otros	0,010

El impacto del material virgen asciende a 1,42 kg CO<sub>2</sub> eq./kg, mientras que la huella de carbono del material reciclado es de 0,43 kg CO<sub>2</sub> eq./kg. La reducción obtenida es del 69,72%.

Para el caso práctico analizado de una pieza inyectada presente en encimeras de inducción, los impactos resultantes en mPt. por componente aparecen en la siguiente tabla:

Tabla 10 Impactos por proceso para un componente, ReCiPe.

	PP virgen	PP reciclado
	ReCiPe [mPt]	
Obtención del material	29,15	11,29
Transportes.	2,61	2,29
Proceso de inyección	6,83	7,04
Distribución a cliente final	9,23	9,36
Fin de Vida	11,48	11,65
<b>Total</b>	<b>59,3</b>	<b>41,63</b>

La pieza analizada tiene un impacto de 41,63 mPt, mientras que el impacto de la misma pieza fabricada en material virgen es de 59,3 mPt. La reducción es, por tanto, de casi el 30%

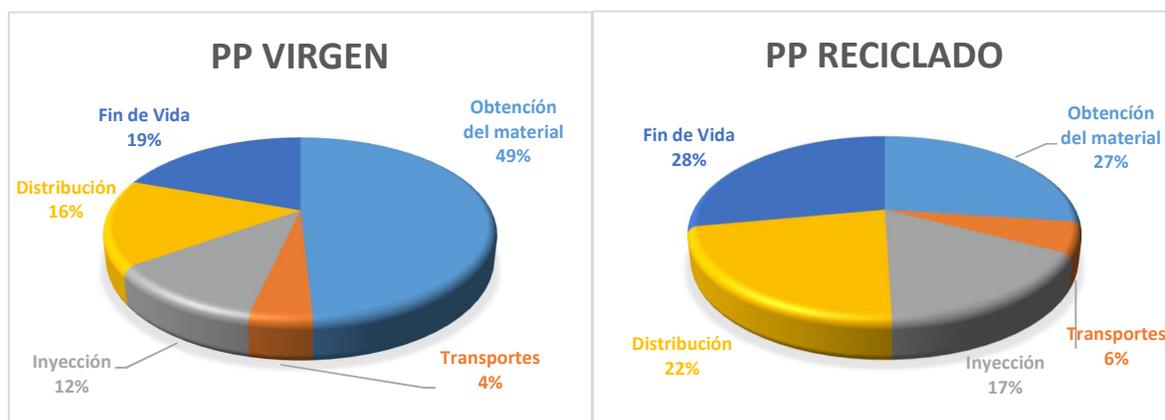


Figura 12 Impacto porcentual de los procesos en material reciclado y virgen, ReCiPe

Si se analiza el ciclo de vida del material, los impactos más reseñables provienen de la producción de la materia prima, que supone un 27% para el material reciclado y hasta un 49% para el material virgen.

La relevancia de la suma de los transportes es notable para el impacto global del componente analizado. Si bien el valor es similar y difiere entre ambos materiales por las diferencias de peso de la pieza al tener los materiales diferente densidad, en cuanto a porcentaje supone un 20% en el material virgen y un 28% en el reciclado. Esto pone de nuevo el foco sobre la importancia de la selección de las fuentes de materia prima, así como la ubicación de las ubicaciones del proceso y los métodos de transporte.

La aportación del proceso de inyección al impacto global es menor que otras fases del ciclo analizado, sin embargo, refleja claramente la importancia, por un lado, de la selección del material. Materiales con mayor resistencia a la temperatura requerirán de un mayor aporte energético para su procesado y, por tanto, aportarán un mayor impacto a la suma final.

La misma comparación realizada para su huella de carbono reduce el impacto del componente en un 42,8%:

Tabla 11 Impactos por proceso para un componente, Huella de Carbono.

	PP virgen	PP reciclado
	ReCiPe [mPt]	
Obtención del material	0,868	0,250
Transportes.	0,078	0,068
Proceso de inyección	0,131	0,135
Distribución a cliente final	0,240	0,243
Fin de Vida	0,128	0,130
<b>Total</b>	<b>1,444</b>	<b>0,827</b>

De nuevo la fabricación del material se mantiene como el proceso más relevante en términos absolutos, suponiendo el 60% de la huella de carbono producida por el material virgen.

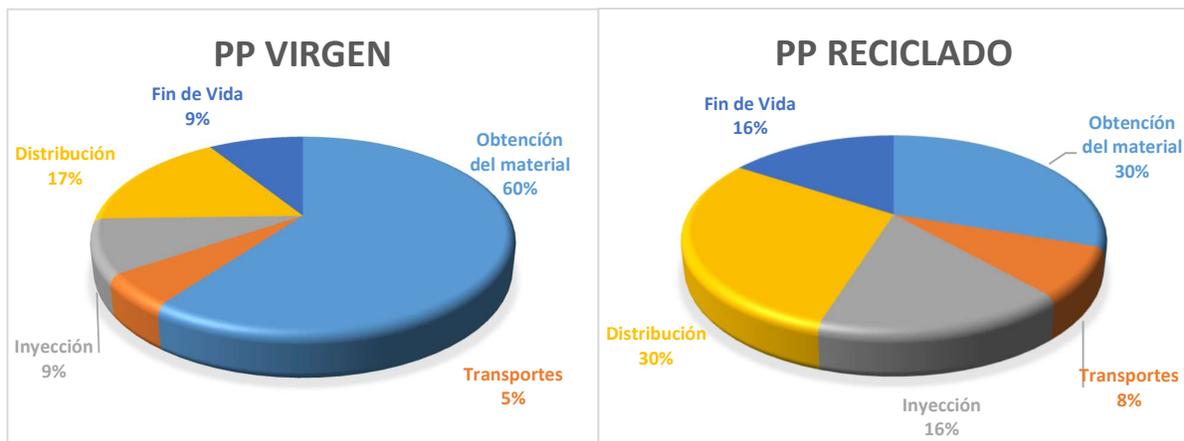


Figura 13 Impacto porcentual de los procesos en material reciclado y virgen, Huella de Carbono

El peso en el impacto de las fases de transporte aumenta notablemente, ya que los impactos generados por los procesos de transporte se ven más directamente reflejados en la huella de carbono del producto. Las emisiones derivadas de los procesos de transporte suponen un 38% del total del impacto en una pieza inyectada en material reciclado. En material virgen, debido a que el impacto general es mayor, el peso de estos procesos cae hasta un 22%.

Para el escenario mencionado previamente y definido en la tabla 2, en el que se consideraba un peor caso de la obtención de la materia prima, el recálculo de los impactos globales arroja un resultado de 45,57 mPt por pieza, frente a los 41,63 mPt del escenario promedio. Este escenario aumenta el valor de impacto ReCiPe en un 9,5%

Siguiendo la metodología de cálculo de la huella de carbono para este escenario propuesto, el impacto por componente se modifica desde los 0,827 Kg CO<sub>2</sub> eq. del escenario promedio hasta los 0,919 Kg CO<sub>2</sub>eq en el peor escenario contemplado. Esto supone un incremento del 11,2%.

En resumen, se ha realizado la evaluación del impacto ambiental del proceso de reciclaje de una de las familias de termoplástico reciclado. La comparación con el impacto ambiental del mismo material de origen virgen muestra una reducción del impacto ambiental del 55% en la obtención de 1kg de material ReCiPe y un 70% de la huella de carbono generada. Incluso en el peor caso estudiado en función de la obtención del material reciclado el impacto ambiental es inferior al valor inicial. Una vez valorado el impacto ambiental es necesario evaluar las características reológicas, dimensionales y mecánicas del material resultante en comparación con el virgen para evaluar la viabilidad de la sustitución y las tareas de rediseño necesarias en el caso de que exista una importante pérdida en las mismas.

---

# *Capítulo 4*

---

*Comportamiento en Inyección  
del Material Reciclado*



## COMPORTAMIENTO EN INYECCIÓN DEL MATERIAL RECICLADO

En este capítulo se analiza el comportamiento físico (reológico) del material reciclado y su viabilidad técnica como sustituto de materiales vírgenes. La caracterización de las propiedades y el comportamiento se ha realizado en base a mediciones en reómetro, y a piezas inyectadas en condiciones reales de producción. La pieza seleccionada es un soporte de componentes electrónicos utilizado en encimeras de inducción. Además de alojar las placas electrónicas, se encarga de la gestión del cableado y de guía para la colocación de otras piezas con función de muelle para asegurar el correcto funcionamiento del conjunto. La pieza, inyectada inicialmente en polipropileno virgen, pesa aproximadamente 620 gramos.

Los análisis realizados se han presentado en el 30 Congreso Europeo de Modelado y Simulación *"30TH EUROPEAN MODELING & SIMULATION SYMPOSIUM"* el análisis de la simulación del proceso de inyección tras analizar las propiedades físicas de materiales reciclados y vírgenes (74).

## PROCESSABILITY ANALYSIS OF AN INJECTED PART IN VIRGIN OR RECYCLED POLYPROPYLENE

José Galve<sup>(a)</sup>, Daniel Elduque<sup>(b)</sup>, Carmelo Pina<sup>(c)</sup>, Isabel Claveria<sup>(d)</sup>, Carlos Javierre<sup>(e)</sup>

<sup>(a),(c)</sup>BSH Electrodomésticos España, S.A. Avda. de la Industria, 49, Zaragoza (Spain)

<sup>(b),(d),(e)</sup>i+aitip, University of Zaragoza, C/ María de Luna 3, Zaragoza (Spain)

<sup>(a)</sup>[jose.galve@bshg.com](mailto:jose.galve@bshg.com), <sup>(b)</sup>[delduque@unizar.es](mailto:delduque@unizar.es), <sup>(c)</sup>[carmelo.pina@bshg.com](mailto:carmelo.pina@bshg.com),

<sup>(d)</sup>[iclaver@unizar.es](mailto:iclaver@unizar.es), <sup>(e)</sup>[carlos.javierre@unizar.es](mailto:carlos.javierre@unizar.es)

### ABSTRACT

Nowadays in the industry, exists the trend to use more ecologic materials to decrease the environmental impact of their products. One way to produce components with lower environmental impact is using recycled materials obtained from post-industrial wastes. In this article, the processability of an injected moulded part of an induction hob is going to be studied for both virgin and recycled polypropylene. One of the limitations of injection is that each material requires a mold specifically designed for the properties of the selected plastic material such as viscosity or melting point. Changing the mold can be very expensive. To cope with this problem, it is possible to simulate the injection of both materials in the same mold to observe the differences between the injection of these two materials and improve the operation conditions to get a component that can replace the original.

Keywords: injection molding, Cadmould, recycled plastic, simulation

### 1. INTRODUCTION

Plastic injection molding is one of the most used processes in industry, and used to obtain different parts in diverse fields like automotive or home appliances. In this process raw material is forced into the cavity of a mold to obtain the defined shape (Kamal, Isayev and Liu 2009; Javierre, Fernández, Claveria, and Elduque 2014; Elduque, Javierre, Elduque, and Fernández 2015). This mold is usually designed to produce a part with a specific material because each plastic has its peculiarities like density or viscosity and therefore it has optimized process conditions such as temperature, filling time and compaction pressure.

Nowadays, the use of plastics is increasing every year. This can be due to the increase in production and consumption after the economic crisis (Elduque, Elduque, Javierre, Fernández, and Santolaria 2015).

As the consumption has grown, the price of the plastics has increased during these years. At that point, plastic manufacturers investigated for new ways to reduce costs. A remarkable option is using recycled materials. Big plastic parts producers have also lots of plastics cuts

and defective parts that can be recycled. In addition, if the industries do not recycle these wastes, there is a lot of plastic that will be sent to landfilling or incineration. Besides the costs lose on reworking, scrap and processing, not paying attention to these industrial cuts leads to another problem not only economic but also environmental. Incineration and specially the landfilling have a great impact to the environment. One way to analyze the effect of these different end of life is Life Cycle Assessment methodology (Martínez, Blanco, Jiménez, Saenz-Diez, and Sanz 2015; Fraile-García, Ferreiro-Cabello, Martínez-Camara, and Jiménez-Macias 2016).

There are different end of life treatments for plastics and each one of them has a different impact on the environment. Due to the high environmental impact of incinerating and landfilling plastics (Hottle, Bilec, and Landis 2017; Galve, Elduque, Pina, and Javierre 2016; Camañas, Elduque, Javierre, and Fernández 2014), the European Union has developed specific legislation devoted to stimulate the use of recycled plastic.

The possibility of changing the injection material to a recycled one can be of interest for industrial companies. Nowadays, one of the causes to use recycled plastic is to reduce the environmental impact, as previous researches have established that using recycled plastics instead virgin reduce the environmental impact of a product. (Simões, Costa Pinto, and Bernardo 2013; Rajendran, Scelsi, Hodzic, Soutis, and Al-Maadeed 2012; Noda, Komatsu, Sumi, and Kasakura 2001; Gu, Guo, Zhang, Summers, and Hall 2017).

Changing the injection material for another type of plastic already in production results in different obstacles. As the mold and the operation conditions are designed for a specific material, changing the material can cause different problems like insufficient filling, air entrapment due to non-existence of air vents or excessive deformation caused by using non adequate operation conditions. This is caused by the different properties of the plastics.

There are several types of recycling techniques like the chemical or the mechanical (Hamad, Kaseem, and Deri 2013). The chemical one uses many organic solvents which can be dangerous to the environment (Achilias,

El análisis se ha desglosado en los siguientes puntos:

- Análisis de la inyección del material reciclado.
- Propiedades dimensionales del material reciclado
- Propiedades mecánicas del material reciclado

## Análisis de la inyección del material reciclado

Para el estudio comparativo del comportamiento durante el procesado del material reciclado frente a sus alternativas vírgenes, se tomó como base para el mismo componente de encimeras de inducción mencionado anteriormente.

Se inicia el análisis con la toma de muestras de los distintos materiales. Ambas materias primas se analizan en un reómetro capilar (Figura 12) para así obtener valores reales de viscosidad bajo las mismas condiciones.



Figura 14 Reómetro capilar Instron Ceast sr20

Los resultados obtenidos de ambos materiales muestran propiedades de viscosidad similares. Si bien no son exactamente iguales, sí se pueden considerar similares (Figura 15).

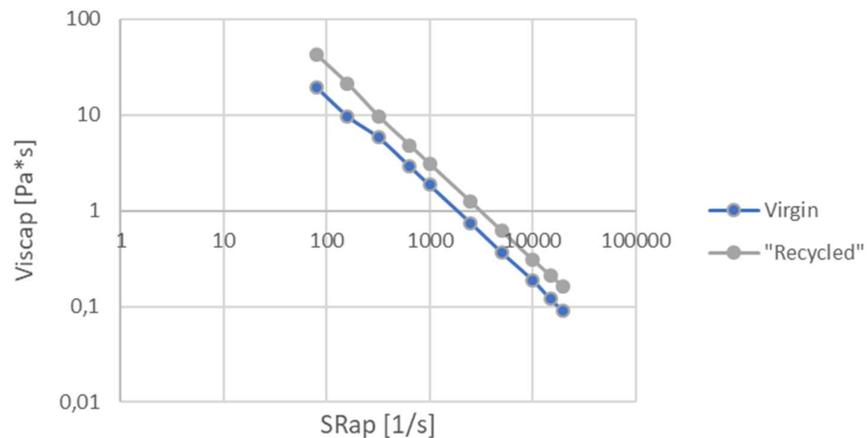
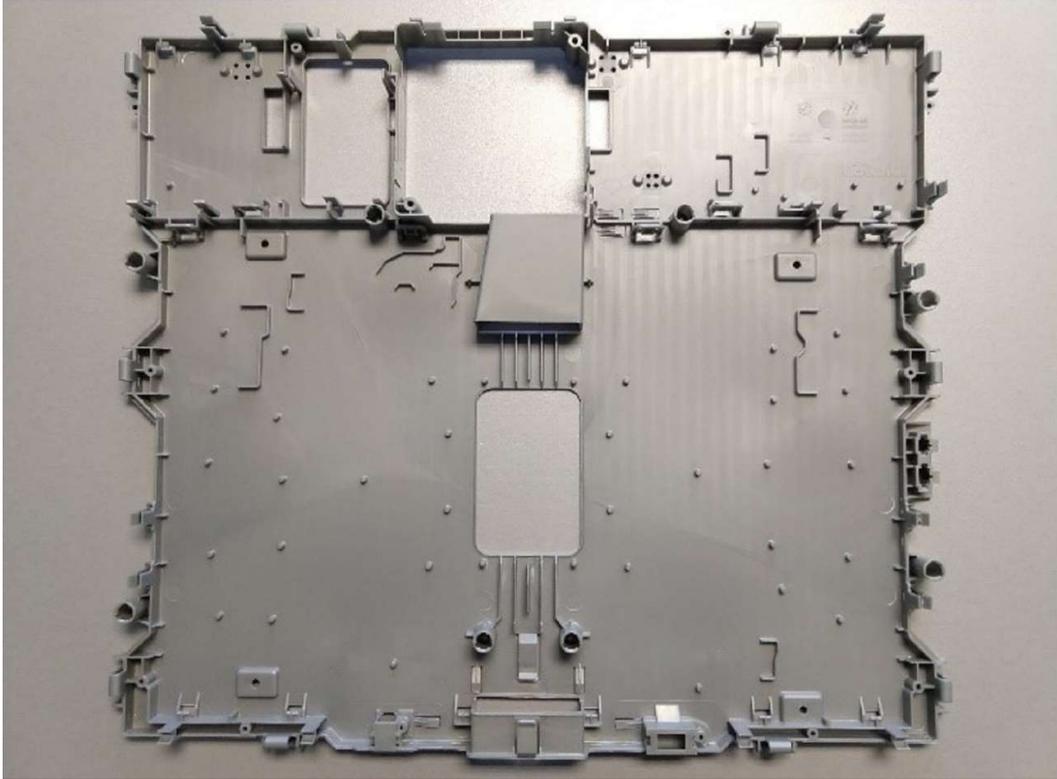


Figura 15 Resultados del análisis de viscosidad de material vírgen y reciclado

El método de reciclaje mecánico utilizado provoca modificaciones en las propiedades del polímero ya que, al cortarlo y procesarlo, se alteran la estructura de las cadenas moleculares que lo forman, que pueden justificar esa pequeña desviación.

Los resultados de los análisis de las propiedades físicas de los materiales se utilizan para alimentar una simulación. Mediante la simulación se busca determinar si la pieza en material reciclado se podrá inyectar, y si será capaz, desde el punto de vista teórico, de cumplir con los requerimientos dimensionales exigidos al componente (Figura 16).



*Figura 16 Soporte plástico de encimeras de inducción utilizado como base para el análisis.*

Se realiza un análisis comparativo del comportamiento de material virgen y reciclado mediante simulación con el software Cadmould 3D-F, que permite analizar la fase de llenado de un proceso de molde por inyección, así como la compactación y refrigeración.

Se introduce la geometría del componente, seleccionando los siete puntos de inyección utilizados en el molde existente. Se aportan también los canales de refrigeración para asegurar que la simulación refleje lo más fielmente posible el proceso real de inyección en el molde (Figura 17).



Figura 17 Definición de los puntos de inyección y refrigeración del molde

En la imagen se muestran los canales de refrigeración superior e inferior, ambos con circuitos de 10mm de diámetro. La entrada y salida de material de evacuación del calor, agua, se realiza de forma independiente en ambos circuitos. Ambos sistemas se alimentan con un flujo de 10 l/min a una temperatura de 15°C.

El proceso de inyección definido y utilizado por el actual proveedor del componente se descompone en 2,5 segundos de inyección, una compactación de 12 segundos a 40 MPa, con una temperatura de material de 250°C. El tiempo de refrigeración es de 25 segundos.

## Resultados de la simulación de inyección de material virgen

El resultado de la simulación del material virgen muestra un tiempo de llenado ajustado a 2,75 segundos.

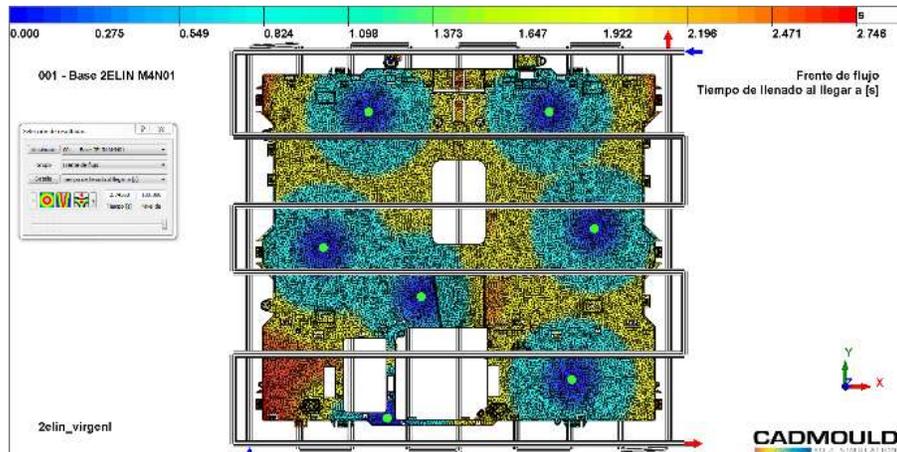


Figura 18 Distribución de llenado, material virgen

Tras alcanzar el 99% de llenado el proceso conmuta y procede a controlar la presión en lugar de la velocidad de inyección. La fase de compactación se realiza a 40 MPa para completar el llenado de la pieza.

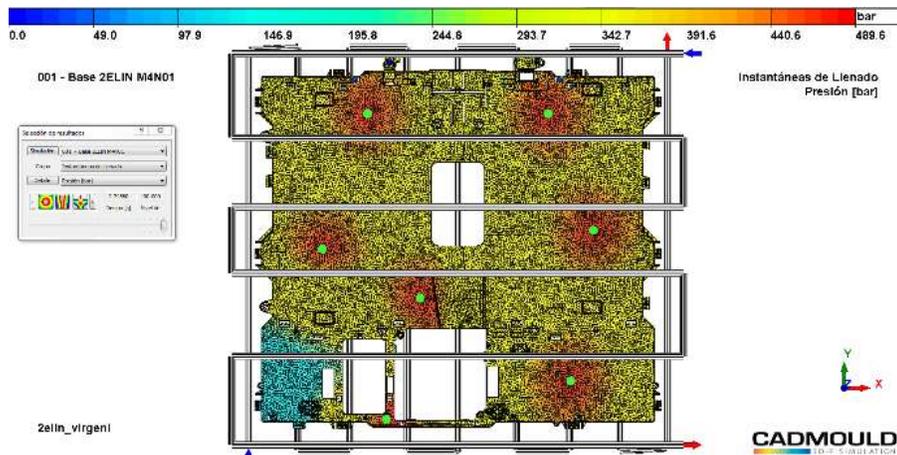


Figura 19 Presión de conmutación V/P, material virgen

Puede verse una falta de llenado en la fase inicial en la zona inferior izquierda de la pieza (Figura 19), que se completará en la fase de compactación.

Si el material no estuviera suficientemente caliente, podría solidificarse antes de completar el llenado. Sin embargo, en este caso puede comprobarse que la temperatura es suficientemente alta para completar el proceso.

El resultado de la simulación muestra una distribución de temperaturas adecuadamente distribuida por todo el material. Un enfriamiento equitativo en todas las partes de la pieza disminuye las tensiones internas del material y reduce la aparición de alabeos y deformaciones en la pieza final.

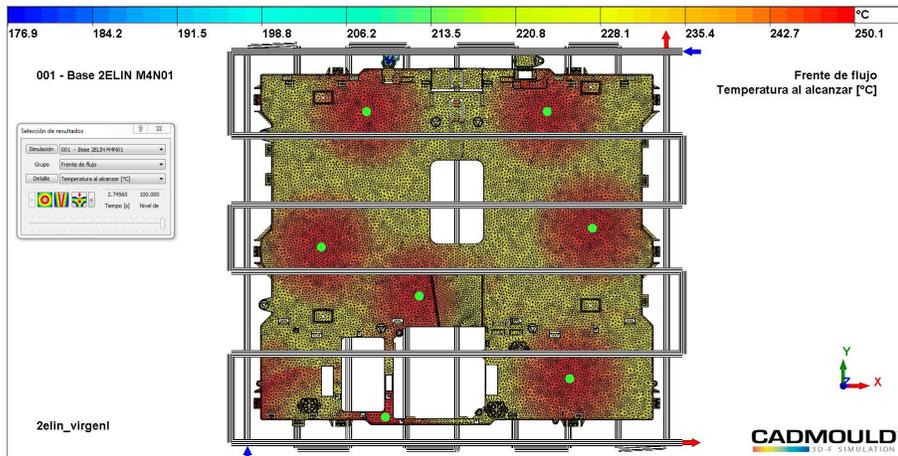


Figura 20 Distribución de temperatura, material virgen.

La presión de inyección del proceso es también fuente de tensiones y deformaciones internas en el caso de ser extremadamente alta. En este caso alcanza un valor de 489,6 bar.

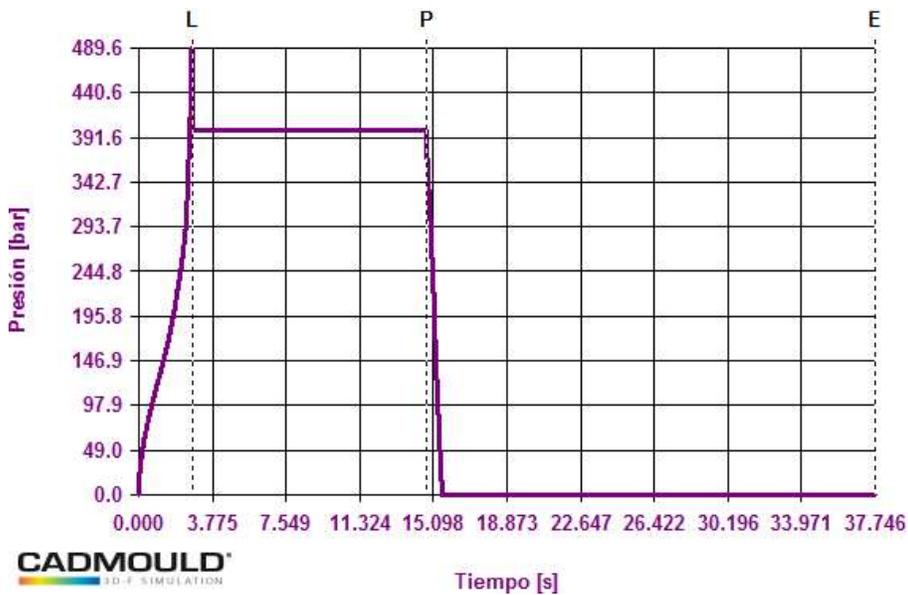


Figura 21 Presión en el punto de inyección, material virgen.

Además de la presión de inyección, es importante conocer el valor de fuerza de cierre, que permite dimensionar adecuadamente la máquina más apropiada para el proceso. Una fuerza de cierre deficiente es fuente de defectos como rebabas, mientras que un exceso puede dañar la pieza.

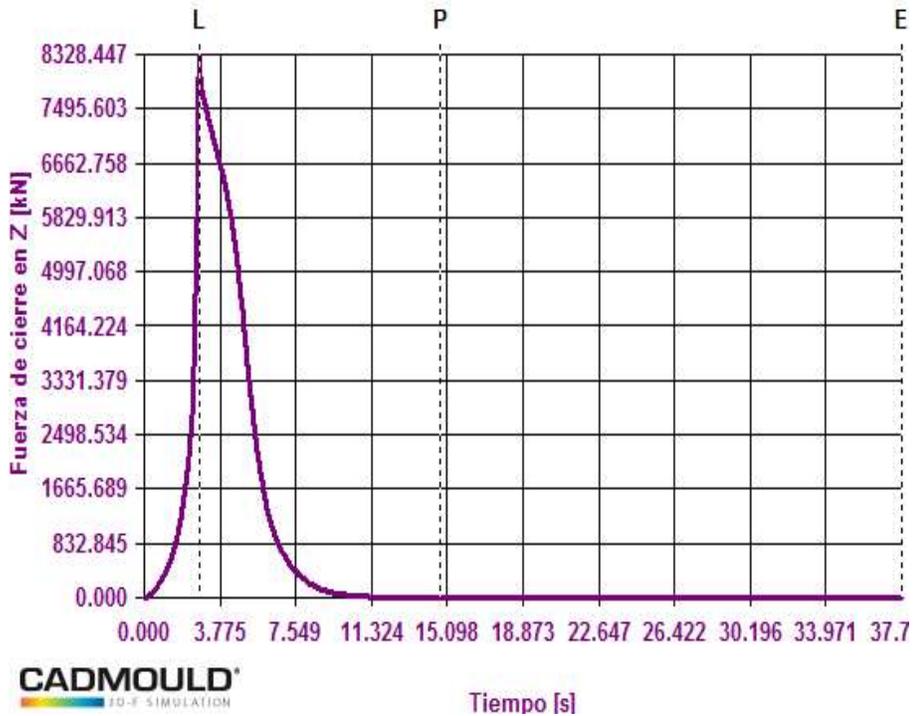


Figura 22 Fuerza de cierre, material virgen.

En este caso el valor de fuerza de cierre que muestra la simulación es de 8328 KN.

Tras analizar la inyección con el material virgen, se procede a su cálculo con el material reciclado.

### Resultados de la simulación de inyección de material reciclado

El análisis previo del material reciclado mostraba una mayor viscosidad con respecto al material virgen. Esto provoca, a priori, un avance del flujo de material más lento y un enfriamiento más rápido llevando, por tanto, a la solidificación de la masa inyectada.

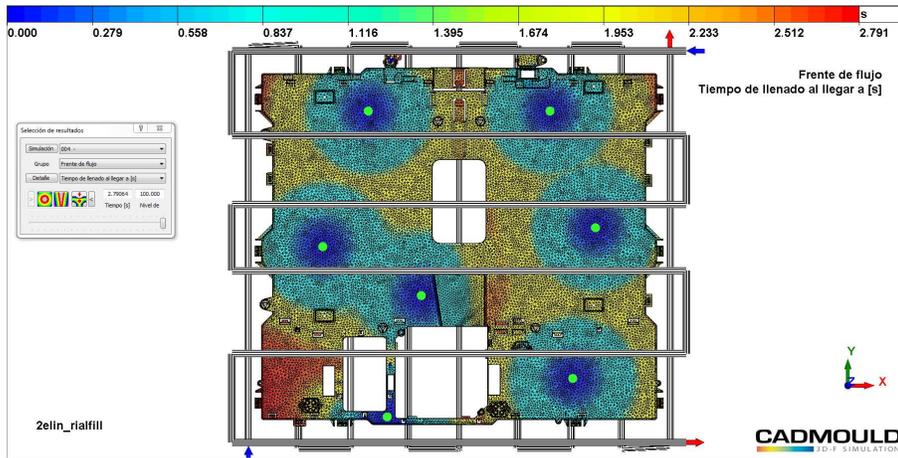


Figura 23 Distribución de llenado, material reciclado.

El resultado de la simulación mostrado en la figura 23 detecta un aumento del tiempo de inyección a 2,79segundos. El aumento, mínimo con respecto al material virgen, se debe a una viscosidad superior del material reciclado respecto al virgen.

La pérdida de presión durante la inyección tampoco se ve afectada (Figura 24), manteniendo la presión de compactación en el mismo rango que el material virgen. 498,3 bar frente a los 489,6 bar del proceso previo.

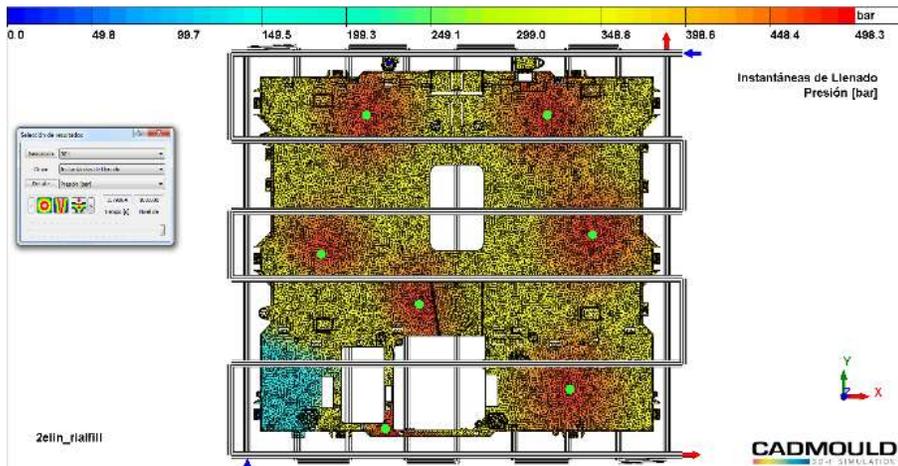


Figura 24 Presión de conmutación V/P, material reciclado.

La temperatura de la masa durante el proceso es suficientemente alta para llenar por completo la cavidad. Esto permite completar la geometría sin que el material solidifique en ningún punto ni genere problemas asociados a este fenómeno. La temperatura máxima alcanzada en este proceso es de 250,1°C (Figura 25).

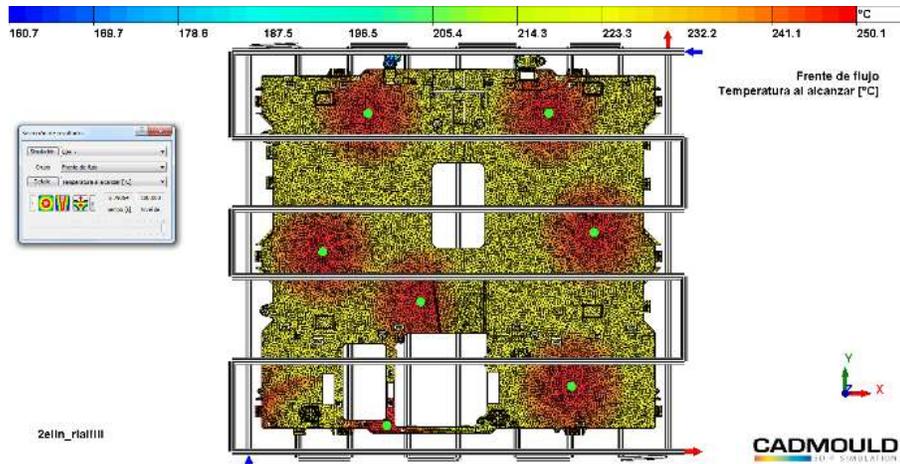


Figura 25 Distribución de temperatura, material reciclado.

La presión de inyección es ligeramente superior, como era previsible al aumentar la viscosidad del material. Durante la inyección se alcanza los 498,3 bares de presión (Figura 26) mientras que la presión de compactación asciende hasta 398,6 bar.

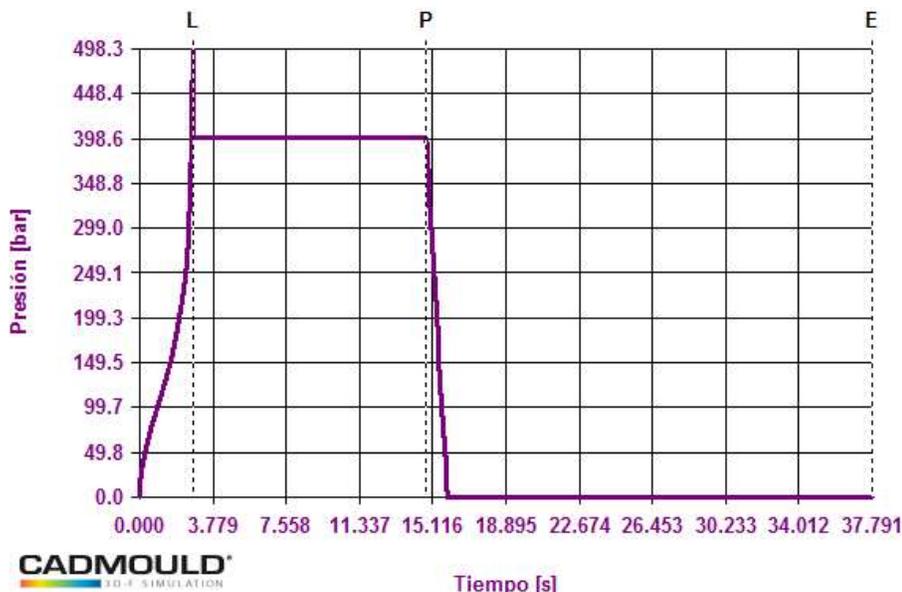


Figura 26 Presión en el punto de inyección, material reciclado

En este caso, la presión no asciende de forma notable, por lo que no es previsible la aparición de ningún defecto asociado al cambio de material. Tampoco en todo el ciclo de inyección (Figura 27) la fuerza de cierre experimenta un cambio significativo al aumentar a 8858 KN con material virgen, frente a los 8328 KN necesarios con material virgen.

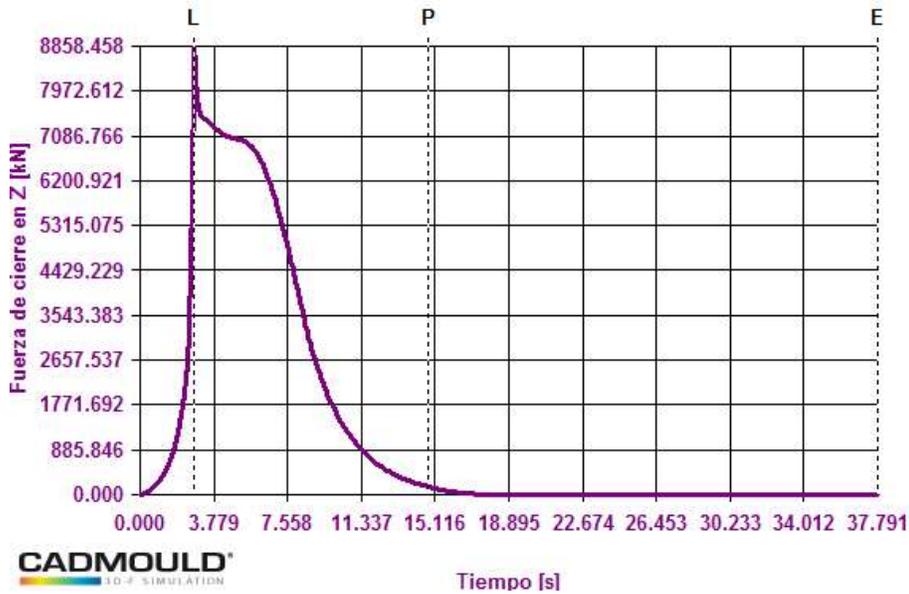


Figura 27 Fuerza de cierre, material reciclado

La simulación demuestra que, pese a producirse a partir de materiales con una segunda vida, un material de similares características ofrece un comportamiento similar durante la inyección. Además, el análisis reológico de ambos materiales demuestra que pese a tener una viscosidad ligeramente mayor al material virgen, el material reciclado es comparable al material original.

Si bien el origen de las fuentes de suministro puede suponer una mayor variabilidad en las propiedades iniciales, los aditivos son capaces de modificarlas para mantener una estabilidad que permita su uso en continuo. Según los análisis y cálculos de simulación realizados, el proceso de inyección será comparable, y viable también con el material reciclado.



---

# *Capítulo 5*

---

*Comportamiento Dimensional  
del Material Reciclado*



## COMPORTAMIENTO DIMENSIONAL DEL MATERIAL RECICLADO

Durante el proceso de moldeo por inyección, los componentes fabricados con materiales poliméricos, especialmente aquellas inyectadas con polímeros semicristalinos como el PP, sufren fenómenos de contracción y alabeo importantes. Estos fenómenos se producen debido a los cambios de presión y temperatura alcanzados durante el ciclo de inyección (75).

Las dimensiones finales de los componentes se ven, por tanto, afectadas por factores como la contracción del material seleccionado, la orientación del material debido al llenado, las condiciones de compactación y el proceso de enfriamiento (76) (77). Estos efectos son importantes ya que afectan directamente al comportamiento y la funcionalidad de la pieza, por ello diferentes autores han tenido estos efectos en cuenta durante la modificación de los materiales utilizados para la inyección. Khanjanzadeh *et al.* analizó la estabilidad dimensional al reemplazar polipropileno virgen con polipropileno reciclado en la fabricación de composites de madera-plástico (78); De Carvalho *et al.* habló sobre la influencia de los materiales utilizados en el molde en la estabilidad dimensional de los componentes fabricados (79); y Norihisa *et al.* analizó la estabilidad dimensional de diferentes composites de polipropileno y madera (80). Otros autores han intentado aumentar la estabilidad dimensional mediante procesos de adición de gas a la inyección (81) (82).

El análisis dimensional realizado en esta tesis se aplica sobre la misma pieza cuyas propiedades de inyección se simularon en el capítulo anterior (Figura 16). Esta pieza tiene unas dimensiones máximas nominales de 472,6x534mm, con un espesor de 1,8mm. El citado componente se inyecta para los ensayos en ambos polipropilenos con 40% de talco: un polipropileno virgen (HOSTACOM HBC 309 NAT) y un polipropileno reciclado (E-RIALFILL H 7 40T).

Tras validar la viabilidad técnica del proceso de inyección mediante simulación se ha analizado el comportamiento dimensional de piezas inyectadas en material virgen y reciclado. Dicho estudio se ha publicado en el artículo "*Dimensional Stability and Process Capability of an Industrial Component Injected with Recycled Polypropylene*" (83) donde se compara el comportamiento dimensional bajo condiciones de temperatura en una misma pieza inyectada en ambos componentes.

Article

## Dimensional Stability and Process Capability of an Industrial Component Injected with Recycled Polypropylene

José Eduardo Galve <sup>1</sup>, Daniel Elduque <sup>2</sup>, Carmelo Pina <sup>1</sup>, Isabel Clavería <sup>2,\*</sup>, Raquel Acero <sup>3</sup>, Ángel Fernández <sup>2</sup> and Carlos Javierre <sup>2</sup>

<sup>1</sup> BSH Electrodomésticos España, S.A., Avda. de la Industria, 49, 50016 Zaragoza, Spain; jose.galve@bshg.com (J.E.G.); carmelo.pina@bshg.com (C.P.)

<sup>2</sup> i+AITIIP, Department of Mechanical Engineering, University of Zaragoza EINA, Maria de Luna 3, 50018 Zaragoza, Spain; delduque@unizar.es (D.E.); afeman@unizar.es (Á.F.); carlos.javierre@unizar.es (C.J.)

<sup>3</sup> Department of Design and Manufacturing Engineering, University of Zaragoza EINA, Maria de Luna 3, 50018 Zaragoza, Spain; racero@unizar.es

\* Correspondence: isabel.claveria@unizar.es; Tel.: +34-876555234

Received: 9 May 2019; Accepted: 17 June 2019; Published: 20 June 2019



**Abstract:** The usage of recycled polymers for industrial purposes arises as one of the most promising methods of reducing environmental impact and costs associated with scrapping parts. This paper presents a systematic study of the dimensional stability of a raw and 100% recycled polypropylene subjected to realistic environmental conditions occurring along its working life. The component studied is an internal part of an induction hob assembly. Industrial samples manufactured with both materials, in the same mold, and in the same injection machine, are subjected to ejection conditions, storage conditions (50 °C), and extreme performance conditions (80 °C). Induced dimensional changes are registered and analyzed using a coordinate measuring machine, and a tactile sensing probe. To verify the process capability of the samples manufacturing,  $C_p$  and  $C_{pk}$  values are calculated to evaluate the suitability of the recycled material as an alternative. Results conclude that, although the use of recycled material implies slight differences in terms of dimensional stability due to the changes induced in the polymer structure, these differences are not significant enough to affect the injection process capability. Therefore, recycling arises as one effective method to reduce both overruns associated with the consumption of raw polypropylene material and its environmental impact.

**Keywords:** polypropylene; dimensional; injection; recycled; process capability; warpage; shrinkage

### 1. Introduction

The annual growth in polypropylene (PP) consumption has been increasing again during the last years, after the severe decline suffered ten years ago due to the economic crisis [1].

This new trend leads to higher prices imposed by producers as well as higher amounts of waste due to plastic cuts and scraps that result in significant overruns. On the other hand, waste material may follow different end-of-life treatments, from which landfilling or incineration cause the highest environmental impact [2]. At this point, recycling stands out as a much more environmental-friendly alternative end-of-life treatment for polymers as it has also been promoted by specific key actions by the European Union [3,4]. One of the approaches to sustainability that has been gaining momentum in recent years is the circular economy, which encourages industries to convert waste back to materials through recycling [5–9]. Other strategies working on the same idea are reusing, reparability, refurbishment, and remanufacturing [10].

Tabla 12 Comparativa de propiedades de material virgen y reciclado.

	Virgen	Reciclado
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.22	1.25
Vicat B <sup>o</sup> C 10 N (50 <sup>o</sup> C/h)	90	94
HDT <sup>o</sup> C 1.82 MN/m <sup>2</sup> ISO 75 242 <sup>o</sup> C	70	74
Contracción % ISO 294-4	1.35	1.15
Temperatura de salida ( <sup>o</sup> C)	110	118

Las muestras para el ensayo se obtienen de una máquina de inyección Negri Bossi 8000H-6700, con una temperatura de la masa inyectada de 240<sup>o</sup>C. El tiempo de inyección es de 4,5 segundos, 30 segundos de compactación y un enfriamiento de 20 segundos. Todas las muestras ensayadas se inyectan durante el mismo día, tras un periodo de estabilización del proceso tras el inicio de la producción y el cambio de material.

Se analizan 15 muestras de cada material para el análisis dimensional y 25 para el cálculo de estabilidad de proceso, que son medidas en tres condiciones de temperatura diferentes tras un periodo de estabilización de 48h. Se establece mediante una medición inicial, un punto de partida para todas las piezas,  $M_0$ , tras la estabilización de las muestras en condiciones de laboratorio a una temperatura ambiente controlada de 20±0.5 <sup>o</sup>C. Se toman estas condiciones como representación de las condiciones medias de la pieza tras la inyección. Se establece  $M_0$  como valor absoluto de las dimensiones medidas en el ensayo, siendo la dimensión  $\Delta M_0$  la medida de la dimensión referida a la dimensión nominal ( $M_{nom}$ ) calculada como:

$$\Delta M_0 = |M_0 - M_{nom}|, \quad (1)$$

Tras la medición inicial se realiza un segundo ensayo,  $M_1$ , introduciendo las muestras en una cámara climática Memmert CTC256 a una temperatura de 50<sup>o</sup>C durante 48h. Tras este tiempo las muestras vuelven a estabilizarse a 20<sup>o</sup>C durante 24 horas (84). Este segundo ensayo representa situaciones de temperatura medio/alta para periodos de almacenamiento dados en situaciones similares durante los meses de verano. Los valores registrados en estas condiciones se nombran como  $M_1$ . La variación dimensional entre las muestras a 50<sup>o</sup>C y las muestras a temperatura ambiente,  $\Delta M_1$ , ambas referidas a la dimensión nominal  $M_{nom}$ , se calcula mediante la ecuación (2):

$$\Delta M_1 = \left| |M_0 - M_{nom}| - |M_1 - M_{nom}| \right|, \quad (2)$$

Donde:

- $M_1$ = dimensión medida tras calentamiento a 50<sup>o</sup>C
- $M_{nom}$  = Dimensión nominal
- $M_0$  = Dimensión medida a temperatura ambiente
- $\Delta M_1$  = dimension variation between samples heated at 50<sup>o</sup>C and samples at room temperature.

Finalmente, con el objetivo de reproducir las variaciones de temperatura que tienen lugar dentro del aparato durante su periodo de funcionamiento, donde se alcanzan temperaturas de hasta 80<sup>o</sup>C en el componente, las muestras se calientan hasta 80<sup>o</sup>C durante un periodo de 48 horas. Tras esta fase se estabilizan en condiciones controladas de laboratorio a 20<sup>o</sup>C durante 24 horas. Los resultados se nombran como  $M_2$ . La diferencia de dimensiones entre muestras a 80<sup>o</sup>C y muestras a temperatura ambiente,  $\Delta M_2$ , ambas referidas a la dimensión nominal,  $M_{nom}$ , se calcula a través de la ecuación (3):

$$\Delta M_2 = \left| |M_0 - M_{nom}| - |M_2 - M_{nom}| \right|, \quad (3)$$

Donde:

- $M_2$  = dimensión medida tras calentamiento a 80°C
- $M_{nom}$  = Dimensión nominal
- $M_0$  = Dimensión medida a temperatura ambiente
- $\Delta M_2$  = dimension variation between samples heated at 80°C and samples at room temperature.

El comportamiento de contracción de las muestras analizadas tras calentamientos por encima de la temperatura ambiente, a 50°C y 80°C, se calcula mediante la ecuación (4)

$$\Delta M_{50-80} = |\Delta M_2 - \Delta M_1|, \quad (4)$$

Donde:

- $\Delta M_{50-80}$  es la diferencia de medida entre muestras calentadas a 50°C y 80°C.

Las dimensiones analizadas en condiciones M0, M1 y M2 son las consideradas críticas para el ensamblaje y funcionalidad de la pieza, y son mostradas en la Figura 28.

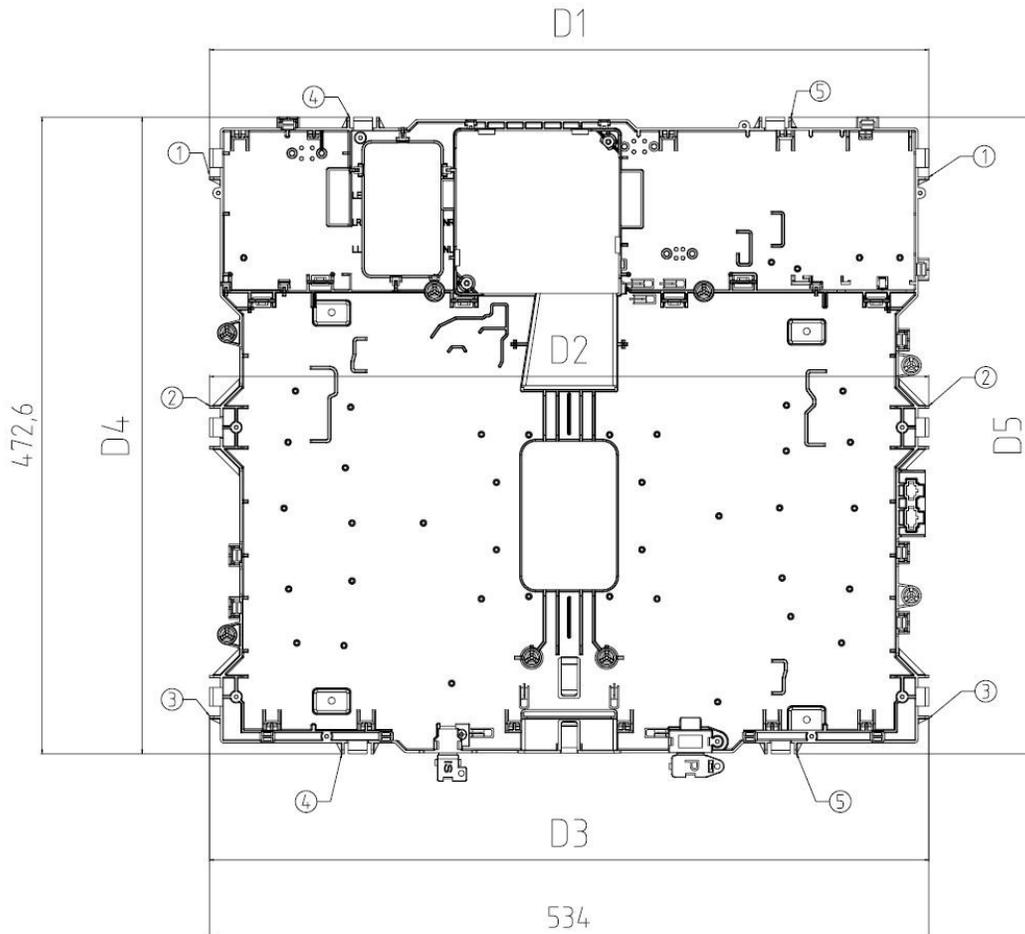


Figura 28 Detalle de la ubicación de los puntos de análisis de medición.  $D_i$

El análisis dimensional se realiza con una máquina de medición por coordenadas Zeiss PMC 876 con una sonda Vast XT y software de medición Calypso (Figura 29).

El sistema de coordenadas de referencia se sitúa en un útil de posicionamiento de forma que se pueden

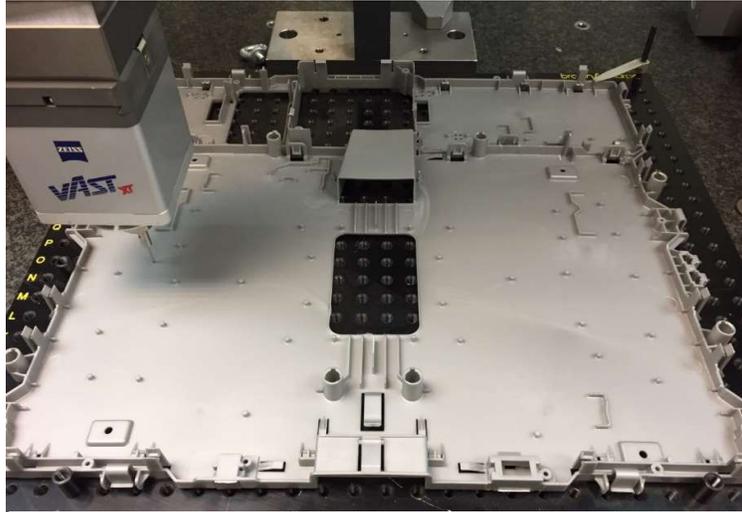


Figura 29 Mesa de medición por coordenadas.

automatizar las mediciones desde la base de éste útil una vez colocado sobre la mesa de medición. El componente se sitúa siempre sobre el útil de la misma forma, utilizando XY como plano primario, XZ como plano secundario y finalmente YZ como plano terciario. De esta forma se asegura la repetibilidad del posicionamiento.

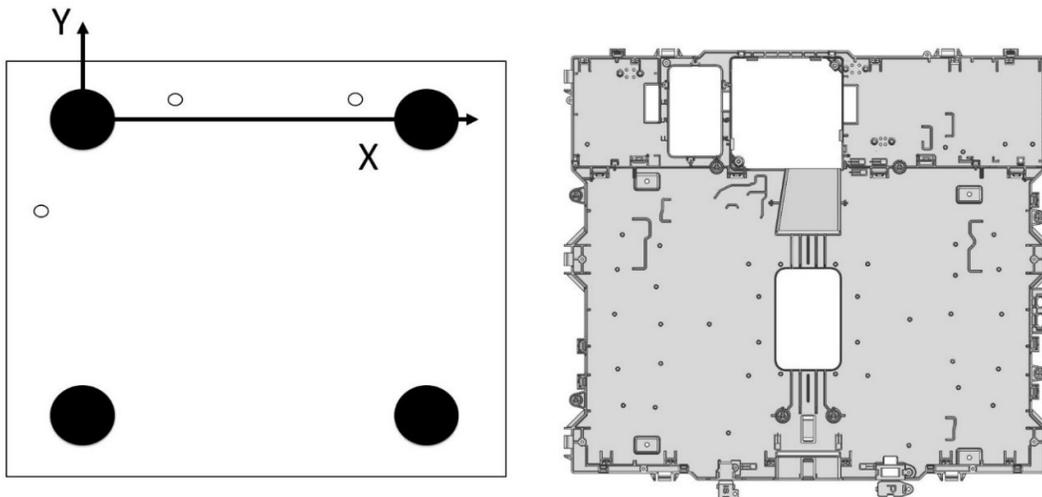


Figura 30 Eje de coordenadas utilizado en la medición.

Para analizar la viabilidad del uso de polipropileno reciclado desde el punto de vista de los requerimientos de calidad, se analiza la capacidad y la estabilidad del proceso de fabricación para ambos materiales.

Dos dimensiones representativas (D1 y D4) se seleccionan para este análisis debido a su criticidad durante el proceso de ensamblado. D1 y D4 se miden en las 25 muestras obtenidas de cada material con los métodos explicados anteriormente para calcular los parámetros  $C_p$  y  $C_{pk}$ , mediante las ecuaciones 5 y 6.

$$C_p = \frac{|USL - LSL|}{6\sigma}, \quad (5)$$

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl}) = \min\left(\frac{|USL - \mu|}{3\sigma}, \frac{|\mu - LSL|}{3\sigma}\right), \quad (6)$$

Donde:

- $C_p$  representa la capacidad del proceso para producir piezas dentro de los límites de tolerancia especificados.
- $C_{pk}$  representa la capacidad del proceso para producir piezas dentro de los límites de tolerancia especificados y cerca del valor nominal.
- USL es el límite superior de la especificación.
- LSL es el límite inferior de la especificación.
- Se estima que las mediciones siguen una distribución normal.
  - $\sigma$  es la desviación estándar de las medidas,
  - $\mu$  es el valor medio de  $n$  muestras medidas  $x_i$ , calculado mediante la ecuación 7

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (7)$$

Donde  $n=25$

$x_i$  es el valor de cada dimensión para la muestra  $i$ .

La Tabla 13 muestra los valores medidos en todas las muestras tras el periodo de estabilización a temperatura ambiente calculados mediante la ecuación (1) descrita anteriormente.

Tabla 13 Mediciones (en mm) en condiciones  $M_0$

	Material virgen				
	D1	D2	D3	D4	D5
$M_0$ medio	533,29	533,25	533,57	472,05	472,32
$\Delta M_0$ medio	0,72	0,74	0,42	0,54	0,27
$\sigma$	0,25	0,05	0,10	0,07	0,26
	Material reciclado				
	D1	D2	D3	D4	D5
$M_0$ medio	532,92	533,03	533,36	471,97	472,04
$\Delta M_0$ medio	1,07	0,96	0,63	0,62	0,55
$\sigma$	0,06	0,06	0,05	0,09	0,07

Todas las dimensiones reducen su valor con respecto a la dimensión nominal tras la estabilización a 20°C, principalmente debido a la contracción inducida por la diferencia entre la temperatura de inyección y la temperatura de medida tras el tiempo de estabilización.

La reducción de la dimensión en el material reciclado es ligeramente superior al valor del material virgen. La temperatura de salida de las piezas inyectadas en material reciclado es ligeramente superior (118°C) a la de las piezas de material virgen (110°C), lo que contribuye a una mayor contracción en el proceso de estabilización. Por este motivo, el valor de  $\Delta M_0$  en las muestras de material reciclado es mayor que el calculado para el material virgen. A pesar de que D1, D2 y D3 parten de un mismo valor nominal, no alcanzan en ningún caso esa dimensión final. El valor más bajo se alcanza en D1, y el más alto en D3, siendo  $\Delta M_0$  un 58% mayor en este caso. Las diferencias pueden atribuirse a la diferente contracción según las áreas de la pieza, causadas por variación en la fase de enfriamiento y a diferente rigidez de la pieza en diferentes secciones. La variación en el enfriamiento es causada por la no uniformidad en el espesor de la pieza o por el diseño del sistema de refrigeración del molde, que no es capaz de asegurar un enfriamiento uniforme en toda la superficie. La Figura 31 muestra la temperatura estimada a la salida del molde tras la fase de enfriamiento. La mayor parte de la superficie presenta una temperatura entre 110°C y 120°C.

Sin embargo, existen zonas de la superficie mostradas en azul en torno a los 60°C debido al diseño de los canales de refrigeración y a una mayor distancia al punto de entrada de material. Otras superficies que presentan temperaturas diferentes son aquellas cercanas a los puntos de inyección, mostrados en amarillo y cercanos a los 165°C, más calientes debido a su cercanía al punto de entrada de material. Las combinaciones de diferencias de temperatura en una misma sección con variaciones de rigidez causadas por las diferentes geometrías existentes en la pieza, causan las diferentes deformaciones comprobadas en las mediciones de las muestras. Por ejemplo, las secciones D1 y D4 contienen un mayor número de huecos en sus geometrías cercanas que las secciones D3 y D5, lo que provoca una mayor deformación.

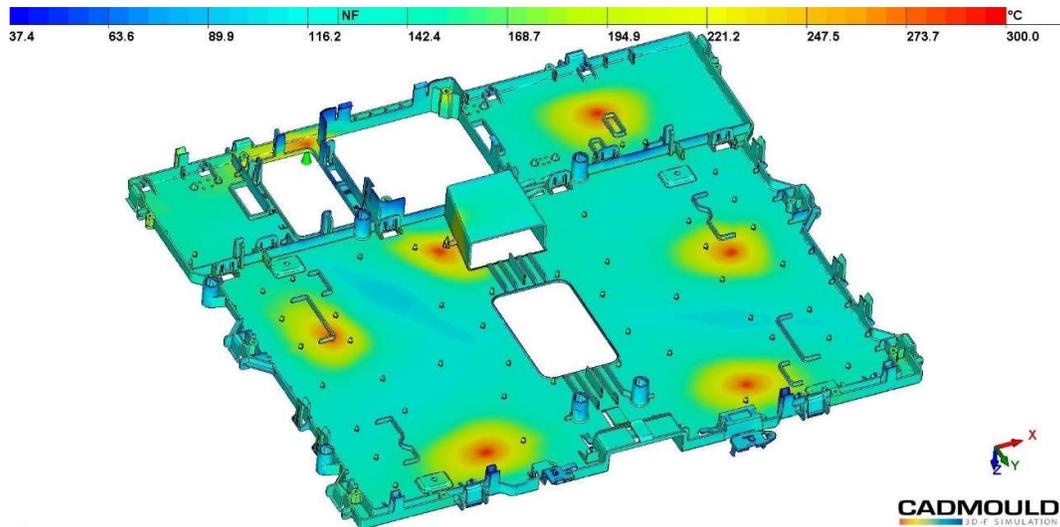


Figura 31 Distribución de temperatura a la salida del molde.

### Variación dimensional en condiciones extremas

Tal y como se ha descrito previamente, las condiciones de temperatura durante el almacenamiento se alcanzan tras calentar las muestras ( $M_1$ ) y su posterior estabilización a temperatura ambiente. Las condiciones de trabajo extremas se alcanzan tras el calentamiento a  $M_2$  y su posterior estabilización. La Figura 32 muestra las medidas medias en condiciones  $M_1$  y  $M_2$  para todas las dimensiones analizadas y ambos tipos de material.

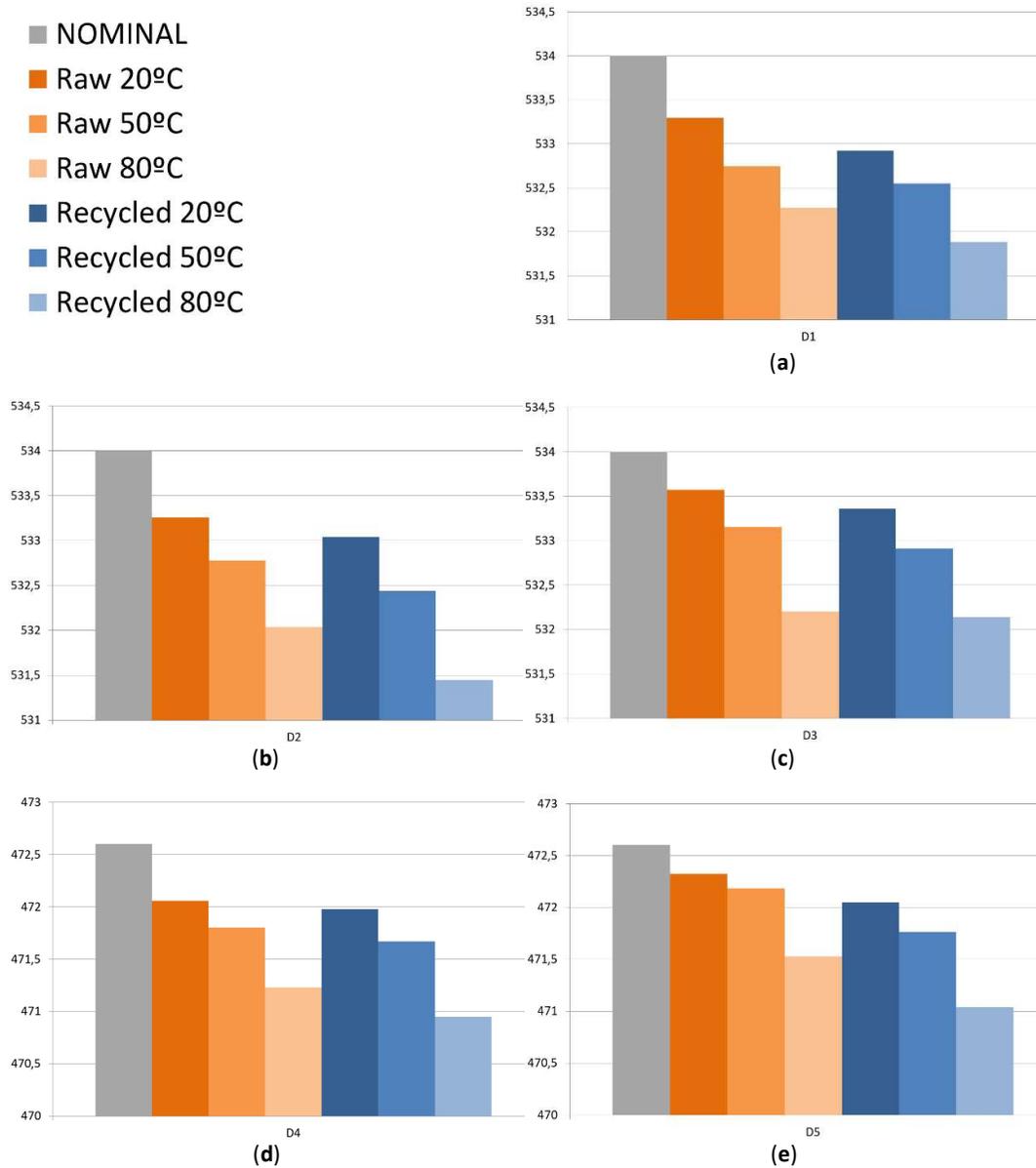


Figura 32 medición D; bajo diferentes condiciones ambientales para material virgen y reciclado (en mm) (a) D1; (b) D2; (c) D3; (d) D4; (e) D5.

Todas las dimensiones controladas, D1, D2, D3, D4 y D5 reducen su valor respecto del nominal tanto para material virgen como reciclado cuando las muestras se calientan y son posteriormente atemperadas a temperatura ambiente. Con un calentamiento a 80°C se alcanzan dimensiones menores que con las muestras calentadas a 50°C. Por otro lado, muestras inyectadas en material reciclado tienen, en promedio, dimensiones inferiores a las muestras de material virgen.

Las muestras de material reciclado se encuentran sometidas a dos contribuciones diferentes que ayudan a aumentar la contracción. Por un lado, las tensiones residuales son mayores en el material reciclado como consecuencia del proceso de inyección; además, el material tiende a tener un menor módulo de Young. Las tensiones generadas en el proceso de inyección se mantienen en el interior de la pieza durante la fase de enfriamiento en el molde y son liberadas gracias a la energía aportada en el calentamiento. Cuando esas muestras vuelven a calentarse las tensiones internas se liberan, reorganizando las cadenas

poliméricas y dando pie a variaciones dimensionales. Estas tensiones internas suelen ser mayores en materiales reciclados que en materiales vírgenes (85).

D1, D2 y D3 mantienen la misma tendencia en la variación dimensional con respecto al valor nominal que la situación descrita en el caso  $M_0$  en que las muestras se atemperan a temperatura ambiente. Las mayores diferencias se alcanzan para D1, y las menores para D3. Tal y como se ha descrito previamente, la no uniformidad del enfriamiento y las diferencias de rigidez en cada sección provocan este resultado. La sección D3 es también la que presenta una menor diferencia entre las muestras de ambos materiales analizados, especialmente en las muestras calentadas a mayor temperatura.

### Comportamiento dimensional con temperatura

La Figura 33 muestra la variación soportada por muestras calentadas y posteriormente estabilizadas a temperatura ambiente y muestras no calentadas. Ambas obtenidas mediante las ecuaciones (2) y (3) previamente descritas.

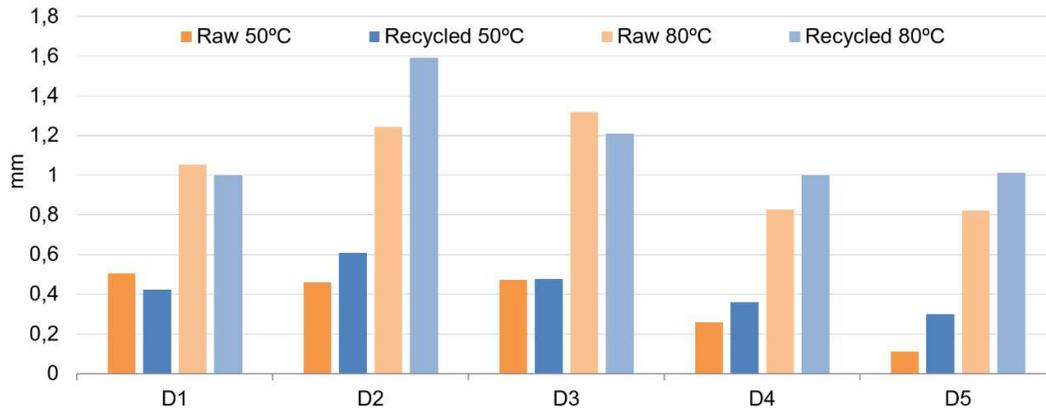


Figura 33 Variación dimensional entre muestras calentadas y no calentadas tras la estabilización a temperatura ambiente.

Estos resultados proporcionan una medida de la contracción de ambos materiales. Tal y como era de esperar, las diferencias en las muestras calentadas a 50°C son menores que las variaciones obtenidas en muestras calentadas a 80°C.

La Figura 34 muestra las diferencias entre muestras calentadas a 50°C y muestras calentadas a 80°C obtenidas mediante la ecuación (4). Este resultado muestra el comportamiento a contracción de ambas muestras calentadas a distintas temperaturas sobre la temperatura ambiente. De nuevo, las diferencias para material virgen son menores salvo en las dimensiones D1 y D3.

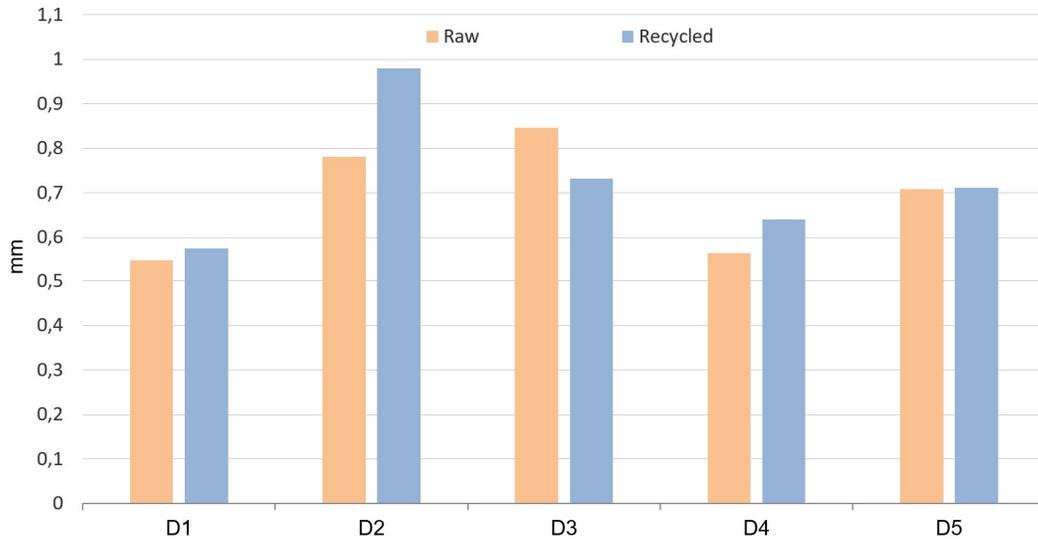


Figura 34 Variación dimensional entre muestras calentadas a 50°C y muestras calentadas a 80°C tras estabilización a temperatura ambiente.

El ensayo térmico al que son sometidas las piezas provoca la liberación de tensiones internas producidas durante el proceso de compactación y enfriamiento del ciclo de inyección. Ante un mayor aporte energético (80°C), la liberación de estas tensiones es mayor, provocando mayores variaciones dimensionales, tal y como se observa en las muestras analizadas. A pesar de ser un efecto común y de poder ser claramente identificado en las muestras analizadas; se observa un mayor efecto en las muestras de material reciclado. Este efecto se muestra en la Tabla 14, donde se observa la variación dimensional en muestras sometidas a una variación de temperatura de 30°C. Se observa que, para una diferencia de 80°C a 50°C existe una mayor variación que en la producida para una diferencia de temperatura de 50°C y 20°C.

Tabla 14 Variación dimensional para  $\Delta T=20^{\circ}\text{C}-50^{\circ}\text{C}$  y  $\Delta T=50^{\circ}\text{C}-80^{\circ}\text{C}$ . En mm.

		<b>Material virgen</b>				
$\Delta T$		<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>D4</b>	<b>D5</b>
50°C-80°C		0.64	0.78	1.41	0.56	0.7
20°C-50°C		0.4	0.46	0.47	0.24	0.11
		<b>Material reciclado</b>				
50°C-80°C		0.57	0.98	0.73	0.64	0.71
20°C-50°C		0.42	0.60	0.47	0.35	0.29

## Análisis de estabilidad de proceso

Dado que las muestras fabricadas con material reciclado alcanzan unas dimensiones finales menores que las inyectadas con material virgen, es importante analizar si los cambios en dichas medidas son aceptables desde un punto de vista de calidad. Para evaluar la influencia del uso de material reciclado, se han calculado en 25 muestras los valores de medición de la capacidad del proceso  $C_p$  y  $C_{pk}$  mostrados en la Tabla 15.

Tabla 15  $C_p$  y  $C_{pk}$  calculados para ambos materiales

	Material virgen		Material reciclado	
	D1	D4	D1	D4
$C_p$	5.83	10.55	3.873	2.008
$C_{pk}$	2.35	5.09	1.704	1.715

La industria acepta como valor de  $C_p$  y  $C_{pk}$  de un proceso estable un resultado superior a 1,33. Por tanto, puede afirmarse que todas las dimensiones se encuentran dentro de la especificación.

En el caso de material virgen, los valores de  $C_{pk}$  para D1 y D4 son de 2,35 y 5,09 respectivamente. Estos valores son suficientemente altos como para considerar que el 99,9999998% de las muestras se encontrarán dentro de los valores admitidos.

Para el material reciclado el valor de  $C_{pk}$  calculado para D1 es de 1,704 y 1,715 para D4, en ambos casos mayores de 1,33, y muestra de que el 99,994% de las muestras serán válidas de acuerdo a su especificación dimensional. Como era de esperar, los valores de capacidad de proceso para el material reciclado son menores que los obtenidos para el material virgen. De cualquier forma, los valores calculados superan el umbral de 1,33 definido como aceptable.

La distribución de las medidas de las piezas inyectadas en material virgen y posteriormente analizadas se muestra en la Figura 35 y en la Figura 36. Los resultados se encuentran, en ambos casos, cerca de su valor medio. A pesar de no ser valores cercanos al nominal, de acuerdo a los valores de reducción obtenidos la pieza se encuentra siempre dentro de las especificaciones definidas.

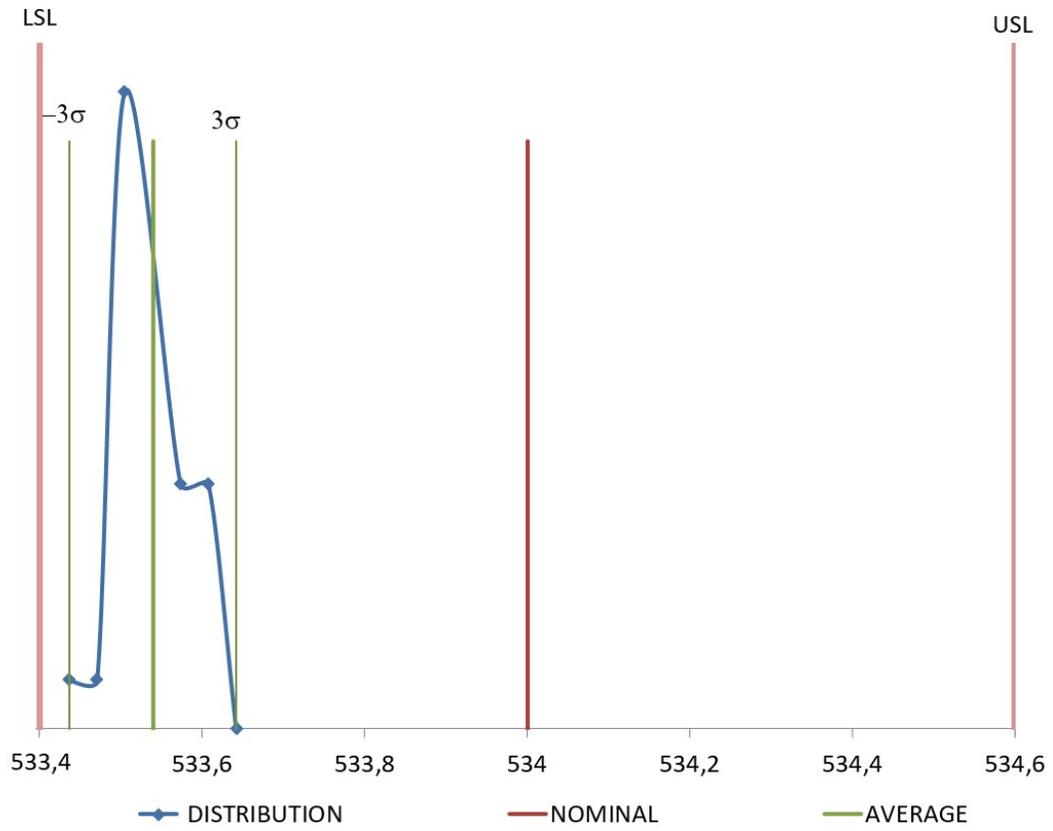


Figura 35 Distribución para D1 en material virgen.

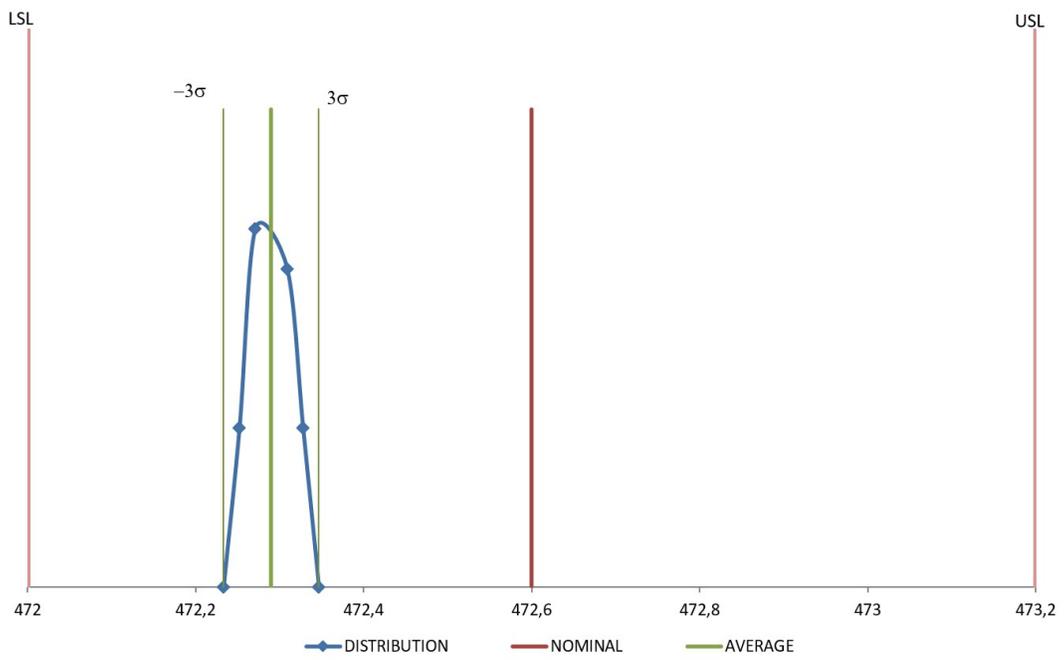


Figura 36 Distribución para D4 en material virgen.

En el caso del material reciclado los valores de  $C_{pk}$  son similares o ligeramente inferiores a los del material virgen. Sin embargo, el valor de  $C_p$  sí es notablemente inferior lo que supone que la distribución de las medidas tiene una amplitud mayor. La Figura 37 y la Figura 38 muestran dichas distribuciones de medidas. Para D1 las medidas son mucho más compactas alrededor del valor medio y menos centradas con respecto al valor nominal (mayor  $C_p$  y menor  $C_{pk}$  respectivamente). D4 muestra la tendencia opuesta con una mayor dispersión de valores con respecto a la media, pero más centrados con respecto al valor nominal.

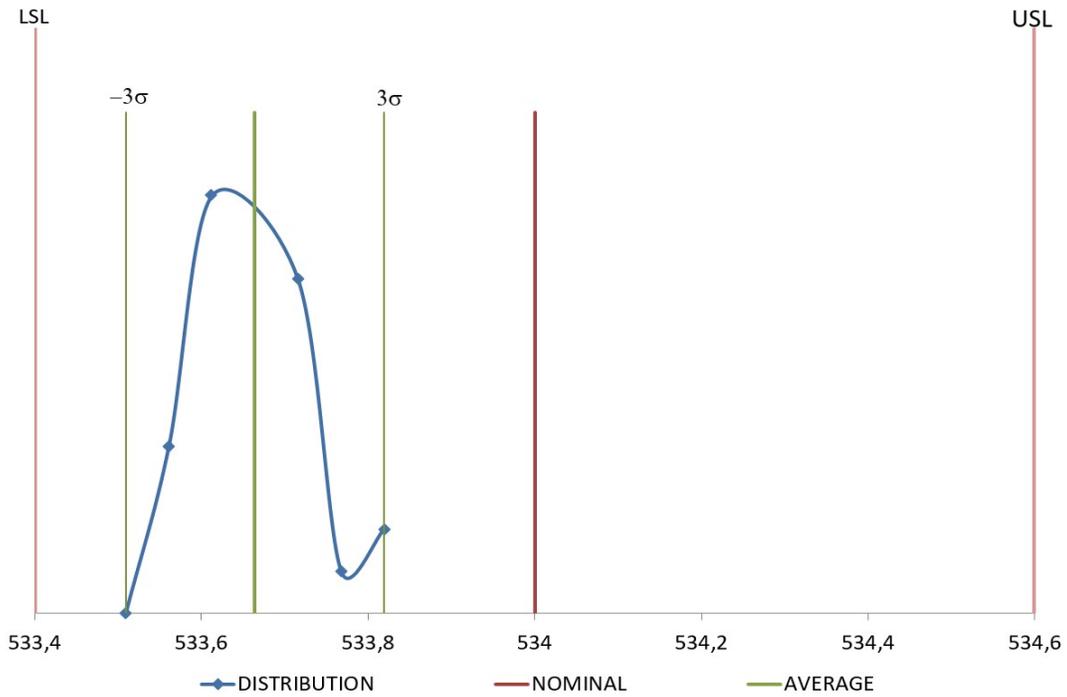


Figura 37 Distribución para D1 en material reciclado.

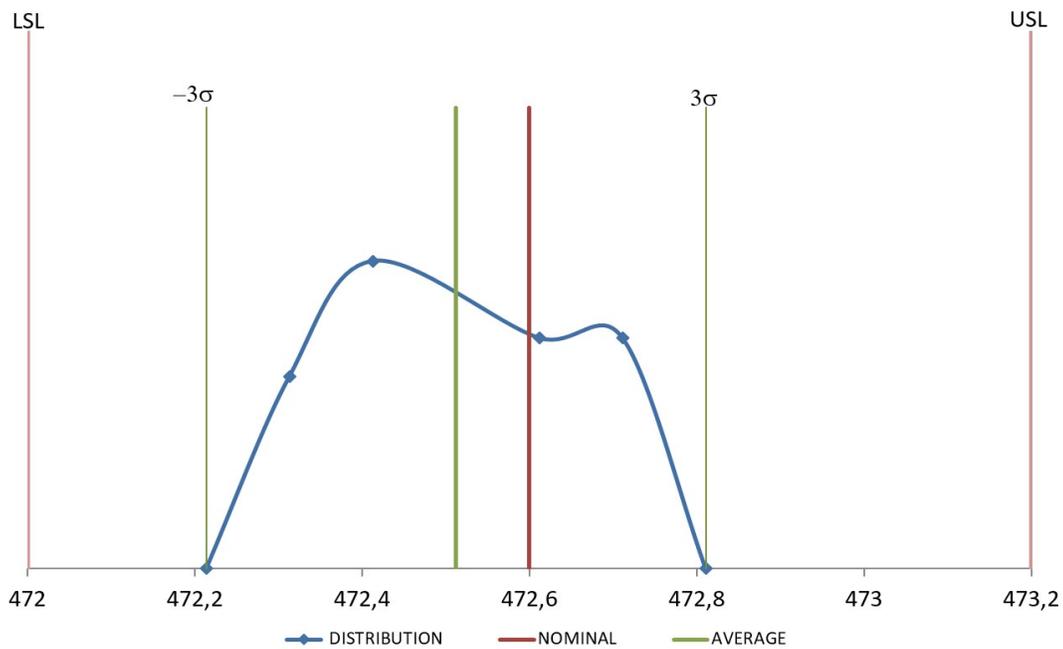


Figura 38 Distribución para D4 en material reciclado

Los moldes de inyección son generalmente mecanizados con medidas superiores a las nominales de la pieza para contrarrestar el efecto de la contracción de los materiales. Por este motivo es posible obtener muestras por encima y por debajo del valor nominal debido al efecto de los parámetros de inyección. En este caso, la dimensión D4 puede estar sobredimensionada con respecto al valor de D1. Esto implica que algunas de las muestras medidas de D4 pueden tener un valor mayor que el nominal, dando pie a una distribución como la obtenida en la Figura 38. Cuando el sobredimensionamiento en D1 es menor, es menos probable obtener una medida por encima del valor nominal, tal y como se muestra en la Figura 37.

El comportamiento dimensional del material reciclado muestra ligeras diferencias con respecto al material virgen debido a su menor rigidez. Esto supone mayores deformaciones ante secciones menos rígidas o zonas más débiles y susceptibles a deformarse durante la contracción. Sin embargo, zonas sin áreas de sección debilitadas sí muestran un comportamiento comparable. Las deformaciones obtenidas tanto a temperatura ambiente como tras los calentamientos a las temperaturas definidas como uso o condiciones extremas son similares y comparables en ambos materiales y en ambos casos son aptas para su uso industrial.

---

# *Capítulo 6*

---

*Propiedades Mecánicas del  
Material Reciclado*



## PROPIEDADES MECÁNICAS DEL MATERIAL RECICLADO

Los ensayos de comportamiento mecánico han sido realizados sobre probetas extraídas de piezas inyectadas bajo las mismas condiciones de operación. Todas las muestras fueron inyectadas el mismo día en la misma instalación y con los mismos útiles con el fin de garantizar la estabilidad del proceso.

Se extraen 11 probetas de cada soporte “ELIN”. Esta pieza ha sido descrita en los capítulos anteriores. De las probetas obtenidas según la distribución mostrada en la Figura 39 y con la geometría normalizada especificada en la Figura 40, se descartan dos por presentar restos de los puntos de inyección, lo que modifica su forma y propiedades. De haber tenido en cuenta los resultados de muestras con y sin marcas de puntos de inyección, los resultados hubieran resultado inexactos.

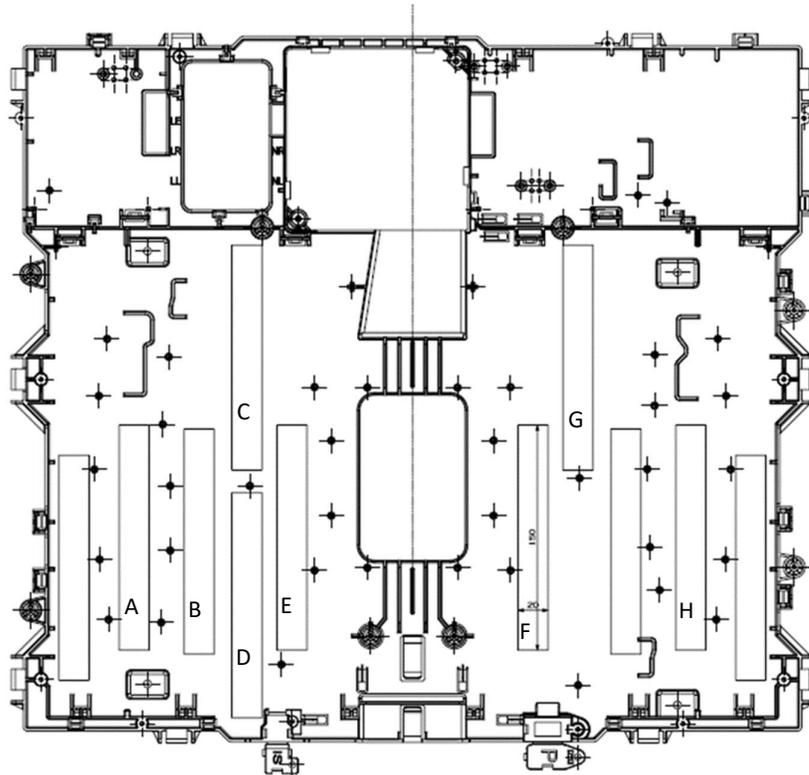


Figura 39 Obtención de las probetas a partir del soporte ELIN

De todas las probetas restantes se seleccionan seis, y se clasifican en función de si presentan o no, línea de soldadura. Con ellas se busca analizar la influencia en el comportamiento de la tensión de rotura:

- Probetas con línea de soldadura: A y B.
- Probetas sin línea de soldadura: C, F, G y H.

JIS K7127 type 1B, JIS K7139-A2 and A3, JIS K7162-1B, ISO 527-2-1B, JIS K7113-1(abolished in 2010) etc.

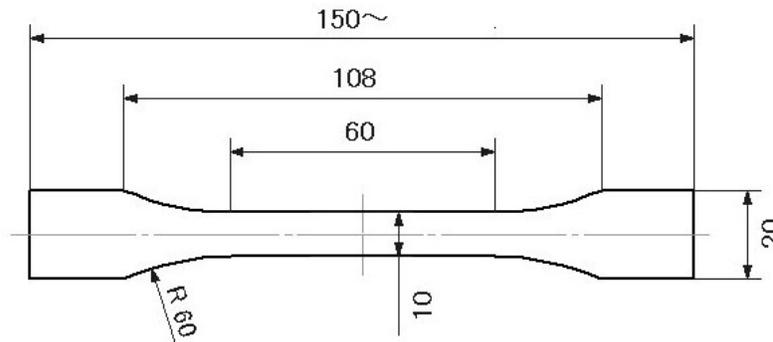


Figura 40 Dimensiones de las probetas mecanizadas.

Para cada una de las muestras, se realizan ensayos sobre cinco probetas procedentes de diferentes piezas en material virgen y reciclado.

Estos ensayos de tracción se realizan en una máquina uniaxial de ensayos dinámicos INSTRON 8032, con una capacidad de carga de 100 kN, mostrada en la Figura 41.



Figura 41 Máquina Instron del área del departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Zaragoza

Los ensayos fueron realizados a temperatura ambiente, a 50 °C y a 80 °C, simulando las condiciones ambientales para el caso del almacenamiento de las piezas y de funcionamiento del soporte electrónica dentro de la placa de inducción. Para los ensayos a temperatura, se hizo empleo de una cámara climática unida a la máquina de ensayos tal y como se muestra en la Figura 42.



Figura 42 Caracterización de las muestras a 50°C y 80°C con cámara climática.

La Figura 43 muestra las gráficas tensión-deformación para los dos materiales analizados en las tres condiciones de ensayo definidas. Se muestra que, en ambos casos de material, el módulo elástico varía a mayor deformación plástica. La Figura 44 muestra el mayor valor de módulo de Young del material virgen, así como su mayor capacidad de deformación.

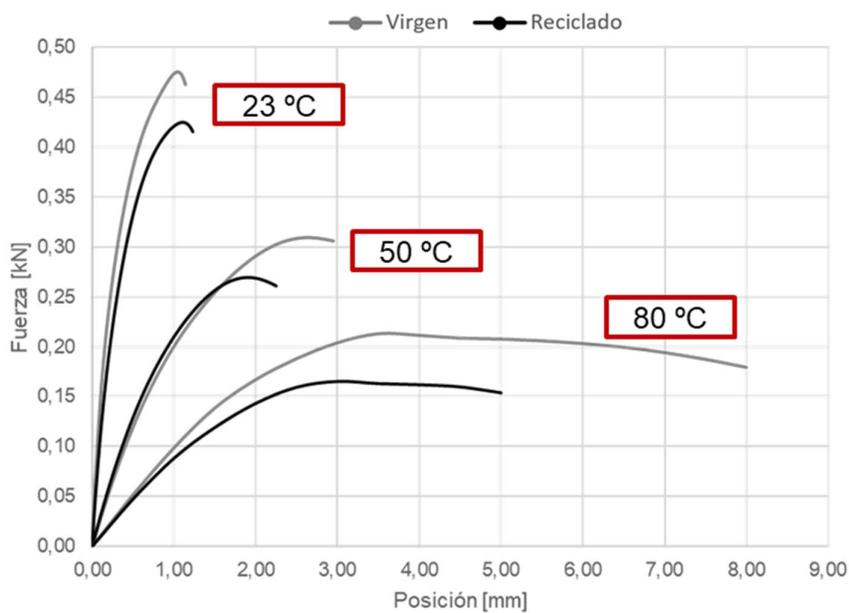


Figura 43 Curvas tensión deformación para material virgen y reciclado a diferentes temperaturas.

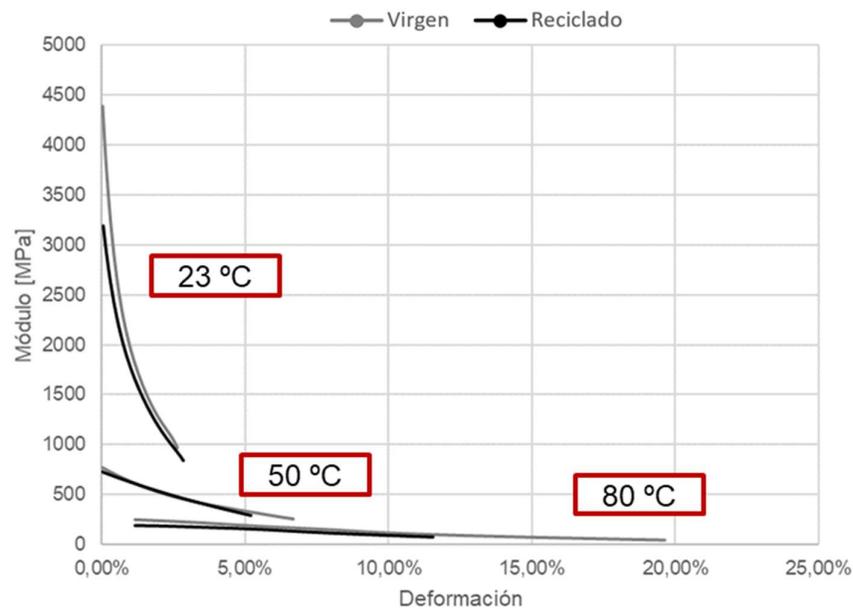


Figura 44 Curvas módulo-deformación para material virgen y reciclado a diferentes temperaturas

Tal y como se observa en las gráficas anteriores, existe variación en el comportamiento mecánico de la pieza conforme varía la temperatura. Las propiedades mecánicas disminuyen considerablemente con la temperatura. La tensión de fluencia es siempre mayor para el caso del plástico virgen. Para los casos de 23 °C y 80 °C el material virgen presenta un mayor módulo que el material reciclado. No se puede decir lo mismo para los ensayos realizados a 50 °C. En todo caso el módulo elástico tiende a igualarse conforme aumenta la deformación.

Las buenas propiedades físicas mantenidas por el plástico reciclado, así como su estabilidad dimensional demostrada en el punto anterior ante situaciones de estrés térmico demostraron un muy buen comportamiento del material reciclado, permitiendo un mayor rango de usos dentro y ofreciendo la posibilidad de introducir nuevas funciones en componentes. La caracterización de las propiedades mecánicas y el estudio de su comportamiento dimensional a diferentes temperaturas ha permitido la integración de componentes que hasta ese momento se concebían como piezas separadas. Recogida dentro del desarrollo de productos, la capacidad del material de soportar determinados requerimientos abre la posibilidad a nuevas arquitecturas dentro de las encimeras de inducción.

Gracias a la capacidad demostrada por el material reciclado de soportar sollicitaciones mecánicas y térmicas similares a las del material virgen se propuso una nueva arquitectura de encimera de inducción con la ventilación integrada, la cual ha sido protegida, con el número de solicitud patente **EP3679304A1**: HOB APPARATUS (86)

## Límite de fluencia

Para evaluar la resistencia del material, se toma como valor de referencia la tensión de fluencia del material. Este valor se encuentra ligeramente por encima del límite elástico y marca el límite donde se produce una deformación irrecuperable de la probeta. La tensión de fluencia se analiza en base a los datos obtenidos, bien en la ficha técnica del material, bien mediante los ensayos de tracción realizados en los equipos de laboratorio.

Los resultados del análisis realizados a temperatura ambiente se muestran en la Tabla 16, y de forma gráfica en la Figura 45 Comparativa de tensión de fluencia.

Tabla 16 Resultados de los ensayos de tracción

	Material virgen		
	Proveedor	Sin línea de soldadura	Con línea de soldadura
Tensión de fluencia [MPa]	32	27,1	24,4
Desviación	-	1,5	0,9
	Material reciclado		
	Proveedor	Sin línea de soldadura	Con línea de soldadura
Tensión de fluencia [MPa]	27	24,5	23,6
Desviación	-	1,0	0,4

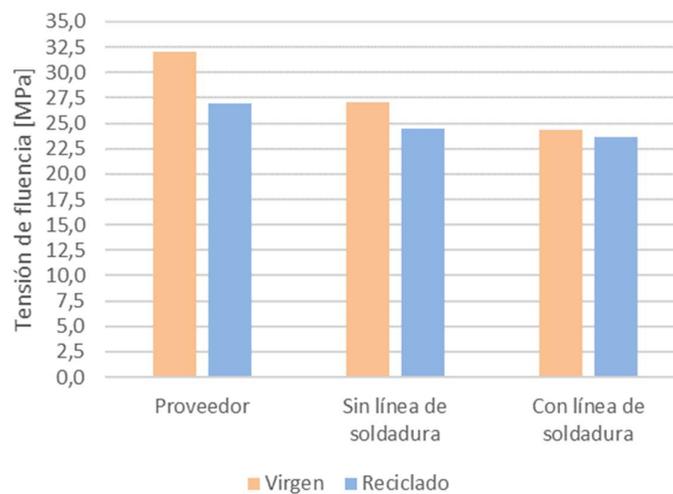


Figura 45 Comparativa de tensión de fluencia

Se observa una diferencia entre los valores obtenidos mediante ensayo y los valores proporcionados por los fabricantes de los materiales en su ficha técnica. Los valores de tensión de fluencia son siempre menores para el material reciclado con respecto a los valores del material virgen. Sin embargo, la introducción de líneas de unión en la probeta afecta de una manera más considerable al material virgen.

## Módulo Elástico

En lo referido al cálculo del módulo elástico, se han utilizado los valores extraídos en las probetas sin líneas de soldadura. De igual forma que sucede en el resto de materiales plásticos, el módulo elástico disminuye con el aumento de la deformación hasta alcanzar la deformación de rotura. Por este motivo, se han obtenido los valores de módulo elástico para dos puntos representativos de deformación como son el 0,2% y el 1% de deformación.

Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 17 y de forma gráfica en la Figura 46

Tabla 17 Resultados de módulo elástico [MPa] para material virgen y reciclado

	Material virgen		
	23°C	50°C	80°C
Módulo Elástico al 0,2%	3603,3	653,2	273,2
Desviación	242,1	69,3	32,9
Módulo Elástico al 1%	1954,3	590,7	260,8
Desviación	38,0	56,0	29,2
	Material reciclado		
	23°C	50°C	80°C
Módulo Elástico al 0,2%	2791,3	743,1	241,4
Desviación	183,1	134,8	46,4
Módulo Elástico al 1%	1750,3	655,8	229,5
Desviación	24,6	79,1	41,4

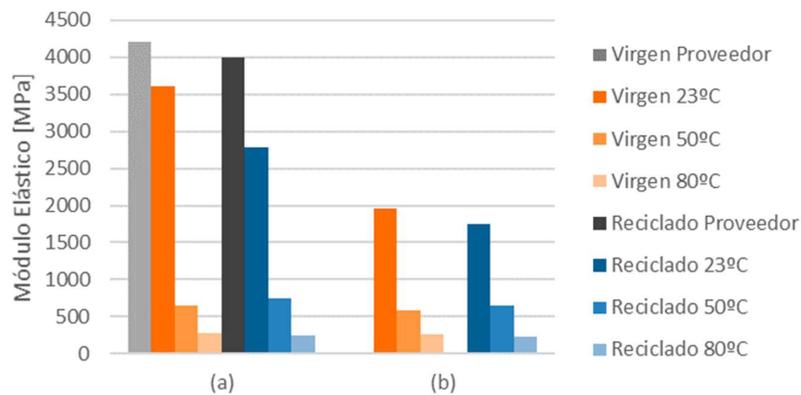


Figura 46 Valores del módulo elástico [MPa] a diferentes condiciones de temperatura, para el material virgen y reciclado, (a) módulo al 0,2%; (b) módulo al 1%

La Figura 47 representa la variación de módulo elástico en las probetas analizadas una vez que han sido sometidas a calentamientos a 50°C y a 80°C. Se comprueba que la disminución del módulo elástico del material es similar en ambos casos de materia prima y en ambas situaciones de deformación.

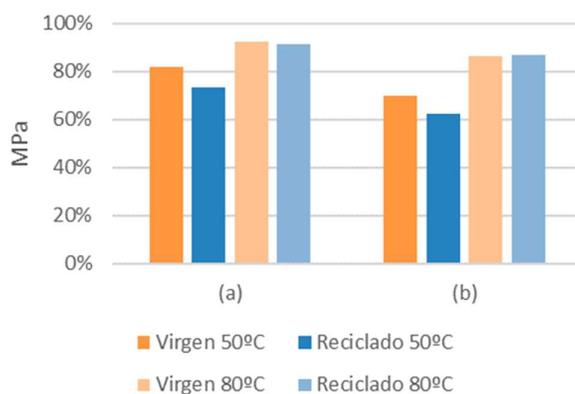


Figura 47 Diferencias del módulo elástico entre muestras calentadas a 50°C y 80°C,

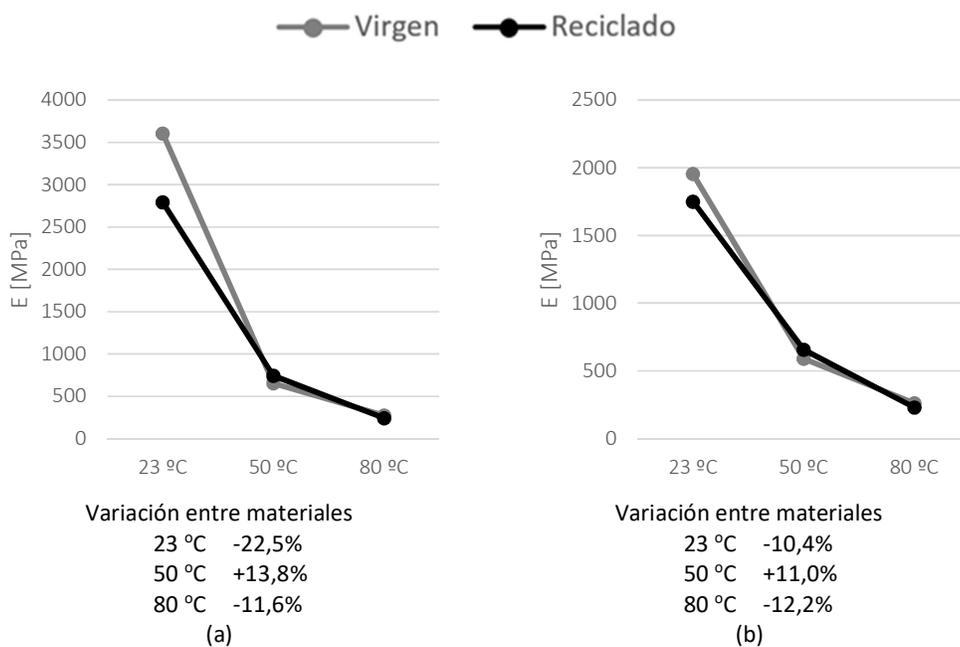


Figura 48 Diferencias entre materiales para las temperaturas 23°C, 50°C y 80°C, (a) módulo al 0,2%; (b) módulo al 1%

Para el caso del módulo elástico calculado al 0,2% de deformación, la reducción de módulo según se incrementa la temperatura afecta más al material virgen. La variación del módulo entre ambos materiales es mayor a temperatura ambiente y tiende a igualarse en las muestras analizadas a mayor temperatura. La variación de módulo elástico a temperatura ambiente supone un 22,5% de descenso para el valor del plástico reciclado. Sin embargo, este valor tiende a igualarse o incluso a superar al del material virgen a una temperatura de 50°C. El valor obtenido en los ensayos realizados a 80°C colocan de nuevo un valor ligeramente superior para el material virgen, con una menor variación con respecto al reciclado de la existente a temperatura ambiente.

En este capítulo se ha mostrado que las propiedades mecánicas de los materiales obtenidos mediante el reciclado de desechos post-industriales controlados ofrecen valores y comportamientos similares a los de materiales vírgenes. De igual forma que en las propiedades dimensionales, su comportamiento y evolución ante temperaturas de uso más elevadas muestra una variación similar al del material virgen, por lo que el PP analizado puede ser utilizado como sustituto del material virgen.

---

# *Capítulo 7*

---

## *Conclusiones*



## CONCLUSIONES GENERALES

Se ha desarrollado una metodología que permite la comparación entre materiales poliméricos vírgenes y reciclados desde el punto de vista del impacto ambiental y las propiedades físicas (reológicas, dimensionales y mecánicas) del mismo. A través de la metodología presentada, es posible comparar ambos materiales en igualdad de condiciones, y de forma clara. Esto permite una cuantificación real de las propiedades y del beneficio ambiental del uso de materiales reciclados.

La cuantificación del impacto ambiental del proceso de reciclaje de materiales plásticos se ha llevado a cabo de forma completa y exhaustiva, desglosando el proceso en todos los pasos necesarios para llevarlo a cabo, e identificando los principales puntos generadores de impacto, de cara a una futura optimización ambiental del proceso.

Se ha comprobado experimentalmente que las propiedades reológicas del material reciclado son similares a las del material virgen, con un pequeño aumento de la viscosidad. Posteriormente se ha comprobado, mediante simulación por elementos finitos, que ambos materiales se comportan de manera similar durante el proceso de inyección.

Se ha analizado experimentalmente el comportamiento dimensional de materiales vírgenes y reciclados ante diferentes ensayos térmicos. Se ha validado el comportamiento mediante la medición de la contracción en todos los casos y en varias dimensiones de una misma pieza. El resultado muestra una mayor contracción en los materiales reciclados, si bien el orden de magnitud es similar a la existente en materiales vírgenes.

Se han analizado de forma comparativa, con respecto a materiales vírgenes, las propiedades mecánicas resultantes del proceso de reciclado. Este análisis se ha extendido a diferentes condiciones de temperatura para valorar la variación de las mismas, con el objetivo de valorar la viabilidad de su uso en encimeras de inducción. Las diferencias observadas en las propiedades estudiadas son pequeñas, considerando al material reciclado como una alternativa viable al uso de materiales vírgenes.

### Conclusiones ACV

- Se ha cuantificado el impacto ambiental derivado del proceso de reciclado de materiales plásticos. Este estudio se ha realizado apoyado en un componente de encimeras de inducción, el cual se ha utilizado para establecer una comparativa realista de la reducción de impacto real recogido por la sustitución de materiales vírgenes por reciclados.
- El material reciclado puede plantearse como una opción viable para sustituir materias primas vírgenes reduciendo el impacto ambiental en un 30% según ReCiPe y casi un 43% de Huella de Carbono.
- El uso de material reciclado reduce el impacto asociado a la fabricación de la materia prima en un 61% en ReCiPe. Incluso en el peor caso definido, el ahorro es del 48%. Esto significa que la reducción del impacto ambiental se debe principalmente a la disminución de los impactos de fabricación de materia prima.
- El impacto del proceso de moldeo por inyección muestra valores similares entre materiales de diversas fuentes debido a que el consumo eléctrico es la principal fuente de impacto del proceso completo, y dicho consumo similar en ambos casos. Esta afirmación es válida siempre y cuando se comparen materiales equivalentes y que no requieren de un proceso previo de secado.
- El impacto asociado al fin de vida del producto no varía en función del termoplástico seleccionado entre virgen y reciclado. En una aproximación conservadora, se mantiene el

vertedero como el destino principal ya que no se consideran reciclables resinas termoplásticas con carga o aditivos.

- El mayor factor de impacto ambiental dentro del proceso de reciclaje de materiales plásticos es el consumo eléctrico de las instalaciones.
- El impacto global es muy sensible a la logística del producto y a la selección de métodos de transporte y ubicaciones productivas. Se ha cuantificado el impacto de la selección del lugar de tratamiento y producción, así como de los métodos de transporte seleccionados.
- Las fases de transporte tanto desde el centro de producción hasta las plantas de inyección, como desde el ensamblaje hasta el destinatario final, aportan impactos significativos al conjunto del producto. Este impacto puede disminuirse mediante la selección de proveedores locales y la optimización de los procesos de transporte seleccionados. El efecto del uso de combustibles fósiles en el transporte se ve reflejado en el mayor impacto en la huella de carbono con respecto a la metodología ReCiPe, más generalista.
- El transporte de las materias primas hasta el punto de reciclado tiene relevancia para el impacto ambiental. Sin embargo, se ha comprobado para el proveedor analizado que el peor caso de aprovisionamiento posible mantiene ventajas significativas en cuanto al impacto total con respecto al material virgen.
- El bucle cerrado de tratamiento de los materiales tras su fin de vida es deseable pese a su complejidad técnica, ya que es beneficioso desde un punto de vista ambiental y aplicable a un amplio rango de industrias.

## Conclusiones sobre el Proceso de Inyección del Material Reciclado

- A pesar de que los materiales reciclados tienen orígenes diversos, una correcta trazabilidad de los desechos utilizados, unidos a la utilización de aditivos y otras cargas, producen un material con características físicas y técnicas similares a los vírgenes.
- El análisis reológico muestra similitudes entre procesos de inyección de ambos materiales a pesar de los valores de viscosidad ligeramente superiores obtenidos en los reciclados. El mayor valor de viscosidad supondrá un aumento en las presiones y los esfuerzos necesarios para la producción de piezas mediante procesos de moldeo por inyección. Sin embargo, se ha comprobado que el aumento de la viscosidad no supone una variación significativa de los parámetros de funcionamiento de la máquina de inyección entre material virgen y reciclado.
- El comportamiento en inyección en presencia de cambios de sección en la pieza o diferentes espesores es similar, sin que se presenten deformaciones ni tensiones residuales excesivas debido al uso de materiales reciclados. La distribución del llenado es la misma en ambos casos con una presión similar, ligeramente superior en el caso del material reciclado debido a la mayor viscosidad. La fuerza de cierre también es mayor por el mismo motivo.
- Tras los análisis se ha conseguido inyectar con éxito la pieza en material reciclado utilizando la misma máquina y el mismo molde ya existente para el material virgen. Este dato es de gran interés ya que demuestra la viabilidad del cambio de materiales sin necesidad de grandes inversiones.
- De las pruebas de inyección, para el material virgen se estableció una temperatura de inyección de 220°C, mientras que el material reciclado aumenta dicho valor hasta 240°C y con un incremento del tiempo de ciclo de sólo 1 segundo. En el primer caso, el consumo energético es de 0,59 KWh/Kg, mientras que para el reciclado aumenta hasta 0,601 KWh/Kg. Además, la pieza obtenida mediante material reciclado tiene un aumento de masa de 9 g., hasta los 615g. debido a la mayor densidad del material.

## Conclusiones sobre el Análisis Dimensional del Material Reciclado

- Tras realizar las pruebas de inyección de forma exitosa, se comprobó que las piezas eran dimensionalmente aptas para su montaje en línea.
- Se comprobó que las dimensiones relevantes en las piezas fabricadas con material reciclado tienden a valores inferiores con respecto a las mismas medidas en piezas de material virgen.
- El proceso de reciclaje mecánico altera las cadenas de los polímeros acortando su longitud en los materiales reciclados con respecto a los vírgenes. Esto provoca un menor Módulo de Young y mayores tensiones residuales, lo que posteriormente supone una dimensión final menor en las muestras analizadas.
- En las muestras sometidas a calentamientos en condiciones de mayor temperatura (80°C), la contracción es mayor, y por tanto las piezas más pequeñas, respecto a las muestras ensayadas a una temperatura más baja (50°C).
- La contracción se presenta en materiales de origen virgen y reciclado en valores similares. Las diferencias con respecto al valor nominal varían en función de la sección que se toma en consideración, no presentando un comportamiento lineal. No obstante, los valores son comparables ante las mismas condiciones de inyección y refrigeración.
- La estabilidad dimensional de las piezas fabricadas en material virgen y material reciclado en procesos de inyección es mayor que los requerimientos estándar para valores de  $C_p$  y  $C_{pk}$  (1,33). En el caso del material virgen se obtuvieron valores de 5,83 y 2,35, mientras que en el reciclado fueron de 3,83 y 1,70.
- Por tanto, se ha comprobado que es posible obtener piezas dimensionalmente válidas en material reciclado con un mismo molde.

## Conclusiones sobre el Análisis de las Propiedades Mecánicas

- Tras realizar las pruebas de inyección de forma exitosa, se tomaron muestras de las piezas obtenidas a fin de validar el comportamiento mecánico del material reciclado.
- El proceso de reciclaje mecánico altera las cadenas de los polímeros acortando su longitud en los materiales reciclados con respecto a los vírgenes. Esto provoca un menor Módulo de Young y unas menores tensiones de fluencia.
- De igual forma que se analizaron las variaciones dimensionales, los ensayos de tracción comparativos en muestras de material virgen y reciclado se han realizado a diferentes temperaturas (23°C, 50°C y 80°C) obteniendo valores de tensión de fluencia y módulo elástico para ambos materiales.
- Las propiedades mecánicas disminuyen conforme la temperatura de análisis aumenta. La tensión de fluencia es siempre mayor en el caso del plástico virgen, mientras que el valor del módulo elástico presenta una variabilidad mayor.
- Para un 0,2% de deformación la reducción del módulo ante el aumento de la temperatura afecta en mayor medida al material virgen, por lo que no se aprecia un empeoramiento del comportamiento térmico del reciclado por los tratamientos sufridos durante su proceso de fabricación.
- La variación del módulo entre materiales es mayor a temperatura ambiente, suponiendo una reducción del 22,5% del módulo para el plástico reciclado. A 23°C y 80°C el material virgen presenta un mayor módulo elástico, mientras que a 50°C el valor para el material reciclado es mayor.
- Se ha comprobado que el reemplazo de materiales vírgenes por reciclados puede hacerse de forma directa cuando los requerimientos mecánicos no estén al límite de la especificación. Existe una gran cantidad de piezas fabricadas en materiales plásticos cuyas funciones de cobertura o soporte permiten la sustitución por materiales reciclados.



---

# Capítulo 8

---

*Futuras Líneas de Investigación*



## FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

La estandarización del uso de los materiales reciclados se considera la mejor forma de potenciar el desarrollo de un mercado de desechos potencialmente reciclables. La Unión Europea promueve planes para la promoción de la economía circular y la valorización de los desechos como uno de los principales puntos del “*European Green Deal*” (87).

Por otro lado, tras el análisis de desechos post-industriales, una futura investigación incluiría en este análisis los desechos de origen post-consumo y cómo garantizar la identificación y separación adecuada para asegurar el cumplimiento de la legislación europea de presencia de materiales prohibidos. La correcta identificación de las materias primas permitiría además mantener cierta estabilidad en las propiedades mecánicas del material resultante. Este paso supondría el gran paso de la economía circular al abrir la puerta a una segunda vida de los materiales sin grandes costes económicos.

También queda abierto un análisis de un bucle cerrado de gestión de residuos, en los que se reutilizarían los desechos generados en productos similares en un escenario de Economía Circular. El transporte de aparatos o productos a centros especializados tras su fin de vida permite el aprovechamiento de los componentes recuperados con garantías de trazabilidad de materiales. Se ha de estudiar el impacto económico y las posibilidades reales de la reutilización del resultante del proceso de separación. Esto, además, ha de ir acompañado de una mayor aplicación de los principios del Ecodiseño, que facilitan la separación e identificación de los materiales, además de limitar la cantidad de materias primas diferentes utilizadas en un mismo producto.

El análisis de la viabilidad de la utilización de materiales reciclados puede extenderse a otros productos del sector de los electrodomésticos. El aprovechamiento de las sinergias generadas tras la introducción en encimeras de inducción es clave para generar un mayor consumo de estos materiales en el sector.

El análisis de mezclas de materiales vírgenes y reciclados puede ser una vía de reducción de impacto ambiental. Esta futura línea de investigación incluye en análisis de la mezcla de diferentes porcentajes de ambas materias primas para analizar el impacto ambiental del material resultante y la pérdida de propiedades físicas del mismo.

Tras la evaluación del impacto ambiental resultante de la mezcla de materiales vírgenes y reciclados se puede ponderar el resultado en propiedades mecánicas de los materiales obtenidos.

El rediseño de componentes con mayor sollicitación mecánica debido a la pérdida de propiedades del material reciclado puede ser estudiado teniendo en cuenta también el impacto ambiental resultante de esas mezclas. Se deberá valorar la relación entre la pérdida de propiedades y el ahorro de impacto ambiental ante diferentes porcentajes de mezcla de material virgen y reciclado.

Queda abierta la introducción de la variante económica a dicha ponderación, teniendo en cuenta los ahorros obtenidos de la utilización de materiales reciclados y la disminución de impacto ambiental, por un lado, y la disminución de propiedades mecánicas en el contrario.

En base al movimiento global de descarbonización y de reducción del impacto ambiental, se puede analizar el uso de nuevos materiales reciclados en embalajes. La metodología definida puede extrapolarse a plásticos de uso industrial o de embalajes de EPS.

Es probable que el EPS reciclado sufra alteraciones en sus propiedades mecánicas. Así pues, se deberá caracterizar la resistencia al impacto y absorción de esfuerzos para validar su uso e introducción en componentes comerciales.

Dentro de las encimeras de inducción, existen materiales plásticos con requerimientos muy elevados de temperatura. El PPS, utilizado como soporte para el hilo de cobre en los inductores, está expuesto a elevadas temperaturas durante su fase de uso. Su elevado coste hace que sea interesante analizar las

propiedades mecánicas y térmicas de materiales procedentes de procesos de reciclaje. Para este material, la metodología definida en esta tesis para un análisis reológico y dimensional puede llevarse a cabo sin diferencias. Sería interesante conocer la influencia de un mayor porcentaje de carga, que en este caso es de un 65%. De cara a asegurar la trazabilidad de la materia prima, se podría estudiar un sistema de recuperación de material en bucle cerrado para reaprovechar el fin de vida de aparatos obsoletos.

Dentro de los materiales plásticos con elevados requerimientos mecánicos en encimeras de inducción se encuadra la PA6.6. Una futura línea de investigación será la búsqueda de materiales de fuentes recicladas con una trazabilidad adecuada con el fin de establecer una fuente de suministro. En el caso de este material se analizará de forma comparativa la resistencia a fatiga de materiales vírgenes y reciclados. Algunas geometrías definidas en este material están sometidas a *creep* o fluencia a temperatura. Este fenómeno debería estudiarse para validar el comportamiento del material reciclado.

Existen pequeños elementos comerciales con bajos o nulos requerimientos mecánicos cuyos componentes podrían sustituirse por materiales reciclados sin riesgo. Es el caso de la carcasa y rodete del ventilador empleado en cocinas de inducción. En este caso, ambos se fabrican en PBT y su sustitución por materiales reciclados supondría una mejora sencilla a la vez que efectiva.

Recientemente se está desarrollando la tecnología de reciclaje químico, que propone mejoras significativas con respecto al tradicional reciclaje mecánico con respecto a la necesidad de la separación de materiales. Se deberá realizar un análisis minucioso para establecer el impacto ambiental de esta tecnología con respecto a las existentes. Este análisis permitirá tomar las decisiones necesarias sobre la idoneidad del uso de una u otra tecnología.

---

# *Capítulo 9*

---

## *Bibliografía*



## BIBLIOGRAFÍA

1. **Plastics Europe.** *Plastics. The Facts 2020.* [En línea] ([https://www.plasticseurope.org/application/files/5716/0752/4286/AF\\_Plastics\\_the\\_facts-WEB-2020-ING\\_FINAL.pdf](https://www.plasticseurope.org/application/files/5716/0752/4286/AF_Plastics_the_facts-WEB-2020-ING_FINAL.pdf)).
2. **International Organization for Standardization.** (14040:2006) *Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework.* Geneve, Switzerland : s.n., 2006.
3. —. 14044: 2006 *Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines.* Geneve, Switzerland : s.n., 2006.
4. *Using LCA to assess eco-design in the automotive sector: Case study of a polyolefinic door panel.* **Muñoz, I., et al. s.l. :** 323-334, s.l. : International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, Vol. 11(5).
5. *Life cycle assessment of a domestic induction hob: electronic boards.* **Daniel Elduque, Carlos Javierre, Carmelo Pina, Eduardo Martínez, Emilio Jiménez.** 74-84, s.l. : Journal of Cleaner Production, Vol. 76.
6. *Assessing the sustainability of emerging technologies: A probabilistic LCA method applied to advanced photovoltaics.* **Blanco, Carlos F., y otros.** 120968, s.l. : Journal of Cleaner Production, 2020, Vol. 259.
7. **Simapro.** *Simapro. LCA software for fact-based sustainability.* [En línea] 04 de 03 de 2021. <https://simapro.com/>.
8. *Environmental life cycle assessment of polypropylene made from used cooking oil.* **Christian Moretti, Martin Junginger, Li Shen.** 104750, s.l. : Resources, Conservation & Recycling, 2020, Vol. 157.
9. *Life cycle assessment of emerging environmental technologies in the early stage of development: A case study on nanostructured materials.* **Bartolozzi, I, y otros.** 1, s.l. : JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY, 2020, Vol. 24.
10. *LCA Case Study to LED Outdoor Luminaries as a Circular Economy Solution to Local Scale.* **Lozano-Miralles, J. A., y otros.** 190, s.l. : SUSTAINABILITY, 2020, Vol. 12.
11. *A life cycle model for high-speed rail infrastructure: environmental inventories and assessment of the Tours-Bordeaux railway in France.* **Anne de Bortoli, Lina Bouhaya, Adelaide Feraille.** 814-830, s.l. : The International Journal of Life Cycle Assessment, 2020, Vol. 25.
12. *Sustainable Machining of Hardened Inconel 718: A Comparative Study.* **Halim, NHA, Haron, CHC y Ghani, JA.** s.l. : INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING, 2020. 10.1007/s12541-020-00332-w.
13. *A process-oriented life-cycle assessment (LCA) model for environmental and resource-related technologies (EASETECH).* **Concetta Lodato, Davide Tonini, Anders Damgaard, Thomas Fruergaard Astrup.** 73-88, s.l. : The International Journal of Life Cycle Assessment, 2020, Vol. 25.
14. **Ecoinvent.** *Ecoinvent. Mission & Vision.* [En línea] [Citado el: ] <https://www.ecoinvent.org/about/mission-and-vision/mission-and-vision.html>.
15. **PRé Sustainability.** *Articles. ReCiPe.* [En línea] 2016. <https://pre-sustainability.com/articles/recipe/>.
16. **Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.) (2018).** *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* s.l. : IPCC, 2018.

17. *IAMs, Projection of National Carbon Footprint in Japan with Integration of LCA and.* **Ichisugi, Y, y otros.** 6875, s.l. : SUSTAINABILITY, 2019, Vol. 11.
18. *Polypropylene/thermoplastic polyurethane blends: mechanical characterizations, recyclability and sustainable development of thermoplastic materials.* **Ting An Lin, Jia-Horng Lin, Limin Bao.** 5304-5312, s.l. : Journal of Materials Research and Technology, 2020, Vol. 9.
19. *A. Morphology, dimensional stability and mechanical properties of polypropylene–wood flour composites with and without nanoclay.* **Khanjanzadeh, H., Tabarsa, T. y Shakeri.** 341-350. , s.l. : J. Reinf. Plat. Compos, 2017, Vol. 31(5). doi.org/10.1177/0731684412438793.
20. *Mechanical Properties and Dimensional Stabilities of Wood-Polypropylene Composites Prepared using Mechanochemically Acetylated Japanese Cedar (Cryptomeria japonica) Wood Meal.* **Norihisa, K., Katsuhiko, T. y Yasujo, K.** 3825-3839., s.l. : Bioresourc, 2016, Vol. 11(2). DOI:10.15376/biores.11.2.3825-3839..
21. **Etsidi Design.** ASOCIACIÓN DE ALUMNOS DE DISEÑO ETSIDI DESIGN. [En línea] <http://etsididesign.com/disenio-industrial-clave-la-economia-circular/>.
22. **Ellen MacArthur Foundation and McKinsey & Company.** *Towards the Circular Economy: Accelerating the scale-up across global supply chains.* Ginebra (Suiza) : World Economic Forum, 2014.
23. **Ellen MacArthur Foundation.** *Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition.* Cowes (Reino Unido) : s.n., 2015.
24. **Comisión Europea.** *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, Hacia una economía circular: un programa de cero residuos para Europa.* Bruselas (Bélgica) : Comisión Europea, 2014.
25. *Improving the production chain with LCA and eco-design: application to cosmetic packaging.* **Didem Civancik-Uslu, Rita Puig, Stephan Voigt, Dieter Walter, Pere Fullana-i-Palmer.** 104475, s.l. : Resources, Conservation and Recycling, 2019, Vol. 151.
26. *Sustainable Manufacturing and Design: Concepts, Practices and Needs.* **Rosen, Marc A and Kishawy, Hossam A.** 154-174,, s.l. : Sustainability, 2012, Vol. 4.
27. *Integrating Robust Design Criteria and Axiomatic Design Principles to Support Sustainable Product Development.* **Kuo, TC y Wang, CJ.** 549-557, s.l. : INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING-GREEN TECHNOLOGY, 2019, Vol. 6.
28. **AENOR.** *ISO 14001:2015 Sistema de gestión ambiental.* 2015.
29. **Comisión Europea.** *Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.* 2008.
30. —. *Directiva (UE) 2018/851 del Parlamento Europeo y del consejo del 30 de mayo de 2018 por la que se modifica la Directiva 2008/98/CE sobre los residuos.* s.l. : Diario Oficial de la Unión Europea, 2018.
31. *Assessing the recycling potential of “unregulated” e-waste in Australia.* **Md Tasbirul Islam, Nazmul Huda.** 104526, s.l. : Resources, Conservation and Recycling, 2020, Vol. 152.
32. **Council of the EU.** *Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) .* s.l. : Official Journal of the European Union, EU Publications Office, 2003.
33. *A Study on Disassemblability and Feasibility of Component Reuse of Mobile Phones.* **H. Sawanishi, K. Torihara y N. Mishima.** 740-745, s.l. : Procedia CIRP, 2015, Vol. 26.

34. *Trends and Research Challenges in Remanufacturing*. **M. Marsumoto, S. Yang, K. Martinsen y Y. Kainuma**,. 129-142, s.l. : International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-green Technology, 2016, Vol. 3.
35. **European Parliament**. *Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)*. s.l. : Official Journal of the European Union, 2012.
36. *Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 Establishing a Framework for the Setting of Ecodesign Requirements for Energy-Related Products*. **European Parliament**. Luxembourg : Official Journal of the European Union, EU Publications Office, 2009.
37. **Comisión Europea**. *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones, Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular*. Bruselas (Bélgica) : Boletín Oficial de la Unión Europea, 2015.
38. —. *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones sobre Una estrategia europea para el plástico en una economía circular*. Bruselas (Bélgica) : Comisión Europea, 2018.
39. *1907/2006 Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH)*. **European Parliament**. Brussels : s.n., 2006.
40. **European Parliament**. *Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS)*. Luxembourg : EU Publications Office, 2003.
41. —. *Directive 2011/65/EU Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment*. Luxembourg : Official Journal of the European Union,, 2011.
42. **European Commission**. *Methodology for establishing the EU list of critical raw materials. Guidelines*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2017.
43. *Eco-efficiency gains from remanufacturing: A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia*. **Kerr, W., Ryan, C.** 75-81, s.l. : J. Cleaner Prod, 2001, Vol. 9.
44. *Recognising waste use potential to achieve a circular economy*. **van Ewijk, S y Stegemann, J. A.** 1-7, s.l. : WASTE MANAGEMENT, 2020, Vol. 105.
45. *Environmental Benefits of Engine Remanufacture in China's Circular Economy Development*. **Peng, S. T., y otros.** 19, s.l. : ENVIRONMENTAL SCIENCE & TECHNOLOGY, 2019, Vol. 53.
46. *Barriers and challenges to plastics valorisation in the context of a circular economy: Case studies from Italy*. **Angelo Paletta, Walter Leal Filho, Abdul-Lateef Balogun, Eleonora Foschi, Alessandra Bonoli.** 118149, s.l. : Journal of Cleaner Production, 2019, Vol. 241.
47. *Nueva propuesta de concepto de arquitectura mecánica para encimeras de inducción. Modelado y simulación del impacto ambiental*. **José Eduardo Galve, Carmelo Pina, Daniel Elduque, Rafael Tobajas, Carlos Javierre.** Tudela : III Simposio Internacional de Modelado y Simulación del Comité Español de Automática, 2016.
48. *Applying Interactive Genetic Algorithms to Disassembly Sequence Planning*. **Lee, SC, y otros.** 663-679, s.l. : INTERNATIONAL JOURNAL OF PRECISION ENGINEERING AND MANUFACTURING, 2020, Vol. 21.
49. *Advancing to a Circular Economy: three essential ingredients for a comprehensive policy mix*. **Leonidas Milios.** 861-878, s.l. : Sustainability Science, 2017, Vol. 13.

50. *Sustainability Impact Assessment of Increased Plastic Recycling and Future Pathways of Plastic Waste Management in Sweden*. **Leonidas Milios, Aida Esmailzadeh Davani and Yi Yu**. s.l. : Recycling, 2018, Vol. 33.
51. *Centrifugally Spun Recycled PET: Processing and Characterization*. **Vo, P.P., y otros**. 680, s.l. : Polymers , 2018, Vol. 10.
52. *PET bottles recycling in China: An LCA coupled with LCC case study of blanket production made of waste PET bottles*. **Zhang, Ruirui, y otros**. 110062, s.l. : Journal of Environmental Management, 2020, Vol. 260.
53. *Assessment of urban product consumption and relevant waste management*. **Singran, N**. s.l. : JOURNAL OF MATERIAL CYCLES AND WASTE MANAGEMENT, 2020.
54. *A Critical Review of Research on Reuse of Mechanically Recycled FRP Production and End-of-Life Waste for Construction*. **Yazdanbakhsh, A. y Bank, L.C.**. 1810-1826., s.l. : Polymers, 2014, Vol. 6.
55. *Environmental and economic assessment of a roadsafety product made with virgin and recycled HDPE: A comparative study*. **Simões, C., Costa Pinto, L. y Bernardo, C**. 209-215, s.l. : J Environ Manag, 2013, Vol. 114. doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.10.001.
56. *Recycling potential of post-consumer plastic packaging waste in Finland*. **Helena Dahlbo, Valeria Poliakova, Ville Mylläri, Olli Sahimaa, Reetta Anderson**. 52-61, s.l. : Waste Management, 2018, Vol. 71.
57. *Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste*. **Sofie Huysman, Jonas De Schaepmeester, Kim Ragaert, Jo Dewulf, Steven De Meester**. 46-54, s.l. : Resources, Conservation and Recycling, 2017, Vol. 120.
58. *The Effect of Different Compatibilizers on the Properties of a Post-Industrial PC/PET Blend*. **Dal Lago, E., y otros**. 49, s.l. : Materials, 2019, Vol. 12.
59. *Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP)*. **Achilias, D., y otros**. 536-542, s.l. : J. Hazard. Mater., 2007, Vol. 149. DOI:10.1016/j.jhazmat.2007.06.076..
60. **European Commission**. *A European Strategy for Plastics in a Circular Economy*. Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2018.
61. *Life Cycle Assessment of a Plastic Part Injected with Recycled Polypropylene. A Comparison with Alternative Virgin Materials*. **José Eduardo Galve, Daniel Elduque, Carmelo Pina and Carlos Javierre**. s.l. : International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2021.
62. **Dal Toso, Massimo y Dal Toso, Mattia**. *Process for recovering plastic material and related plant*. WO/2020/115335 Italy, 11 de 06 de 2020. PCT.
63. *Ecodesign of personal computers: an analysis of the potentials of material efficiency options*. **Tecchio, Paolo, y otros**. 2018, 25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE) Conference, 30 April - 2 May 2018, Copenhagen, Denmark, Vol. 69, págs. 716-721.
64. *Circular economy: To be or not to be in a closed product loop? A Life Cycle Assessment of aluminium cans with inclusion of alloying elements*. **Niero, Monia y Olsen, Stig Irving**. 2016, Resources, Conservation and Recycling, Vol. 114, págs. 18-31.
65. *A Study on Disassemblability and Feasibility of Component Reuse of Mobile Phones*. **Sawanishi, Hideyuki, Torihara, Kenta y Mishima, Nozomu**. 2015, Procedia CIRP , Vol. 26, págs. 740-745.
66. *Green supply chain management, environmental collaboration and sustainability performance*. **Chin, T.A., Tat, H.H. y Sulaiman, Z**. 695-699, s.l. : Int. J. Oper. Prod. Manag, 2015, Vol. 26.
67. *Using emission functions in modeling environmentally sustainable traffic assignment policies*. **Kolak, O.I., y otros**. 341-363, s.l. : J. Ind. Manag. Optim, 2013, Vol. 9.

68. *Sustainable Supply Chain Management: The Influence of Disposal Scenarios on the Environmental Impact of a 2400 L Waste Container*. **José Eduardo Galve, Daniel Elduque, Carmelo Pina and Carlos Javierre**. s.l. : Sustainability, 2016.
69. *Sustainable packaging design: A holistic methodology for packaging design*. **Svanes, E., y otros**. 161-175, s.l. : Packag. Technol. Sci., 2010, Vol. 23.
70. *Practical Eco-Design and Eco-Innovation of Consumer Electronics—the Case of Mobile Phones*. **Andrae, A., y otros**. 3, s.l. : Challenges, 2016, Vol. 7.
71. *Developing environmentally sustainable logistics Exploring themes and challenges from a logistics service providers' perspective*. **Abbasi, M. y Nilsson, F.** 273–283., s.l. : Transport Res. Part D-Transport Environ., 2016, Vol. 46.
72. *“Packaging Logistics” for improving performance in supply chains: The role of meta-standards implementation*. **García-Arca, J., Gonzalez-Portela Garrido, A.T. y Prado-Prado, J.C.** s.l. : Production, 2016. doi:10.1590/0103-6513.184114..
73. *Logistics-driven packaging innovation: A case study at IKEA*. **Hellström, D. y Nilsson, F.** 638–657., s.l. : Int. J. Retail Distrib. Manag, 2011, Vol. 39.
74. *Processability Analysis of an Injected Part in Virgin or Recycled Polypropylene*. **José Galve, Daniel Elduque, Carmelo Pina, Isabel Clavería, Carlos Javierre**. Budapest : EMSS, 2018. THE 30TH EUROPEAN MODELING & SIMULATION SYMPOSIUM.
75. *Pressure Analysis of Dynamic Injection Molding and Process Parameter Optimization for Reducing Warpage of Injection Molded Products*. **Wang, X., y otros**. 85, s.l. : Polymers, 2017, Vol. 9 (3). doi.org/10.3390/polym9030085.
76. *Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts*. **Liao, S.J., y otros**. 917-928. , s.l. : Polym. Eng. Sci, 2004, Vol. 44(5). doi.org/10.1002/pen.20083.
77. *Semiempirical approach to predict shrinkage and warpage of fiber-reinforced polymers using measured material properties in finite element model*. **Umesh, G., Song, Y.Y. y Mandapati, R.** 1303-1319, s.l. : J. Thermoplast. Comp. Mater., 2017, Vol. 30(9). <https://doi.org/10.1177/0892705715618744>.
78. *Morphology, dimensional stability and mechanical properties of polypropylene–wood flour composites with and without nanoclay*. **Khanjanzadeh, H., Tabarsa, T. y Shakeri, A.** 341-350, s.l. : J. Reinf. Plat. Compos, 2017, Vol. 31(5). doi.org/10.1177/0731684412438793.
79. *Mechanical and dimensional characterisation of polypropylene injection moulded parts in epoxy resin/aluminium inserts for rapid tooling*. **De Carvalho, A., Fagali, A. y Leite, J.L.** 37-52, s.l. : Int. J. Mater. Product. Tech, 2016, Vol. 52(1/2). DOI:10.1504/IJMPT.2016.073618.
80. *Mechanical Properties and Dimensional Stabilities of Wood-Polypropylene Composites Prepared using Mechanochemically Acetylated Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica*)*. **Norihisa, K., Katsuhiko, T. y Yasujo, K.** 3825-3839, s.l. : Wood Meal. Bioresources, 2016, Vol. 11(2). DOI:10.15376/biores.11.2.3825-3839.
81. *A method to improve dimensional accuracy and mechanical properties of injection molded polypropylene parts*. **Li, S., Zhao, G. y Wang, J.** 323-334, s.l. : J. Polym. Eng, 2017, Vol. 37(4). doi.org/10.1515/polymeng-2015-0526.
82. *Methodology in gas assisted injection Molding*. **Castany, F.J., y otros**. 214-218, s.l. : J. Mater. Process. Tech. , 2003, Vols. 143-144. doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00426-6.
83. *Dimensional Stability and Process Capability of an Industrial Component Injected with Recycled Polypropylene*. **José Eduardo Galve, Daniel Elduque, Carmelo Pina, Isabel Clavería, Raquel Acero, Ángel Fernández and Carlos Javierre**. 6, s.l. : Polymers, 2019, Vol. 11.

84. *The influence of environmental conditions on the dimensional stability of components injected with PA6 and PA66.* **Claveria, I, y otros.** 15, s.l. : Polym. Test., 2016, Vol. 50. dx.doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.12.008.

85. *Residual stresses determination in injection molded virgin and recycled HDPE blends: mechanical properties and morphology.* . **Altan, M, Yurci, M. E. y Nugay, M.** 170, s.l. : E-polym, 2008, Vol. 8(1). <https://doi.org/10.1515/epoly.2008.8.1.1937>.

86. **Galve Villa, José Eduardo, y otros.** *HOB APPARATUS.* EP3679304A1 WO, 14 de 03 de 2019.

87. **European Commission.** *The European Green Deal.* Brussels : Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions, 2019.

88. **Consortio Nacional de Industriales del Caucho, con la colaboración de la Fundación Biodiversidad del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.** *Guía de aplicación del cálculo de huella de carbono y el análisis de ciclo de vida para la industria del caucho.* 2014.

89. **Cicloplast.** *Cifras y datos clave de los plásticos y su reciclado en España.* 2017.

---

# *Capítulo 10*

---

## *Publicaciones*



## PUBLICACIONES

Sustainable Supply Chain Management: The Influence of Disposal Scenarios on the Environmental Impact of a 2400 L Waste Container.

- Revista: Sustainability
- Año de publicación: 2016
- Factor de Impacto: 1.789
- Categoría: Q2, 47/105 Environmental Studies
- Contribución del doctorando: Revisión del estado del arte. Análisis del impacto ambiental de los escenarios definidos mediante el software EDT. Redacción del artículo en inglés.

Processability Analysis of an Injected Part in Virgin or Recycled Polypropylene.

- Congreso: 30th European Modelling and Simulation Symposium, EMSS 2018
- Año de publicación: 2018
- Factor de Impacto: Publicación en *Proceedings* del congreso, publicado en *Scopus*. No se clasifica como revista indexada
- Contribución del doctorando: Revisión del estado del arte. Obtención de muestras de materiales y análisis de la viscosidad. Evaluación de los resultados de la simulación. Redacción del artículo en inglés.

Dimensional Stability and Process Capability of an Industrial Component Injected with Recycled Polypropylene.

- Revista: Polymers
- Año de publicación: 2019
- Factor de Impacto: 3.426
- Categoría: Q1, 16/89 Polymer Science
- Contribución del doctorando: Revisión del estado del arte. Definición de las dimensiones, obtención y análisis y de las muestras analizadas con material virgen y reciclado. Definición de los ensayos térmicos realizados sobre las muestras. Cálculo de la variación dimensional de las muestras. Redacción del artículo en inglés.

Life Cycle Assessment of a Plastic Part Injected with Recycled Polypropylene. A Comparison with Alternative Virgin Materials

- Revista: International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology
- Año de publicación: 2021
- Factor de Impacto: 5.671
- Categoría: Q1-D1, 9/135 Mechanical Engineering.
- Contribución del doctorando: Revisión del estado del arte. Búsqueda, identificación y validación del material reciclado. Análisis del proceso de fabricación del material reciclado. Análisis del proceso de inyección del material y las muestras analizadas. Cálculo del impacto ambiental de las muestras en material virgen y reciclado. Redacción del artículo en inglés.



## Sustainability: Sustainable Supply Chain Management: The Influence of Disposal Scenarios on the Environmental Impact of a 2400 L Waste Container



Article

### Sustainable Supply Chain Management: The Influence of Disposal Scenarios on the Environmental Impact of a 2400 L Waste Container

José Eduardo Galve <sup>1</sup>, Daniel Elduque <sup>2\*</sup>, Carmelo Pina <sup>1</sup> and Carlos Javierre <sup>2</sup>

<sup>1</sup> BSH Electrodomésticos España S.A.; Avda. de la Industria, 49, Zaragoza 50016, Spain; jose.galve@bshg.com (J.E.G.); carmelo.pina@bshg.com (C.P.)

<sup>2</sup> i+(i3A), Department of Mechanical Engineering, University of Zaragoza; C/María de Luna, 3, Zaragoza 50018, Spain; delduque@unizar.es (D.E.); carlos.javierre@unizar.es (C.J.)

\* Correspondence: delduque@unizar.es; Tel.: +34-876-555-211; Fax: +34-976-761-861

Academic Editor: Young Hae Lee

Received: 24 April 2016; Accepted: 12 June 2016; Published: 17 June 2016

**Abstract:** This paper analyzes the influence of the supply chain management on the environmental impact of a 2400 L waste disposal container used in most cities of Spain. The studied functional unit, a waste disposal container, made up mostly of plastic materials and a metallic structure, and manufactured in Madrid (Spain), is distributed to several cities at an average distance of 392 km. A life cycle assessment of four different scenarios (SC) has been calculated with the software EcoTool v4.0 (version 4.0; i+: Zaragoza, Spain, 2015) and using Ecoinvent v3.0 database (version 3.0; Swiss Centre for Life Cycle Inventories: St. Gallen, Switzerland, 2013). The environmental impact has been characterized with two different methodologies, recipe and carbon footprint. In order to reduce the environmental impact, several end of life scenarios have been performed, analyzing the influence of the supply chain on a closed-looped system that increases recycling. Closed loop management of the waste and reuse of parts allows companies to stop selling products and start selling the service that their products give to the consumers.

**Keywords:** environmental impact; supply chain; service; LCA; end of life scenarios; closed loop; plastic recycling

#### 1. Introduction

The analysis of different supply chain scenarios in order to increase competitive advantages of companies is currently an important research topic. A wide range of authors have analyzed how decisions related to supply chain management, such as returns policies, affect companies [1].

In the recent years, both supply chain and sustainability have raised a significant interest. Sustainable transport has a relevant issue: environmental impact [2]. The environmental impact of the supply chain is highly influenced by vehicle technology and operational decisions [3,4]. The relationships between supply chain decisions and environmental impact have been studied due the relevance of transport systems in sustainable development strategies, such as traffic policies [5], green innovation [6], or life cycle assessment (LCA) [7–9].

The topic of green supply chain management aims to integrate environmental concepts in supply chain management, reducing emissions, wastage and other forms of industrial pollution [2,10,11]. Several authors have researched on the relationships between the environmental impact of logistics, the product and the packaging. Supply chains are complex network where, for some products, factors like the packaging [12], not only have a logistic role and influence on the effectiveness and efficiency of the supply chain [13], but may also have significant marketing and environmental influence [14].

Packaging has huge relevance in the retail supply chain, as shown in the literature in case studies from the consumer electronic goods industry [15] to large retail companies [16] or smaller food retail companies [17,18]. Several companies are implementing sustainable logistics to increase their supply chain competitiveness [19–21]. According to Leigh and Li, in order to develop environmental sustainable supply chains, approaches such as ecodesign, recycling, reuse or remanufacturing can be used [22–24].

LCA has become a very useful tool to study the impact of a product, a production process or a service throughout its entire lifespan. Results of these assessments can be used to establish, in a scientific way, the most critical aspects affecting the environmental impact of a wide range of products or services, like wind turbines [25], induction hobs [26,27], plastic recycling [28] or waste management [29].

In the study of a manufactured product, the impact will change depending on the materials and processes selected by the designers, transportations selected by supply chain managers, *etc.* [30]. This is the reason why LCA is being more often used during the early stages of a product's life cycle [31–33]. LCA focuses on the environmental pillar of sustainability [34]. The design methodology that includes the environmental factor is known as "ecodesign", and implies having into account the impact of each possible material, process used for the manufacturing [35], transportations and end of life scenarios. The designer will have to evaluate the environmental impact of raw materials, processes, transportations and weights as extra variables to the equations of the design process. At the same time, the logistic studies must have into account the impact due to the transportation chosen for both raw materials from the provider to the manufacturing site, the final product from the manufacturing site to the place in which it will be used, and also the recovery of the product if a closed loop supply chain network is used [36]. This strategy is one of the main opportunities of research in this field, as it can be applied to a wide range of industries [37] and contributes to achieve more eco-efficient production systems [36,38]. Closed loop supply chain can be used to create product service supply chains, including the return or disposal of the goods [38,39].

This closed loop strategies can be enhance with the use of emerging technologies such as RFID (Radio Frequency IDentification) tags enable producers to properly control the whole life cycle of a product, as they can be used to have item-level information visibility and instantaneous tracking during the manufacturing process, and also, years after, be used again in a recycling/remanufacturing scenario [40].

The aim of this paper is to analyze, from the environmental point of view, the life cycle of a large waste disposal container of 2400 L capacity (Figure 1), and the influence on the environment of supply chain management decisions by evaluating different disposal scenarios. We will also study how a closed loop system helps to reduce environmental impact by reusing or recycling some parts, or even the whole container. The effect of each disposal scenario given to the unit after the end of its service period will be studied in order to calculate the environmental impact and extract conclusions over the different decisions made during the supply chain management [41]. For this, four different scenarios will be proposed to see the differences and singularities amongst them.

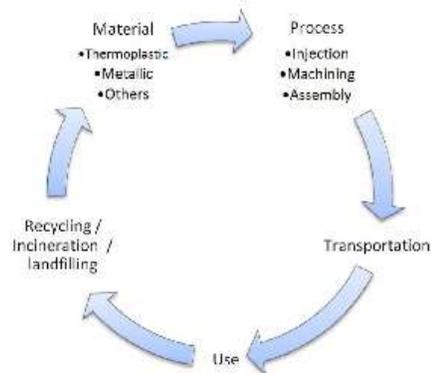


Figure 1. Life cycle.

## 2. Materials and Methodology

### 2.1. Product under Study

In this paper, a waste disposal container is going to be analyzed. The concept of waste disposal containers has varied through the time from small-sized metallic containers to bigger and more complex units combining metallic parts with advantages regarding costs and processability thanks to the use of plastic material. The manufacture of these plastic parts can be done well by injection molding, or by rotational molding [42]. Injection is a high pressure process, which is more stable and precise. It allows us to obtain great benefits regarding process stability and cost in high volume series. On the other hand, rotational molding is a slower low-pressure process with which the dimensional tolerances that are achieved are poorer. This study focuses on a large waste container of 2400 L which is widely used in Spain. There are several types of containers that are used in waste collection systems and they are usually made out of HDPE (High Density PolyEthylene), fiberglass or steel, with volumes ranging from 60 to 3200 L [29,43]. One of the main targets of the design process of this waste container was to reduce the environmental impact, not only by considering the product but the whole life cycle. In order to do that, several strategies were used, such as minimizing as much as possible the use of metallic materials, which, compared to the plastic parts, are heavier and less flexible to the design, or optimizing the shape by modifying draft angles to increase the stackability of the containers and therefore the number of units that fit into a truck. Thanks to this stackability, there is no need for primary packaging to be transported. FEM (Finite Element Method) analysis was used to determine the optimal thickness to withstand all the requirements and at the same time reduce the amount of raw material consumption [42]. The weight will directly affect the environmental impact of the whole supply chain [19].

This product was also designed with the aim of reducing the number of different materials in order to simplify ulterior treatments. This facilitates and favors recycling or reusing processes. Also, unions between parts have been enhanced to ease disassembly and the stacking has been optimized to minimize the cost of the transportation to the end consumer and back to the manufacturer if a closed loop system is used. Selecting a single kind of thermoplastic material to the whole set favors both the cost and the separation and recycling of the elements after their usage period [44], optimizing the supply chain of the product.

The functional unit under study is a 2400 L waste disposal container used in most Spanish cities [42]. This waste disposal container comprises 37 different parts, which amount to a total number

of 179 components and a weight of 139 kg. Most of these components are made out of plastic, using mostly one single type (HDPE) for the main body and two upper lids (see Figure 2) or galvanized steel for the structural parts.



Figure 2. Waste disposal container.

Besides reducing the number of different raw materials used, a good definition of the unions and joints between different parts is also important. Separating the parts of an assembly is the previous step to re-using or recycling those components and must accrue as low costs as possible since it is a non-added value process.

A table with a simplified inventory is shown in order to provide better understanding of the paper and the functional unit under study (see Table 1). However, calculations were made with the full inventory of the waste container. Seventy seven percent of the overall weight of the container is HDPE.

Table 1. Simplified Inventory of a Waste Container.

Part	Material	Weight (kg)	Units	Total Weight (kg)
Body	HDPE	70.9	1	70.9
Lid	HDPE	7.5	2	15
Axle	Steel	7.1	1	7.1
Lateral Holder	HDPE	4.6	2	9.2
Lateral reinforcement	Steel	3.9	2	7.8
Pedal	Steel	2.2	1	2.2

## 2.2. System Boundaries

This study takes into account the whole life cycle of the product, including raw materials acquisition (HDPE, steel, etc.), raw material transportation, processing and manufacturing (such

as injection molding), distribution, use and end of life, considering in these last stages the waste container transportation and treatments. Depending on the studied scenario, the end of life configuration varies, and therefore, several logistic routes (to landfill, back to the manufacturer, *etc.*), transportations (truck, train) and waste treatments (land filling, recycling, reuse, *etc.*) are studied. It has been considered that the use phase does not generate impact because the waste container is maintenance-free.

In order to obtain results based on the real distribution and use of the container, transportation must be held into account and, as an average result from the manufacturer to the final user, 392 km of transportation will be used for the calculations. This distance is the average distance from Madrid to all cities with over 50,000 inhabitants in Spain. The same value is used for all studied scenarios and only the type of conveyance will differ to make the calculations totally comparable. The distance will refer to that travelled by the container already assembled from the manufacturing point to the city where its use phase will take place. The distance travelled by the plastic raw material is considered from its production place in Tarragona to the waste container manufacturer in Madrid (547 km), where as it was said, the material is transformed and the container is manufactured and assembled.

In all primary scenarios, we contemplated transportation in high load trucks (higher than 32 Tons according to Ecoinvent v3.0 database). In addition, in those scenarios where a closed loop supply chain system is analyzed, an inverse logistics process is necessary in order to take back the units to the manufacturing center. Therefore, this distance will be taken into account twice, considering the transportation back to the factory.

### 2.3. Methodology

This paper uses Recipe methodology, based on Ecoindicator99 and CML (Centrum voor Milieuwetenschappen) Leiden, to evaluate the impacts. Recipe combines midpoint and endpoint methodologies, making the results reliable and easier to comprehend. These 18 midpoint categories are calculated on the base of a cause-effect chain over the environment, which is weighted and later combined onto three endpoint categories. These three categories are: damage to human health, damage to ecosystems and damage to resource availability [45,46]. The calculation of each scenario of the unit under study will be carried out using the software EcoTool v4.0 [31]. This software collects data referred to as materials, processes, transports and all kind of transformations that might affect the environmental impact introduced by the user. These data feed from a database created starting from Ecoinvent v3.0 which is used by more than 6000 researchers using commercial life cycle assessment software [47]. Along with the study and because of its special relevance to the environment [48], a study on the unit carbon footprint is also carried out. This endpoint category has become of special importance of late with legal regulations controlling CO<sub>2</sub> emissions [49]. These results will also be calculated using the same tool.

### 2.4. Supply Chain Scenarios of the End of Life

The end of life is defined as the number of transformations or processes that the whole unit and each of its parts separately will be part of, once its use phase is finished. Each supply chain scenario has been defined with a set of transports necessary to carry out all stages explained. At first, all scenarios will be comparable using high load trucks. These main conveyances will be used for the long transports of raw material and finished product. Transports from usage point to treatment locations near the location for non-closed loop scenarios will be calculated with a medium load truck (from 16 to 32 Tons according to Ecoinvent v3.0 database). In order to have enough information to determine how each material affects the environment depending on the end of life defined, four cases have been studied. All these scenarios use data extracted from the Ecoinvent v3.0 Database and the background of recycling efficiencies of European waste treatment plants [50].

The different scenarios studied in this paper are:

- SC1: Landfilling.

- SC2: Standard recycling.
- SC3: Closed loop recycling of the thermoplastic parts.
- SC4: Closed loop with partial part reuse.

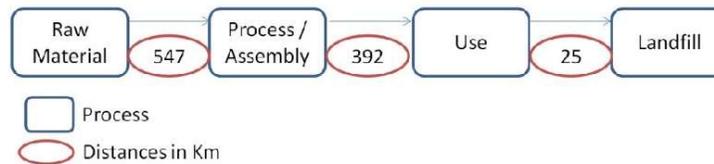
After studying SC1 to SC4 with road transportation, this last scenario will be recalculated replacing the transportation method chosen with freight rail conveyance to obtain SC4Train (Scenario 4 with Train) and compare the impact of the supply chain in the final product.

Over the same inventory, the end of life material management parameters are modified in order to be able to compare, when departing from a single place, the effects of each situation (see Table 2).

**Table 2.** End of life scenario definition.

	SC1	SC1	SC2	SC2	SC3	SC3	SC4	SC4
	HDPE	Steel	HDPE	Steel	HDPE	Steel	HDPE	Steel
Recycling	0%	0%	26.3%	94%	100%	94%	95%	25%
Landfill	100%	100%	38.1%	6%	0%	6%	0%	0%
Incineration	0%	0%	35.6%	0%	0%	0%	0%	0%
Reuse	0%	0%	0%	0%	0%	0%	5%	75%

The SC1 studies the effects of landfilling the whole container. In this case, the unit does not go through any transformation and is directly landfilled in a dumpster in an average distance of 25 km away from the point of use (Figure 3).



**Figure 3.** SC1 (Landfilling).

The SC2 calculates the environmental impact based in a standard recycling rate proposed by Plastics Europe [51], which gives data from the European plastic producers about waste management. This scenario combines different rates of landfilling, incineration and recycling depending on the material. Once the end of life of the product is reached, transportations to the waste treatment facility (25 km) will take place in a medium load capacity truck (Figure 4).

The SC3 comes after the problem observed in the previous situation. Thanks to being such a particular element, the 2400 L waste disposal container is managed wholly by the manufacturer. Once its use phase is over, it is recovered and processed along with other similar parts and never mixed with other elements. This implies a substantial increase in the supply chain complexity, but this problem can be overcome with the use of RFID tags to recover information about the life cycle (Figure 5).

Given the fact that material recovering and subsequent recycling is carried out in the original production center, it is possible to identify 100% of the parts but the transportations are doubled, and subsequently so is its impact. Therefore, for these SC3 thermoplastic materials, the recycling rate is 100%, as they are recycled for internal use in the company. For the rest of the metallic parts used in the whole set, recycling rates are maintained as used in scenario 2. In the study of this SC3, transportation is held into account not only from the starting point to the point of duty, but also the way back to the factory where the separation will take part as explained in the subsection 2.2 System boundaries.

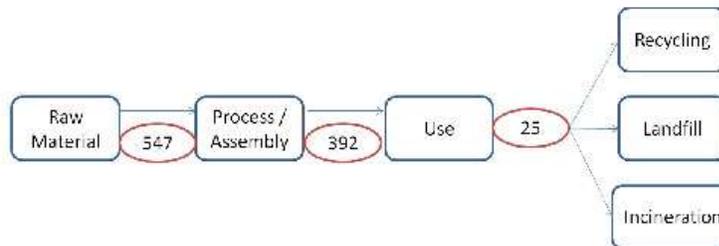


Figure 4. SC2 (Standard recycling).

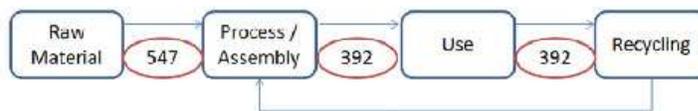


Figure 5. SC3 (Closed loop recycling of the thermoplastic parts).

Finally, the SC4 is a combination and extension of the previous closed loop philosophy. If in SC3 the exploitation of the thermoplastic materials is supposed, thanks to the supply chain management, then the next step is to present the direct reuse of some parts, subassemblies or even the whole container. This target requires once again the closed loop management of the containers once their use phase is at an end and their transportation to the manufacturing plant in Madrid. It is proposed, for SC4, that 5% of the containers are directly recovered for its reuse without any extra processes. Once disassembled, 70% of the metallic parts can be used once again. As for the rest of the parts and materials, they will all be recycled in the company (Figure 6).

The impact of the non-reutilized materials (95% of the whole) will be added to the end of life impact selected for this scenario. In this case, there is a recycling rate of 95% of the material with the addition of the impact generated by the milling process prior to the recycling. Later, the SC4 scenario is also calculated in SC4Train using railroad conveyance instead of traffic road to compare the direct impact of the transports.

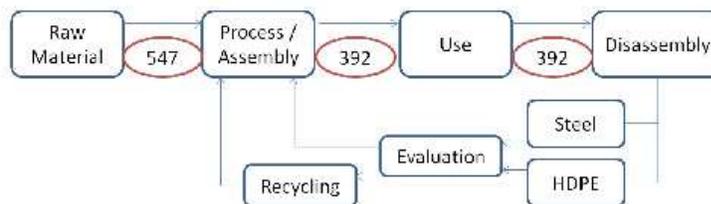


Figure 6. SC4 (Closed loop supply chain).

### 3. Results

Using the software EcoTool v4.0, calculation of the different scenarios applied to the full inventory of a 2400 L waste disposal container is done. First, the results for both Recipe and Carbon

Footprint are presented in Table 3 with the different assessed scenarios distributed in columns. All these results are calculated with the same transport method (truck) in order to make the four studies totally comparable between each other, from raw material to disposal. After that, the SC4Train scenario will be studied to analyze how the environmental impact can be further reduced using train instead of truck transportation.

**Table 3.** LCA Results of the analyzed scenarios.

Method	SC1	SC2	SC3	SC4
ReCiPe (Pt)	70.40	49.51	28.62	24.18
kg eq. CO <sub>2</sub>	490.5	467.0	257.0	241.5

Table 4 shows only the impact due to the supply chain of the of the end of life of the product. The results in SC1 and 2 are equal, and the same as SC3 and SC4 since they illustrate the difference between performing the treatment next to the using point, or transporting the product back to the manufacturing point.

**Table 4.** Disposal transportation results for the analyzed scenarios.

Method	SC1	SC2	SC3	SC4
ReCiPe (Pt)	3.745	3.745	5.911	5.911
kg eq. CO <sub>2</sub>	36.1	38.1	56.3	56.3

SC1 calculates the impact of the direct landfilling of the container. It is clearly the most harmful scenario. Although it requires minimum material management and transportations, it is environmentally the least interesting. Compared to the first one, SC2, which calculates the impact of the standard recycling rates described by Plastics Europe, offers significant profit regarding Recipe punctuation and adds the same low complexity to the supply chain.

SC3 offers a substantial enhancement despite increasing the supply chain. This happens thanks to the integral recovering and recycling process done by the producer. This result proves a reduction of 56% Recipe impact and near 64% in kg eq. CO<sub>2</sub> compared to SC2. SC4 offers the lowest results amongst all scenarios studied. In spite of having the same transports-related impacts, in this case, the global impact is reduced to a 66% cut in Recipe and 51% in kg eq. CO<sub>2</sub> compared to the first scenario. However, the necessity of a complex supply chain management increases. For the SC3 and SC4, the impact has also been calculated with transportations taking place on a freight train. Table 5 shows the impacts of all transportations (including raw materials). In the whole LCA of SC4Train the environmental impacts are decreased almost 15%. The overall impacts of SC4Train are 20.77 ReCiPe points and 209.4 kg eq. CO<sub>2</sub>.

**Table 5.** Supply chain environmental impacts comparison of scenario SC4 and SC4 train.

Method	SC4 Supply Chain Impact (truck)	SC4Train Supply Chain Impact
ReCiPe (Pt)	6.546	3.138
kg eq. CO <sub>2</sub>	62.4	30.3

#### 4. Conclusions

Observing these results, it can be stated that, from the environmental point of view, the end of life supply chain management of a product modifies greatly the impact generated.

Results have proven that the increase of impact due to the supply chain management in closed looped systems is compensated by the benefits that the supply chain creates, reducing the overall impact by allowing a better management of the disposed product.

The results claim that supply chain management is key to a reduction in the overall impact. In an undesirable scenario such as SC1, where the end of life is not carefully chosen, transports for the complete product are 5% in Recipe and 7.3% in carbon footprint. However, with all the manufacturing and recycling processes optimized, in SC4, transports are responsible for 24% Recipe and 23.3% carbon footprint (27% and 25.8% taking into account transports of the raw material), showing the importance of the supply chain in ecodesign products.

According to SC3, even with the increased supply chain related impact, it has proved beneficial regarding the whole environmental impact. This fact is conditioned to the usage of only one material in most of the parts, allowing a mistake-free material identification in order to maximize the recycling rates. This fact was pursued from the very starting point of the design process. It is proven that environmental aspects must be in sight from the first stages of the product development. This will help the choice between solutions that will affect later the life cycle analysis.

SC4 generated the best results in terms of environmental impact and when the change to freight rail transports were studied, significant reductions in the impact were proven. Recipe impact due to transportations was reduced by a 52.06% and 51.5% carbon footprint. This means that enhancing the end of life treatment, recycling ratios, *etc.*, must be accompanied by an adequate selection of the closed loop supply chain transportation methods.

It is hereby proven that, from the environmental point of view, the impact derived from the end of life management carried out of a 2400 L waste disposal container, is highly sensitive to the logistics chosen for its different stages. Closed loop management is desirable when possible since, despite the complexity added to the supply chain, it proves beneficial from the sustainability point of view and can be applied in a wide range of industries. Future lines of work include focusing on the other two pillars of sustainability (economic and social) to analyze the influence of these closed loop supply chain strategies.

**Acknowledgments:** The research in this paper has been developed by members of the I-AITIIP (DGA-T39) research group recognized by the Regional Government of Aragon (DGA) (FSE-EU).

**Author Contributions:** José Eduardo Galve is a Ph.D. student responsible for analyzing and calculating the different scenarios using the environmental assessment software EcoTool v4.0, all mentioned in collaboration with Daniel Elduque, a researcher in the field of environmental impact and codirector of the doctoral thesis. Carlos Javierre is codirector of the doctoral thesis and defined the scenarios with the first draft of the essay, reviewing and guiding the manuscript writing process. Carmelo Pina helped analyzing the scenarios and with its conclusions.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest.

## Abbreviations

The following abbreviations are used in this manuscript:

LCA: Life Cycle Assessment

SC: Scenario

EOL: End Of Life

RFID: Radio Frequency IDentification

HDPE: High Density Polyethylene

## References

1. Shi, J.; Xiao, T. Service investment and consumer returns policy in a vendor-managed inventory supply chain. *J. Inst. Manag. Optim.* **2015**, *11*, 439–459.
2. Chin, T.A.; Tat, H.H.; Sulaiman, Z. Green supply chain management, environmental collaboration and sustainability performance. *Int. J. Oper. Prod. Manag.* **2015**, *26*, 695–699.

3. Litman, T.; Burwell, D. Issues in sustainable transportation. *Int. J. Oper. Prod. Manag.* **2008**, *6*, 331–347.
4. Nguyen, L.; Cafferty, K.; Searcy, E.; Spatari, S. Uncertainties in life cycle greenhouse gas emissions from advanced biomass feedstock logistics supply chains in Kansas. *Energies* **2014**, *7*, 7125–7146.
5. Kolak, O.I.; Feyzioğlu, O.; Birbil, Ş.I.; Noyan, N.; Yalçındağ, S. Using emission functions in modeling environmentally sustainable traffic assignment policies. *J. Ind. Manag. Optim.* **2013**, *9*, 341–363.
6. Zailani, S.; Govindan, K.; Iranmanesh, M.; Shaharudin, M.R.; Chong, Y.S. Green innovation adoption in automotive supply chain: The Malaysian case. *J. Clean Prod.* **2015**, *108*, 1115–1122.
7. Marletto, G.; Sillig, C.T. Environmental impact of Italian canned tomato logistics: National vs. regional supply chains. *J. Transp. Geogr.* **2014**, *34*, 142–149.
8. Yazan, D.M.; Petruzelli, A.M. Analyzing the environmental impact of transportation in reengineered supply chains: A case study of a leather upholstery company. *Transport. Res.* **2011**, *16*, 335–340.
9. Accorsi, R.; Versari, L.; Manzini, R. Glass vs. plastic: Life cycle assessment of extra-virgin olive oil bottles across global supply chains. *Sustainability* **2015**, *7*, 2818–2840.
10. Longo, F. Sustainable supply chain design: An application example in local business retail. *Simulation* **2012**, *88*, 1484–1498.
11. Villanueva, R.; García, J.L.; Cortes, G.; Romero, J.; Jiménez, E.; Blanco, J. Impact of suppliers' green attributes in corporate image and financial profit: Case maquiladora industry. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.* **2015**, *80*, 1277–1296.
12. García-Arca, J.; Prado-Prado, J.C. Packaging design model from a supply chain approach. *Supply Chain Manag.* **2008**, *13*, 375–380.
13. Olander-Roese, M.; Nilsson, F. Competitive advantages through packaging design? prepositions for supply chain effectiveness and efficiency. In Proceedings of the International Conference on Engineering Design, ICED 2009, Stanford University, Stanford, CA, USA, 24–27 August 2009.
14. Jahre, M.; Hatteland, C.J. Packages and physical distribution—Implications for integration and standardization. *Int. J. Phys. Distrib. Logist Manag.* **2004**, *34*, 123–139.
15. Nilsson, F.; Fagerlund, M.; Körner, J. Globally standardised versus locally adapted packaging: A case study at Sony Ericsson Mobile Communications AB. *Int. J. Retail Distrib. Manag.* **2013**, *41*, 396–414.
16. Hellström, D.; Nilsson, F. Logistics-driven packaging innovation: A case study at IKEA. *Int. J. Retail Distrib. Manag.* **2011**, *39*, 638–657.
17. García-Arca, J.; Gonzalez-Portela Garrido, A.T.; Prado-Prado, J.C. “Packaging Logistics” for improving performance in supply chains: The role of meta-standards implementation. *Production* **2016**, doi:10.1590/0103-6513.184114.
18. García-Arca, J.; Prado-Prado, J.C.; Gonzalez-Portela Garrido, A.T. “Packaging logistics”: Promoting sustainable efficiency in supply chains, physical distribution—Implications for integration and standardization. *Int. J. Phys. Distrib. Logist Manag.* **2014**, *44*, 325–346.
19. Svanes, E.; Vold, M.; Møller, H.; Pettersen, M.K.; Larsen, H.; Hanssen, O.J. Sustainable packaging design: A holistic methodology for packaging design. *Packag. Technol. Sci.* **2010**, *23*, 161–175.
20. Abbasi, M.; Nilsson, F. Developing environmentally sustainable logistics Exploring themes and challenges from a logistics service providers' perspective. *Transport Res. Part D—Transport Environ.* **2016**, *46*, 273–283.
21. Abbasi, M.; Nilsson, F. Themes and challenges in making supply chains environmentally sustainable. *Supply Chain Manag.* **2012**, *17*, 517–530.
22. Andrae, A.; Xia, M.; Zhang, J.; Tang, X.T. Practical Eco-Design and Eco-Innovation of Consumer Electronics—the Case of Mobile Phones. *Challenges* **2016**, *7*, 3.
23. Leigh, M.; Li, X. Industrial ecology, industrial symbiosis and supply chain environmental sustainability: A case study of a large UK distributor. *J. Clean Prod.* **2015**, *106*, 632–643.
24. De Schepper, M.; van den Heede, P.; van Driessche, I.; de Belie, N. Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete. *Materials* **2014**, *7*, 6010–6027.
25. Martínez, E.; Sanz, F.; Pellegrini, S.; Jiménez, E.; Blanco, J. Life-cycle assessment of a 2-MW rated power wind turbine: CML method. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2008**, *14*, 52–63.
26. Pina, C.; Elduque, D.; Javierre, C.; Martínez, E.; Jiménez, E. Influence of mechanical design on the evolution of the environmental impact of an induction hob. *Int. J. Life Cycles Assess.* **2015**, *20*, 937–946.
27. Elduque, D.; Javierre, C.; Pina, C.; Martínez, E.; Jiménez, E. Life cycle assessment of a domestic induction hob: Electronic boards. *J. Clean Prod.* **2014**, *76*, 74–84.

28. Rajendran, S.; Hodzic, A.; Scelsi, L.; Hayes, S.; Scoutis, C.; AlMa'adeed, M.; Kahraman, R. Plastics recycling: Insights into life cycle impact assessment methods. *Plast Rubber Compos.* **2013**, *42*, 1–10.
29. Rives, J.; Rieradevall, J.; Gabarrell, X. LCA comparison of container systems in municipal solid waste management. *Waste Manag.* **2010**, *30*, 949–957.
30. Guinée, J.B. Handbook on Life Cycle Assessment Operational Guide to the ISO Standards. *Int. J. Life Cycle Assess.* **2013**, *7*, 311–313.
31. Camañes, V.; Elduque, D.; Javierre, C.; Fernández, Á. The influence of different recycling scenarios on the mechanical design of an LED weatherproof light fitting. *Materials* **2014**, *7*, 5769–5788.
32. Fernández, Á.; Javierre, C.; González, J.; Elduque, D.T. Development of thermoplastic material food packaging considering technical, economic and environmental criteria. *J. Biobased Mater. Bioenergy* **2013**, *7*, 176–183.
33. Kim, H.C.; Wallington, T.J. Plastics life-cycle energy and greenhouse gas emission benefits of lightweighting in automobiles: Review and harmonization. *Esthug* **2013**, *47*, 6089–6097.
34. Morelli, J. Environmental Sustainability: A definition for environmental professionals. *J. Environ. Sustain.* **2011**, *1*, 2.
35. Elduque, A.; Javierre, C.; Elduque, D.; Fernández, Á. LCI databases sensitivity analysis of the environmental impact of the injection molding process. *Sustainability* **2015**, *108*, 3792–3800.
36. Quiang, Q. The closed-loop supply chain network with competition and design for remanufactureability. *J. Clean. Prod.* **2015**, *105*, 348–356.
37. Govindan, K.; Soleimani, H. A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: A Journal of Cleaner Production focus. *J. Clean. Prod.* **2016**. doi:10.1016/j.jclepro.2016.03.126.
38. Kerr, W.; Ryan, C. Eco-efficiency gains from remanufacturing: A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia. *J. Clean. Prod.* **2001**, *9*, 75–81.
39. Wang, Y.; Wallace, S.W.; Shen, B.; Choi, T. Service supply chain management: A review of operational models. *Eur. J. Oper. Res.* **2015**, *247*, 685–698.
40. Zhou, W.; Piramuthu, S. Remanufacturing with RFID item-level information: Optimization, waste reduction and quality improvement. *Int. J. Prod. Econ.* **2013**, *145*, 647–657.
41. Mota, B.; Gomes, M.I.; Carvalho, A.; Barbosa-Povoa, A.P. Towards supply chain sustainability: Economic, environmental and social design and planning. *J. Clean Prod.* **2015**, *105*, 14–27.
42. Aisa, J.; Javierre, C.; de La Serna, J.A. An example of simulation tools use for large injection moulds design: The CONTENUR™2400 l solid waste container. *J. Mater. Process Tech.* **2006**, *175*, 15–19.
43. Contenur. Products. Available online: <http://www.contenur.com/en/products> (accessed on 26 May 2016).
44. Lupo, E.; Moroni, M.; La Marca, F.; Fulco, S.; Pinzi, V. Investigation on an innovative technology for wet separation of plastic wastes. *Waste Manag.* **2016**, *51*, 3–12.
45. Goedkoop, M.; Oele, M.; Leijting, J.; Ponsioen, T.; Meijer, E. *SimaPro 8. Introduction into LCA*; PRÉ Consultants: Amersfoort, The Netherlands, 2013.
46. Jones, S.; Anya, A.; Stacey, N.; Weir, L. A Life-cycle Approach to Improve the Sustainability of Rural Water Systems in Resource-Limited Countries. *Challenges* **2012**, *247*, 233–260.
47. Weidema, B.P.; Bauer, C.; Hischer, R.; Mutel, C.; Nemecek, T.; Reinhard, J.; Vadenbo, C.O.; Wernet, G. Data quality guideline for the ecoinvent database version 3.0. Ecoinvent Report 1(v3.0). In *Overview and Methodology*; Frischknecht, R., Jungbluth, N., Eds.; Swiss Centre for Life Cycle Inventories: St. Gallen, Switzerland, 2013.
48. Knight, K.W.; Schor, J.B. Economic Growth and Climate Change: A Cross-National Analysis of Territorial and Consumption-Based Carbon Emissions in High-Income Countries. *Sustainability* **2014**, *6*, 3722–3731.
49. Spanish Government. Real Decreto Español 163/2014, de 14 de marzo, por el que se crea el registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de dióxido de carbono. In *Boletín Oficial del Estado*; Ministry of Agriculture, Food and Environment: Madrid, Spain, 2014.

50. International Electrotechnical Commission. IEC/TR 62635. *Guidelines for End-of-life Information Provided by Manufacturers and Recyclers and for Recyclability Rate Calculation of Electrical and Electronic Equipment*; International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland, 2015.
51. Plastics Europe, Association of Plastics Manufacturers. An analysis of European latest plastics production, demand and waste data. In *Plastics – the Facts 2014/2015*; Association of Plastics Manufacturers: Brussels, Belgium, 2015.



© 2016 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Clarivate Journal Citation Reports Browse journals Sign In Register

Home > Journal profile

JCR YEAR 2016

# Sustainability

Open Access since 2009

ISSN 2071-1050

EISSN 2071-1050

JCR ABBREVIATION SUSTAINABILITY-BASEL

ISO ABBREVIATION Sustainability

**Journal information**

EDITION Social Sciences Citation Index (SSCI) Science Citation Index Expanded (SCIE)

CATEGORY ENVIRONMENTAL STUDIES - SSCI GREEN & SUSTAINABLE SCIENCE & TECHNOLOGY - SCIE  
GREEN & SUSTAINABLE SCIENCE & TECHNOLOGY - SSCI ENVIRONMENTAL SCIENCES - SCIE

LANGUAGES ENGLISH REGION SWITZERLAND 1ST ELECTRONIC JCR YEAR 2013

**Publisher information**

PUBLISHER MDPI AG ADDRESS ST ALBAN-ANLAGE 66, CH-4052 BASEL, SWITZERLAND PUBLICATION FREQUENCY 12 issues/year

## Journal's performance

### Journal Impact Factor

The Journal Impact Factor (JIF) is a journal-level metric calculated from data indexed in the Web of Science Core Collection. It should be used with careful attention to the many factors that influence citation rates, such as the volume of publication and citations characteristics of the subject area and type of journal. The Journal Impact Factor can complement expert opinion and informed peer review. In the case of academic evaluation for tenure, it is inappropriate to use a journal-level metric as a proxy measure for individual researchers, institutions, or articles. [Learn more](#)

2016 JOURNAL IMPACT FACTOR **1.789** [View calculation](#)

JOURNAL IMPACT FACTOR WITHOUT SELF CITATIONS 1.162 [View calculation](#)

### Journal Impact Factor Trend 2016

Export

JCR Year	Journal Impact Factor	JIF Percentile in Category
2012	~0.5	~25%
2013	~0.8	~40%
2014	~0.5	~25%
2015	~0.8	~40%
2016	1.789	~75%

### Rank by Journal Impact Factor

Journals within a category are sorted in descending order by Journal Impact Factor (JIF) resulting in the Category Ranking below. A separate rank is shown for each category in which the journal is listed in JCR. Data for the most recent year is presented at the top of the list, with other years shown in reverse chronological order. [Learn more](#)

EDITION Social Sciences Citation Index (SSCI)

CATEGORY ENVIRONMENTAL STUDIES

**47/105**

JCR YEAR	JIF RANK	JIF QUARTILE	JIF PERCENTILE
2020	60/125	Q2	52.40
2019	53/123	Q2	57.32
2018	44/116	Q2	62.50
2017	51/109	Q2	53.67
2016	47/105	Q2	55.71

EDITION Social Sciences Citation Index (SSCI)

CATEGORY GREEN & SUSTAINABLE SCIENCE & TECHNOLOGY

**4/6**

JCR YEAR	JIF RANK	JIF QUARTILE	JIF PERCENTILE
2020	6/9	Q3	38.89
2019	6/8	Q3	31.25
2018	3/6	Q2	58.33
2017	3/6	Q2	58.33
2016	4/6	Q3	41.67

### Rank by Journal Impact Factor

Journals within a category are sorted in descending order by Journal Impact Factor (JIF) resulting in the Category Ranking below. A separate rank is shown for each category in which the journal is listed in JCR. Data for the most recent year is presented at the top of the list, with other years shown in reverse chronological order. [Learn more](#)

EDITION Science Citation Index Expanded (SCIE)

CATEGORY GREEN & SUSTAINABLE SCIENCE & TECHNOLOGY

**18/31**

JCR YEAR	JIF RANK	JIF QUARTILE	JIF PERCENTILE
2020	30/44	Q3	32.95
2019	26/41	Q3	37.80
2018	20/35	Q3	44.29
2017	21/33	Q3	37.88
2016	18/31	Q3	43.55

EDITION Science Citation Index Expanded (SCIE)

CATEGORY ENVIRONMENTAL SCIENCES

**119/229**

JCR YEAR	JIF RANK	JIF QUARTILE	JIF PERCENTILE
2020	124/274	Q2	54.93
2019	120/265	Q2	54.91
2018	105/251	Q2	58.37
2017	121/242	Q2	50.21
2016	119/229	Q3	48.25



## EMSS: Processability Analysis of an Injected part in virgin or recycled polypropylene

### PROCESSABILITY ANALYSIS OF AN INJECTED PART IN VIRGIN OR RECYCLED POLYPROPYLENE

José Galve<sup>(a)</sup>, Daniel Elduque<sup>(b)</sup>, Carmelo Pina<sup>(c)</sup>, Isabel Clavería<sup>(d)</sup>, Carlos Javierre<sup>(e)</sup>

<sup>(a),(c)</sup>BSH Electrodomésticos España, S.A. Avda. de la Industria, 49, Zaragoza (Spain)

<sup>(b),(d),(e)</sup> i+aitip, University of Zaragoza, C/ María de Luna 3, Zaragoza (Spain)

<sup>(a)</sup>[jose.galve@bshg.com](mailto:jose.galve@bshg.com), <sup>(b)</sup>[delduque@unizar.es](mailto:delduque@unizar.es), <sup>(c)</sup>[carmelo.pina@bshg.com](mailto:carmelo.pina@bshg.com),

<sup>(d)</sup>[iclaver@unizar.es](mailto:iclaver@unizar.es), <sup>(e)</sup>[carlos.javierre@unizar.es](mailto:carlos.javierre@unizar.es)

#### ABSTRACT

Nowadays in the industry, exists the trend to use more ecologic materials to decrease the environmental impact of their products. One way to produce components with lower environmental impact is using recycled materials obtained from post-industrial wastes. In this article, the processability of an injected moulded part of an induction hob is going to be studied for both virgin and recycled polypropylene. One of the limitations of injection is that each material requires a mold specifically designed for the properties of the selected plastic material such as viscosity or melting point. Changing the mold can be very expensive. To cope with this problem, it is possible to simulate the injection of both materials in the same mold to observe the differences between the injection of these two materials and improve the operation conditions to get a component that can replace the original.

Keywords: injection molding, Cadmould, recycled plastic, simulation

#### 1. INTRODUCTION

Plastic injection molding is one of the most used processes in industry, and used to obtain different parts in diverse fields like automotive or home appliances. In this process raw material is forced into the cavity of a mold to obtain the defined shape (Kamal, Isayev and Liu 2009; Javierre, Fernández, Clavería, and Elduque 2014; Elduque, Javierre, Elduque, and Fernández 2015). This mold is usually designed to produce a part with a specific material because each plastic has its peculiarities like density or viscosity and therefore it has optimized process conditions such as temperature, filling time and compaction pressure.

Nowadays, the use of plastics is increasing every year. This can be due to the increase in production and consumption after the economic crisis (Elduque, Elduque, Javierre, Fernández, and Santolaria 2015).

As the consumption has grown, the price of the plastics has increased during these years. At that point, plastic manufacturers investigated for new ways to reduce costs. A remarkable option is using recycled materials. Big plastic parts producers have also lots of plastics cuts

and defective parts that can be recycled. In addition, if the industries do not recycle these wastes, there is a lot of plastic that will be sent to landfilling or incineration. Besides the costs lose on reworking, scrap and processing, not paying attention to these industrial cuts leads to another problem not only economic but also environmental. Incineration and specially the landfilling have a great impact to the environment. One way to analyze the effect of these different end of life is Life Cycle Assessment methodology (Martinez, Blanco, Jiménez, Saenz-Diez, and Sanz 2015; Fraile-Garcia, Ferreiro-Cabello, Martínez-Camara, and Jimenez-Macias 2016).

There are different end of life treatments for plastics and each one of them has a different impact on the environment. Due to the high environmental impact of incinerating and landfilling plastics (Hottle, Bilec, and Landis 2017; Galve, Elduque, Pina, and Javierre 2016; Camañes, Elduque, Javierre, and Fernández 2014), the European Union has developed specific legislation devoted to stimulate the use of recycled plastic.

The possibility of changing the injection material to a recycled one can be of interest for industrial companies. Nowadays, one of the causes to use recycled plastic is to reduce the environmental impact, as previous researches have established that using recycled plastics instead virgin reduce the environmental impact of a product. (Simões, Costa Pinto, and Bernardo 2013; Rajendran, Scelsi, Hodzic, Soutis, and Al-Maadeed 2012; Noda, Komatsu, Sumi, and Kasakura 2001; Gu, Guo, Zhang, Summers, and Hall 2017).

Changing the injection material for another type of plastic already in production results in different obstacles. As the mold and the operation conditions are designed for a specific material, changing the material can cause different problems like insufficient filling, air entrapment due to non-existence of air vents or excessive deformation caused by using non adequate operation conditions. This is caused by the different properties of the plastics.

There are several types of recycling techniques like the chemical or the mechanical (Hamad, Kaseem, and Deri 2013). The chemical one uses many organic solvents which can be dangerous to the environment (Achilias,

Roupakias, Megalokonomos, Lappas, and Antonakou 2007). The mechanical route grinds the used plastic to obtain a new raw material to use in injection or extrusion. This way produces changes in the properties of the polymer because by cutting it, the molecular chains of the polymer break, altering the structure of the molecules (Kozdeka, Rose, Koci, Caillaud, and Bahlouli 2016).

These environmental benefits, which allow reducing the environmental impact, contrast with properties changes of the recycled plastics. These alterations depend on the type of recycling technique and on the polymer used to produce the new material. Differences in the rheological properties cause a modification in the operation conditions for the virgin and recycled material. Using the same process variables would translate in inadequate dimensions.

As the cost of manufacturing a new mold for the new material is high, it is suggested the possibility of using the same mold by optimizing the operation conditions to obtain a part that meets dimensional requirements.

Knowing the differences between the properties of virgin and recycled material and having the optimized operation conditions for the virgin plastic, this material change can be supported on a software simulation, which allows obtaining ideal results of an injection introducing concrete mold and operation conditions.

Starting from a 3D model, simulation software obtains illustrative results such as filling time or clamp force (Fernández, Muniesa, and Javierre 2014). These outcomes cannot be directly transferred to real process because the software simplifies the geometry and also doesn't take into account different parameters that may affect the real process.

This study focuses on a specific part of an induction cooktop. In this case, two polypropylenes have been used, one virgin and one recycled.

## 2. METHODOLOGY

For the study of these two materials and their processability as example, an induction hob part is used to simulate this process.

### 2.1. Used materials

This article focuses on the changes given in an injection using the same mold and conditions but different plastics. In this case, two different polypropylenes are going to be simulated on the software.



Figure 1: Instron Ceast sr20 Capillary Rheometer

To see the differences between the properties of these two materials, a rheological analysis of viscosity has been made. The capillary rheometer used has been the Instron Ceast sr20 (Figure 1).

The results obtained in this analysis are shown in figure 2. As it can be seen, these two plastics do not have the exact same viscosity properties but can be considered similar.

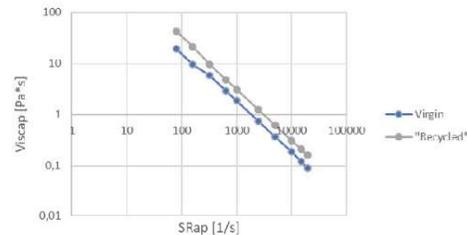


Figure 2: Viscosity Analysis for Virgin and Recycled Material

The mechanical technique grinds the used plastic to obtain a new raw material to use in injection or extrusion. This method produces changes in the properties of the polymer because by cutting it, they break the molecular chains altering the structure of the molecules.

The recycled polymer used in these simulations is a plastic produced by the mechanical method. This plastic was obtained from a mixture of different polypropylenes which have similar properties to the virgin plastic. The origin of these materials has been tracked to ensure that only pure polypropylene has been used and that there will not be any impurity that can spoil the recycled material.

Apart from this, the way of producing this recycled plastic is not by simply grinding parts and introducing them in the injection machine. This polypropylene is obtained by melting recycled materials, treating them and adding additives to improve and stabilize their properties.

This is why instead of just being called recycled material, it should be called material made from recycled materials.

After this process, the obtained plastic made from waste has similar properties than the virgin one.

### 2.2. Simulated part

The part that is going to be simulated is an internal component of an induction hob (Pina, Elduque, Javierre, Martínez, and Jiménez 2015), so it is not necessary that this part has careful aesthetics (Figure 3). However, it has to meet several dimensional requirements to fit with other parts of the induction hob. In addition, this part is located below different heavy components. This condition forces deformations to be minimized as the parts of the induction hob must fit properly.



Figure 3: Reference Component of an Induction Hob

This part has a dimension of approximately 534x472mm and is currently produced with virgin polypropylene. This is why there is no chance to change the mold. The mold is an expensive part and as the part that is going to be produced with the recycled plastic must be the same, it was decided to maintain the mold although the materials have some different properties. To counteract these differences in the material properties and using the same mold, operating conditions have to be refined to obtain similar parts.

### 2.3. Simulation

It has been decided to make the comparative of the two materials on a simulation software in order to save plastic material, time and energy because the process only runs in a computer (Jiménez, Ruiz, Blanco, and Pérez 2009). Software used for simulation has been Cadmould 3D-F (patented technology EP1 385 5103), which allows to analyze filling stages of the injection molding, as well as cooling and warping effects on the part.

This software allows introducing 3D models and mold to obtain a part by injection. Mesh model generation is based on a special 3D-framework (3D-F) crosslinking method with at least twenty-five sampling points across the thickness as described in (Filz, Weibelhaus, 2006). This method generates a final mesh model from a standard STL geometrical model, ready to carry out the finite elements analysis (Figure 4).

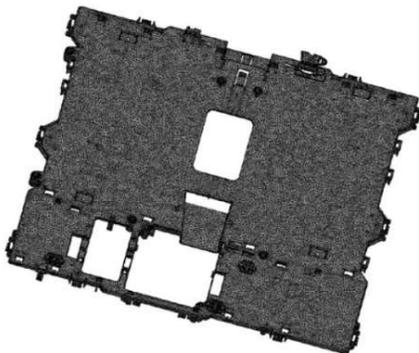


Figure 4: Mesh Example for the Part.

Once the mesh is obtained, it is necessary to introduce the injection points through which the material enters in the mold. These injection points can be directly in contact with the mold or can be placed with feeding runners for a better control of the material injection pressure.

In this case, the injection points are placed directly in the component, as shown in Figure 5.

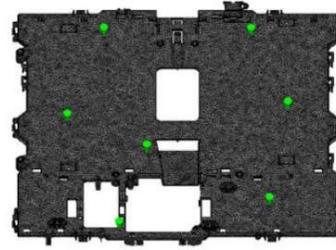


Figure 5: Injection Points on Cadmould

Materials are selected from the software database. With the mesh, injection points and fixed operation conditions, the software runs the simulation and shows different results like filling time or commutation pressure.

### 2.4. Process

This study is based on specific operation condition and a specific mold designed for the virgin plastic. This study is going to be named case 0 and will be the reference to optimize the injection of the recycled material. Seeing the differences between the results of these two cases, operation condition can be modified to improve the filling with recycled material.

The first step of this process is simulate the case 0 on Cadmould.

The case 0 consist on a mold and a refrigeration system through which water circulates to cool down the injected material in a uniform manner. This refrigeration system is extracted from the current mold used for production series (Figure 6).

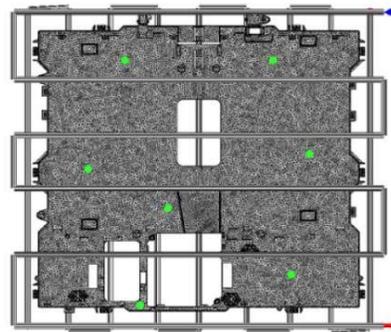


Figure 6: Top Refrigeration System Model

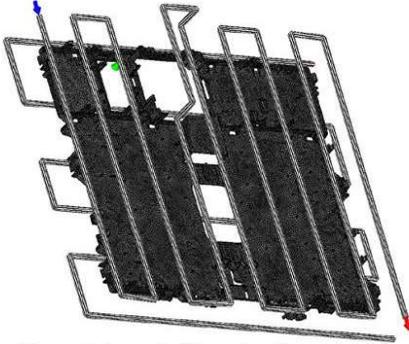


Figure 7: Lower Refrigeration System Model

This system, described on figures 6 and 7, is composed of upper and lower circuit of 10 mm diameter channels, with independent water inputs and outputs. Both systems are fed with a flow of 10 l/min at a temperature of 15 °C. The refrigeration will run during 35 seconds. After configuring the refrigeration, operation conditions must be set. As it's based on an optimized process, injection time will be 2.5 seconds and compaction profile will use 40 MPa during 12 seconds with 250 °C of mass temperature.

Once the simulation is complete, the outcomes are taken as reference. After this, another simulation will run, but this time, with the recycled polymer and the conditions of case 0. Since these two materials have different properties, the results will not be the same and filling time in the recycled material is expected to be different and insufficient. Although the conditions were not valid, these outcomes are taken as reference to improve the operation conditions of the recycled plastic using the same tool.

**2.5. Differences in the injection process**

The recycled plastic used in these simulations is not exactly the same than the virgin. To elaborate this polymer, different sources of polypropylene are used because as it was commented before, when PP is grinded loses properties. Therefore, the plastics used for recycling have different injection properties and are mixed in the adequate proportion, looking for a resulting polymer with similar behavior to the virgin one.

Although this material is as similar as possible to the virgin material, there will be differences in the injection and this may change properties in the produced component.

**3. RESULTS**

**3.1. Virgin polypropylene and optimized operation conditions**

One of the most representative outcomes is the filling time, which is going to indicate the total time and how the part fills.

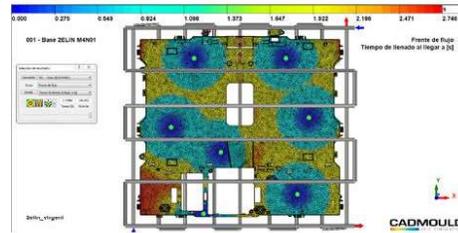


Figure 8: Fill Distribution for Virgin Material

As presented, the part fills up completely. Filling time introduced in the software was 2.5 seconds and the result has been 2.75 seconds.

The following result is the pressure at the shift between speed and pressure control. When the 99% of the part is filled, this process is going to be compacted under a pressure of 40 MPa.

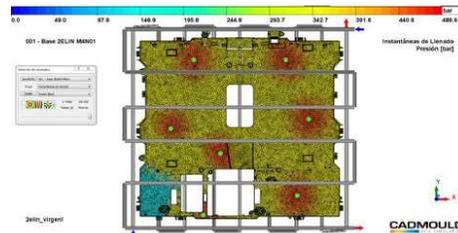


Figure 9: Commutation Pressure V/P for the Virgin Material

As it can be seen, there is an area in the lower left corner that will be filled by pressure.

If material temperature is not high enough, the polymer could solidify before filling all the details present in the design. However, in this case, the temperature is adequate and the filling process is enough.

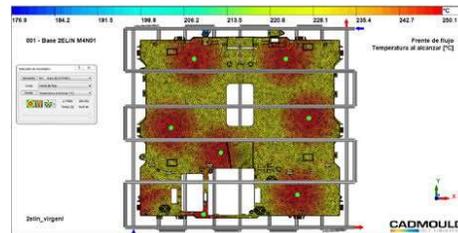


Figure 10: Distribution Temperature for the Virgin Material

Nevertheless, as the injection speed is enough and the temperature is higher than the melting point, the part fills completely. After the filling time is necessary to control the pressure during the compaction. If this compaction pressure is not high enough there is the possibility not to fill completely the remaining percentage.

In contrast, extremely high pressure cause excessive deformations. The next figure shows the injection pressure.

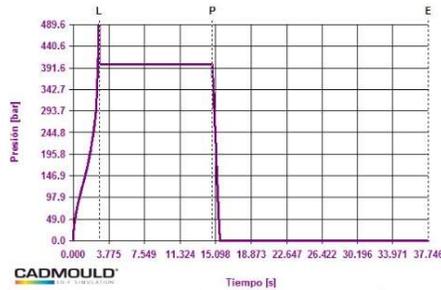


Figure 11: Pressure at Injection Point for the Virgin Material

The maximum injection pressure obtained for the virgin polymer is 489.6 bar

In addition, another important parameter is the clamping force. This force keeps the mold closed during the injection. An excessive clamping force might damage the part. In this case, the clamping force isn't excessive. The value of this outcome is 8328 kN.

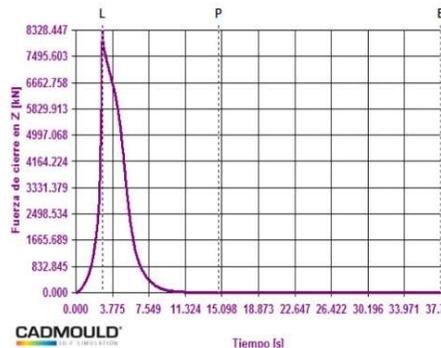


Figure 12: Clamp Force for the Virgin Material

### 3.2. Recycled polypropylene with same conditions of case 0

The next step simulates the injection process using the recycled material. The mold, injection points and the operation conditions are the same than the previous case.

Although this polypropylene is a recycled material, it is produced using only industrial wastes from factories that use virgin polypropylene. This ensures that this raw material has only been reprocessed once after the original polymer.

As has been mentioned before, changing the material within modifying any parameter, can cause several problems in the process. First of all, the first problem is the fill. Recycled polypropylene has a higher viscosity

than the virgin and this difference cause that it flows slower, cooling faster and hence, solidifying.

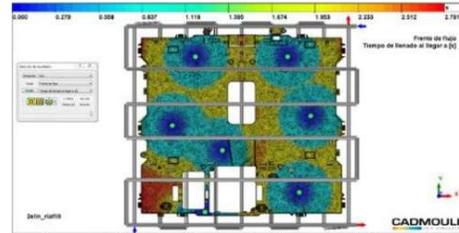


Figure 2: Fill Distribution for the Recycled Material

Although recycled polymers have different properties than virgin ones, Figure 13 shows that this specific plastic does not have problems during the injection process and the part fills completely.

Filling time of virgin polymer was 2.75 seconds and in this case is 2.79. This indicates that filling time is not seriously affected by the change of the material.

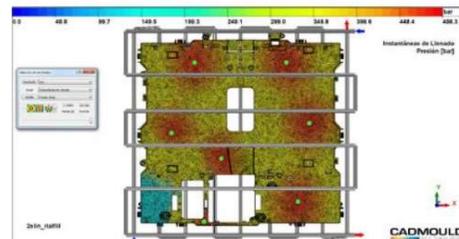


Figure 3: Commutation Pressure V/P in the Injection of the Recycled Material

On top of that, pressure loss is neither severely affected. This can be seen in Figure 14. In virgin material is 489.6 bar and in recycled 498.3 bar.

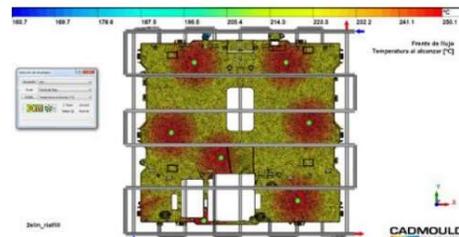


Figure 15: Distribution Temperature for the Recycled Material

As can be observed in Figure 15, the filling temperature is enough to keep the material liquid during the injection. This allows to fill the part without solidification problems in the injection. The maximum temperature reached in the injection is 250.1 °C.

Another important outcome is the injection pressure.

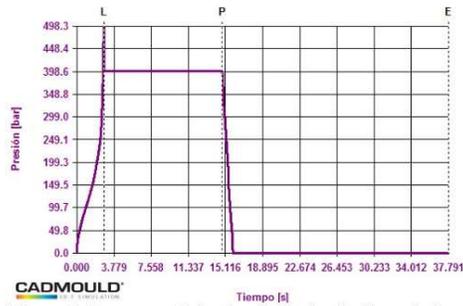


Figure 5: Pressure at Injection Point for the Recycled Material

In this case, the injection pressure isn't excessive to produce deformations in the part. The maximum obtained value is 498.3 bar which is similar to the result of the virgin polymer.

Finally, the last important result for the recycled material is the clamping force.

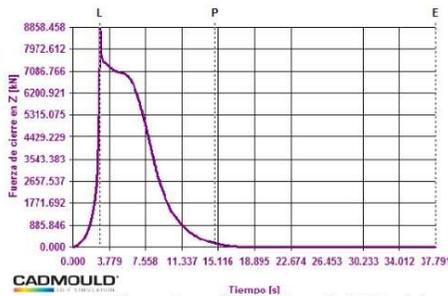


Figure 6: Clamp Force for the Recycled Material

The maximum value obtained is 8858 kN, similar to the result of the virgin one.

#### 4. CONCLUSIONS

After performing both simulations, the following conclusions have been obtained:

- Although the raw materials of this recycled plastic have different origins and later have been treated with additives, the obtained material produced from recycled has similar properties to the virgin.
- The rheological analysis is similar for the two compared materials although properties as viscosity are slightly higher in the recycled material.
- Filling distribution is practically the same in both cases despite the existence of different thicknesses in the part. Pressure is similar, a little higher in the recycled one due to the viscosity in accordance with rheological analyzes. This difference in pressure values is also caused by the cooling of the material as

the second one cools faster. Clamp force is higher in the recycled plastic due to the pressure and the viscosity.

- From the point of view of processability, these two materials are similar.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The research in this paper has been partially supported by the Spanish MINECO under Project RETO RTC-2014-1847-6, and has been developed by members of the I+AITIIP (DGA-T08\_17R) research group of the FEDER 2014-2020 "Construyendo Europa desde Aragón" program, recognized by the Regional Government of Aragón.

#### REFERENCES

- Achilias D, Roupakias C, Megalokomos P, Lappas A, Antonakou E, 2007. Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *Journal of Hazardous Materials* 149:536-542
- Camañes V, Elduque D, Javierre C, Fernández A, 2014. The Influence of Different Recycling Scenarios on the Mechanical Design of an LED Weatherproof Light Fitting. *Materials* 7:5769-5788
- Elduque A, Elduque D, Javierre C, Fernández A, Santolaria J, 2015. Environmental impact analysis of the injection molding process: analysis of the processing of high-density polyethylene parts. *Journal of Cleaner Production* 108:80-89
- Elduque A, Javierre C, Elduque D, Fernández A, 2015. LCI Databases Sensitivity Analysis of the Environmental Impact of the Injection Molding Process. *Sustainability* 7:3792-3800
- Fernández A, Muniesa M, Javierre C, 2014. In-line rheological testing of thermoplastics and a monitored device for an injection moulding machine: Application to a raw and recycled polypropylene. *Polymer Testing* 33: 107-115
- Filz P.F., Webelhaus F.K., 2006. Technical Explanation of the CadmouldR 3D-F Technology in CADMOULD 3D F Fill User Manual 2006: 202-206.
- Fraile-Garcia E, Ferreiro-Cabello J, Martínez-Camara E, Jimenez-Macias E, 2016. Optimization based on life cycle analysis for reinforced concrete structures with one-way slabs. *Engineering Structures* 109:126-138
- Galve J, Elduque D, Pina C, Javierre C, 2016. Sustainable Supply Chain Management: The Influence of Disposal Scenarios on the Environmental Impact of a 2400 L Waste Container. *Sustainability* 8:564
- Gu F, Guo J, Zhang W, Summers P, Hall P, 2017. From waste plastics to industrial raw materials: A life cycle assessment of mechanical plastic recycling practice based on a real-world case study. *Science of the Total Environment* 601-602:1192-1207
- Hamad K, Kaseem M, Deri F, 2013. Recycling of waste from polymer materials: An overview of the recent

- works. *Polymer Degradation and Stability* 98: 2801-2812
- Hottle T, Bilec M, Landis A, 2017. Biopolymer production and end of life comparisons using life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling* 122:295-306
- Javierre C, Fernández A, Clavería I, Elduque D, 2014. Textile injection process characterisation by means of a spiral mould. *Measurement* 47:200-109
- Jiménez, E., Ruiz, I., Blanco, J., Pérez, M. (2009). Design and simulation of production of injection pieces in automobile industry. *International Journal of Simulation: Systems, Science and Technology*, 10(3), 23-30.
- Kamal M, Isayev A, Liu S, 2009. *Injection moulding, Technology and Fundamentals*. Cincinnati: Hanser Publications, Inc.
- Kozderka M, Rose B, Koci V, Caillaud E, Bahlouli N, 2016. High impact polypropylene (HIPP) recycling – Mechanical resistance and Lifecycle Assessment (LCA) case study with improved efficiency by preliminary sensitivity analysis. *Journal of Cleaner Production* 137: 1004-1017
- Martínez E, Blanco J, Jiménez E, Saenz-Díez J.C, Sanz F, 2015. Comparative evaluation of life cycle impact assessment software tools through a wind turbine case study. *Renewable Energy* 74:237-246
- Noda R, Komatsu M, Sumi E, Kasakura R, 2001. Evaluation of material recycling for plastics: environmental aspects. *Journal of Material Cycles and Waste Management* 3:118-125
- Pina C, Elduque D, Javierre C, Martínez E, Jiménez E, 2015. Influence of mechanical design on the evolution of the environmental impact of an induction hob. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20:937-946
- Rajendran S, Scelsi L, Hodzic A, Soutis C, Al-Maadeed, M, 2012. Environmental impact assessment of composites containing recycled plastics. *Resources, Conservation and Recycling* 60:131-139
- Simões C, Costa Pinto L, Bernardo C, 2013. Environmental and economic assessment of a road safety product made with virgin and recycled HDPE: A comparative study. *Journal of Environmental Management* 2013:209-215

#### AUTHORS BIOGRAPHY

**José Galve** finished his degree in Industrial engineering in 2012. He works as mechanical development for BSH Home Appliances Group – Spain. He works also as a part time teacher of the CAD software NX. He is a Mechanical Engineering PhD candidate since September 2014 in the University of Zaragoza. In his work he researches the environmental impact of the thermoplastic recycling process.

**Carmelo Pina** is a part-time professor at the University of Zaragoza in the Department of Design and

Manufacturing and PhD Co-Director of José Galve. He works, as well, at BSH Home Appliances Group – Spain and is the Head of Mechanical Platform Development of Induction Cooktops. He received his PhD in 2015. His main research interests include mechanical engineering, life cycle assessment and environmental impact.

**Daniel Elduque** is an Assistant Professor at the University of Zaragoza in the Mechanical Engineering Department and PhD Co-Director of José Galve. He is part of the I+ research group. He received his PhD in 2014. His main research interests include mechanical engineering, life cycle assessment and environmental impact. Some of his latest publications are the analysis of the environmental impact of the injection moulding process, and the study of the influence of the composition on the environmental impact of SMD transistors and aluminium casting alloys.

**Isabel Clavería** is Senior Lecturer at University of Zaragoza in Mechanical Engineering Department since 2007. She belongs to I+ research group. Her main research interests include mechanical engineering and industrial design of plastic parts. Some of her latest publications are a new extrusion head with integrated ultrasonic device and online process parameters measurements system and textile injection process characterization by means of a spiral mould.

**Carlos Javierre** is a Professor at the University of Zaragoza in the Mechanical Engineering Department. He is part of the I+ research group. His main research interests include mechanical engineering, life cycle assessment and environmental impact. Some of his latest publications are the study of the influence of environmental conditions on the dimensional stability of components injected with PA6 and PA66; or the analysis of the environmental impact of the injection moulding process of high-density polyethylene parts by carrying out a life cycle assessment.

## Scopus

---

### Documents

Export Date: 07 Jul 2021

Search:

- 1) Galve, J., Elduque, D., Pina, C., Clavería, I., Javierre, C.  
[Processability analysis of an injected part in virgin or recycled polypropylene](#)  
(2018) 30th European Modeling and Simulation Symposium, EMSS 2018, pp. 241-247. Cited 2 times.
- 1) <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85053423428&partnerID=40&md5=b18b6f06959d40b99758ff9d8046555>  
Document Type: Conference Paper  
Publication Stage: Final  
Source: Scopus

## Polymers: Dimensional Stability and Process Capability of an Industrial Component Injected with Recycled Polypropylene.



Article

### Dimensional Stability and Process Capability of an Industrial Component Injected with Recycled Polypropylene

José Eduardo Galve <sup>1</sup>, Daniel Elduque <sup>2</sup>, Carmelo Pina <sup>1</sup>, Isabel Clavería <sup>2,\*</sup>, Raquel Acero <sup>3</sup>, Ángel Fernández <sup>2</sup> and Carlos Javierre <sup>2</sup>

<sup>1</sup> BSH Electrodomésticos España, S.A., Avda. de la Industria, 49, 50016 Zaragoza, Spain;

jose.galve@bshg.com (J.E.G.); carmelo.pina@bshg.com (C.P.)

<sup>2</sup> i+ATIII, Department of Mechanical Engineering, University of Zaragoza EINA, Maria de Luna 3, 50018 Zaragoza, Spain; delduque@unizar.es (D.E.); afernan@unizar.es (Á.F.); carlos.javierre@unizar.es (C.J.)

<sup>3</sup> Department of Design and Manufacturing Engineering, University of Zaragoza EINA, Maria de Luna 3, 50018 Zaragoza, Spain; racero@unizar.es

\* Correspondence: isabel.claveria@unizar.es; Tel.: +34-876555234

Received: 9 May 2019; Accepted: 17 June 2019; Published: 20 June 2019



**Abstract:** The usage of recycled polymers for industrial purposes arises as one of the most promising methods of reducing environmental impact and costs associated with scrapping parts. This paper presents a systematic study of the dimensional stability of a raw and 100% recycled polypropylene subjected to realistic environmental conditions occurring along its working life. The component studied is an internal part of an induction hob assembly. Industrial samples manufactured with both materials, in the same mold, and in the same injection machine, are subjected to ejection conditions, storage conditions (50 °C), and extreme performance conditions (80 °C). Induced dimensional changes are registered and analyzed using a coordinate measuring machine, and a tactile sensing probe. To verify the process capability of the samples manufacturing,  $C_p$  and  $C_{pk}$  values are calculated to evaluate the suitability of the recycled material as an alternative. Results conclude that, although the use of recycled material implies slight differences in terms of dimensional stability due to the changes induced in the polymer structure, these differences are not significant enough to affect the injection process capability. Therefore, recycling arises as one effective method to reduce both overruns associated with the consumption of raw polypropylene material and its environmental impact.

**Keywords:** polypropylene; dimensional; injection; recycled; process capability; warpage; shrinkage

#### 1. Introduction

The annual growth in polypropylene (PP) consumption has been increasing again during the last years, after the severe decline suffered ten years ago due to the economic crisis [1].

This new trend leads to higher prices imposed by producers as well as higher amounts of waste due to plastic cuts and scraps that result in significant overruns. On the other hand, waste material may follow different end-of-life treatments, from which landfilling or incineration cause the highest environmental impact [2]. At this point, recycling stands out as a much more environmental-friendly alternative end-of-life treatment for polymers as it has also been promoted by specific key actions by the European Union [3,4]. One of the approaches to sustainability that has been gaining momentum in recent years is the circular economy, which encourages industries to convert waste back to materials through recycling [5–9]. Other strategies working on the same idea are reusing, reparability, refurbishment, and remanufacturing [10].

Research shows that the environmental impact of products can be highly reduced by manufacturing with recycled polymers instead of raw materials [11–13]. Recycled material can be mainly obtained by chemical or mechanical means [14–18]. Aiming for the same goals, these processes differ significantly. While chemical recycling uses organic solvents that may be dangerous to the environment [19], mechanical recycling is referred to operations that aim to recover plastic waste via mechanical processes (i.e., grinding, washing, separating, drying, re-granulating, or compounding) causing the break of polymer chains of the structure of PP [20]. As a side effect to consider, we should mention contamination given that, during the recycling process, it can also deteriorate the polymers [21], and whose alterations lead to changes in both mechanical and rheological properties [22,23].

The injection molding process is affected by rheological behavior, especially at the filling stage [24,25]. However, it is not the only process affected by the replacement of raw materials with recycled ones. In fact, as molding and processing are designed for a specific material, problems related to warpage can arise when the material is changed, and process parameters could be adjusted to meet the part requirements [26].

Polymer parts suffer from shrinkage and warpage during the injection molding process and induced by thermal and pressure changes achieved over it, especially those injected with semi-crystalline materials like PP, [27]. As a result, the final dimensions of injected components are affected by material shrinkage during the process caused by the filling orientation, packing conditions, and cooling parameters [28,29]. Different models have been proposed to study this effect [30,31] as this issue is important because it directly affects the functionality of the part. Therefore, many different authors take it into account when a modification on the material is done. Khanjanzadeh et al. analyzed the dimensional stability of replacing raw PP with recycled PP in the manufacturing of wood-plastic composites [32]. De Carvalho et al. also reported the influence of mold material on the dimensional stability [33]; and Norihisa et al. analyzed the dimensional stability of different PP wood composites [34]. Dimensional stability has also been increased through assisted-injection molding processes such as gas assisted injection molding [35,36].

Induced warpage on the part, due to changes in material, leads to problems in keeping the part dimensions within the specifications [37], which is required to avoid later assembly operations. When the material is changed, a new mold should be provided with the shrinkage requirements of the new material. In order to avoid the cost of a new mold and achieve the dimensional requirements of the product, an optimization of the process conditions with the recycled material is suggested. Along with its working life and during the period in-between, its manufacture and the beginning of its working life, a component can be subjected to different environmental conditions that can affect its dimensional state [38]. In this paper, the effect of using a recycled material instead of a raw one on the dimensional stability of the parts is studied. While previous researches have focused on the cause of dimensional distortions such as shrinkage and warpage caused by process conditions [39,40], hardly any deal with the topic of dimensional stability of injected components when the material is replaced by a recycled one, or along its working life due to changes in the environmental conditions.

The main contribution of this paper consists of a systematic investigation into the dimensional changes of raw and recycled PP intended for long-term use under different realistic in-service environmental conditions to which the component is subjected during its working life. The paper analyzes not only the dimensional changes but also the manufacturing process capability according to  $C_p$  and  $C_{pk}$  parameters [41,42].  $C_p$  stands for process capability to produce parts within the tolerance specification limits and  $C_{pk}$  stands for process capability to produce parts within the tolerance specification limits and near its nominal value.

The following section of this paper explains the materials used and the dimensional and process capability test methodologies. Then, the dimensional results are shown under different conditions (after stabilization, after storage, and after extreme performance), and the dimensional behavior is analyzed, followed by the analysis of the process capability parameters. Finally, conclusions are obtained after analyzing the results.

## 2. Materials and Methods

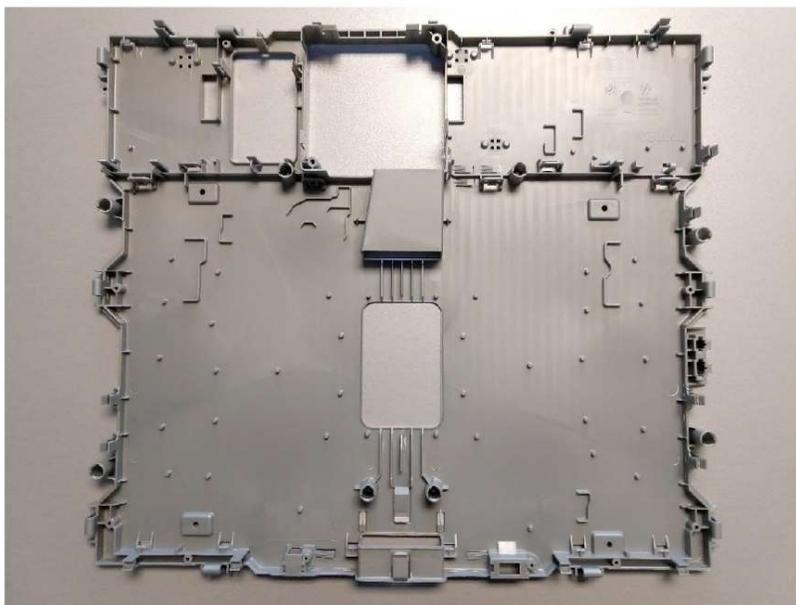
### 2.1. Materials

Two PP materials filled with 40% of talc are used for the tests, a raw PP Hostacom HBC 309 NAT, and a 100% recycled one, E-RIALFILL H 07 40 T (Table 1). The recycled one is a polymer obtained from post-industrial PP waste materials, tracked to ensure that only pure propylene free of impurities is used.

**Table 1.** General properties of materials.

	Raw	Recycled
Density (g/cm <sup>3</sup> )	1.22	1.25
Vicat B °C 10 N (50 °C/h)	90	94
HDT °C 1.82 MN/m <sup>2</sup> ISO 75 242 °C	70	74
Molding shrinkage % ISO 294-4	1.35	1.15
Ejection temperature (°C)	110	118

The component selected for the study is an internal part of an induction hob assembly that must meet several dimensional requirements to fit with other parts of the induction hob (Figure 1). The overall nominal dimensions are 472.6 mm × 534 mm and its nominal thickness is 1.8 mm.



**Figure 1.** Sample component used for the analysis.

### 2.2. Dimensional Tests Methodology

Sample components were obtained by an injection mold in a Negri Bossi 8000H-6700 (Negri-Bossi, Cologno Monzese, Italy) injection molding machine [43], at a melting temperature of 240 °C, injection time of 4.5 s, packing pressure of 30 MPa for 2 s, and a further cooling time of 20 s. The same injection parameters were used for both materials. All the samples were injected on the same day and with the same mold after the stabilization of the process.

Fifteen samples of each material were measured under three different temperature conditions with the same exposure time of 48 h. A preliminary test, named as  $M_0$ , was conducted after having the stabilized parts under lab conditions at a room temperature of  $20 \pm 0.5$  °C. This setting represents the average standard temperature conditions of the component just after having been injected. Since  $M_0$  is the absolute dimension measured during the test,  $\Delta M_0$  is the dimension measurement referenced to nominal dimension ( $M_{nom}$ ) calculated as:

$$\Delta M_0 = |M_0 - M_{nom}|, \quad (1)$$

Then, a second test named as  $M_1$  was conducted by introducing the samples into a Memmert CTC256 environmental test chamber, (Mettler, Schwabach, Germany), at a temperature of 50 °C for 48 h. After this time, samples were stabilized at 20 °C for 24 h [44]. This second test represents a medium/high-temperature condition storage situation, similar to those found in the place where these parts are stored for some time before they are ready to be assembled, which is the most critical situation in the assembly chain regarding temperature. 50 °C is the maximum temperature that the stored components reach during summer. Measurement values registered under these conditions were named as  $M_1$ . The difference in dimensions between the samples at 50 °C and the samples at room temperature,  $\Delta M_1$ , both referred to  $M_{nom}$ , is calculated from the Equation (2):

$$\Delta M_1 = |M_0 - M_{nom}| - |M_1 - M_{nom}|, \quad (2)$$

where

$M_1$  = dimension measured after being heated at 50 °C

$M_{nom}$  = nominal dimension

$M_0$  = dimension measured at room temperature

$\Delta M_1$  = dimension variation between samples heated at 50 °C and samples at room temperature.

In order to reproduce temperature variations that take place on the samples performing their function into the assembly, reaching extreme performance temperatures close to 80 °C and cooling them to a standard temperature later, they were again heated up to 80 °C for 48 h and, then, stabilized under lab conditions of  $20 \pm 0.5$  °C for 24 h [44]. This maximum performance temperature of 80 °C is the highest temperature that the part reaches. It has been measured with thermocouples after running an induction hob for several hours under stress conditions. Results of this third test were named as  $M_2$ . The difference in dimensions between samples at 80 °C and at room temperature,  $\Delta M_2$ , both referred to  $M_{nom}$ , is calculated from Equation (3):

$$\Delta M_2 = |M_0 - M_{nom}| - |M_2 - M_{nom}|, \quad (3)$$

where

$M_2$  = dimension measured after being heated at 80 °C

$M_{nom}$  = nominal dimension

$M_0$  = dimension measured at room temperature

$\Delta M_2$  = dimension variation between samples heated at 80 °C and at room temperature.

Shrinkage behavior of the samples between two different temperatures above room temperature, 50 and 80 °C, is also calculated from Equation (4):

$$\Delta M_{50-80} = |\Delta M_2 - \Delta M_1|, \quad (4)$$

where,

$\Delta M_{50-80}$  is the difference in measures between samples heated at 50 and 80 °C.

$\Delta M_i$  is the difference in measures between the dimensions at  $M_i$  conditions and those at room temperature; both referred to the nominal dimension.

$M_1$  = dimension measured after being heated at 50 °C

$M_2$  = dimension measured after being heated at 80 °C

Dimensions that will be analyzed at  $M_0$ ,  $M_1$ , and  $M_2$  conditions are critical in terms of assembly and functionality. They are the ones locating part edges on the assembly frame, as described in Figure 2.

- D1 is the cartesian distance from fixing point 1 on the left edge of the part to fixing point 1 on the right edge. To determine the measurement of this distance, the line joining fixing points 1 and 3 is taken as a reference in such a way that D1 is normal to it. D1 nominal value is  $534 \pm 0.6$  mm.
- D2 is the cartesian distance from fixing point 2 on the left edge of the part to fixing point 2 on the right edge. To determine the measurement of this distance, the line joining fixing points 1 and 3 is taken as a reference in such a way that D2 is normal to it. D2 nominal value is  $534 \pm 0.6$  mm.
- D3 is the cartesian distance from fixing point 3 on the left edge of the part to fixing point 3 on the right edge. To determine the measurement of this distance, the line joining fixing points 1 and 3 is taken as a reference in such a way that D3 is normal to it. D3 nominal value is  $534 \pm 0.6$  mm.
- D4 is the cartesian distance from fixing point 4 on the upper edge of the part to fixing point 4 on the lower edge. To determine the measurement of this distance, the line joining fixing points 4 and 5 is taken as a reference in such a way that D4 is normal to it. D4 nominal value is  $472.6 \pm 0.6$  mm.
- D5 is the cartesian distance from fixing point 5 on the upper edge of the part to fixing point 5 on the lower edge. To determine the measurement of this distance, the line joining fixing points 4 and 5 is taken as a reference in such a way that D5 is normal to it. D5 nominal value is  $472.6 \pm 0.6$  mm.

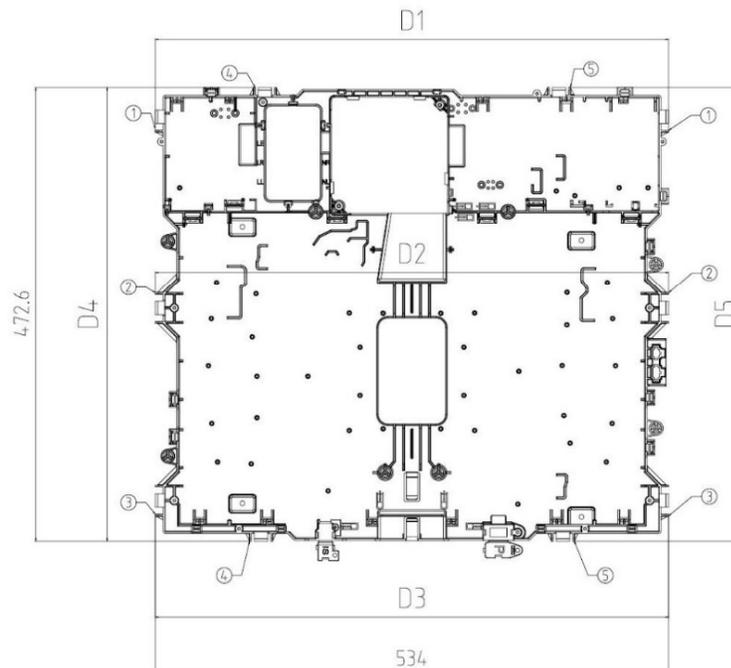


Figure 2. Detail of the locating areas of the part from which dimensions  $D_i$  (mm) are defined.

To locate the component and record measurements data, a Zeiss PMC 876, (Carl Zeiss, Oberkochen, Germany) coordinate measuring machine was used [45]. The tactile scanning probe used was a Vast XT (Carl Zeiss, Oberkochen, Germany), [46], and the metrology software was Calypso (Carl Zeiss, Oberkochen, Germany) [47]. The base reference system was placed in the locating tool to automatize measurements from this baseline once the tool was in the measuring machine [44]. Figure 3 shows this base reference system. The component was always supported on the tool in the same way: first on the XY plane, then on the XZ plane, and finally, on the YZ plane to ensure that the component location was repeatable.

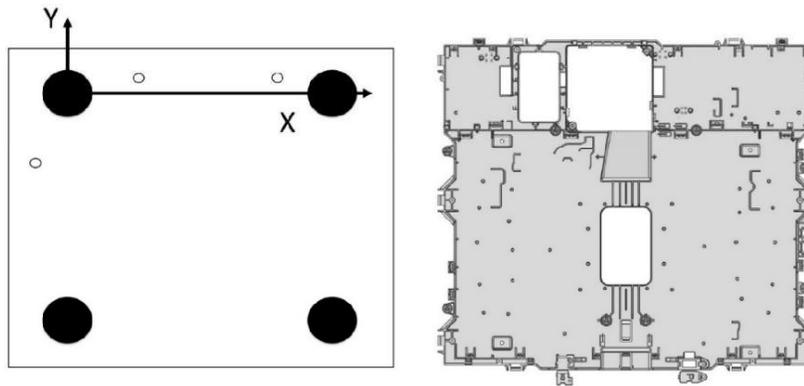


Figure 3. Base reference system to locate samples into a measurement tool.

### 2.3. Process Capability Tests Methodology

To examine the suitability of recycled PP for the injected component from the point of view of quality controls during manufacturing, process capability is analyzed for both raw and recycled materials. Twenty-five new samples of each material were obtained by injection molding in the same conditions as described in the previous section.

Two representative dimensions of the width and height of the component (D1 and D4) were selected according to the critical assembly criteria to analyze the process capability. D1 and D4 were measured in the Zeiss PMC 876 coordinate measuring machine (Carl Zeiss, Oberkochen, Germany). It has been checked that measurements followed a normal distribution using the Anderson–Darling normality test. The reference system used was the same as the one used for dimensional tests, described in Figure 3. Process capability is calculated from parameters  $C_p$  and  $C_{pk}$ , which are obtained from Equations (5) and (6). Low  $C_p$  values are related to high variability with respect to the specification values, whereas low  $C_{pk}$  values imply that the process is not centered between the specification limits.

$$C_p = \frac{|USL - LSL|}{6\sigma}, \quad (5)$$

$$C_{pk} = \min(C_{pu}, C_{pl}) = \min\left(\frac{|USL - \mu|}{3\sigma}, \frac{|\mu - LSL|}{3\sigma}\right), \quad (6)$$

where,

$C_p$  stands for process capability to produce parts within the tolerance specification limits,

$C_{pk}$  stands for process capability to produce parts within the tolerance specification limits and near its nominal value,

$C_{pu}$  stands for the value between the process mean and the upper specification limit,

$C_{pl}$  stands for the value between the process mean and the lower specification limit,

USL is the upper specification limit,  
 LSL is the lower specification limit.  
 Provided that measurements follow a normal distribution,  
 $\sigma$  is the standard deviation of the measures  
 $\mu$  is the average value of  $n$  measured samples  $x_i$  calculated as:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (7)$$

where  $n = 25$ ;  
 $x_i$  is the value of each dimension for sample  $i$ .

### 3. Results and Discussion

#### 3.1. Dimensions after Stabilization at Room Temperature

Table 2 shows dimension measurements for all the samples after stabilization at room temperature  $M_0$ , and  $\Delta M_0$ , referenced to nominal temperature and calculated according to the Equation (1).

**Table 2.** Measurements (mm) at  $M_0$  conditions.

Raw Material					
	D1	D2	D3	D4	D5
Avg $M_0$	533.29	533.25	533.57	472.05	472.32
Avg $\Delta M_0$	0.72	0.74	0.42	0.54	0.27
$\sigma$	0.25	0.05	0.10	0.07	0.26
Recycled Material					
	D1	D2	D3	D4	D5
Avg $M_0$	532.92	533.03	533.36	471.97	472.04
Avg $\Delta M_0$	1.07	0.96	0.63	0.62	0.55
$\sigma$	0.06	0.06	0.05	0.09	0.07

All the dimensions reduce their values regarding their nominal values after stabilization at 20 °C due, mainly, to the shrinkage induced by the temperature difference between the temperature at the ejection time, and the temperature at measurement time after stabilization. During the injection molding process, shrinkage is mainly influenced by three factors: (i) the holding pressure on the compressible polymer material during the packing stage, (ii) the flow orientation during the filling stage, and (iii) the temperature difference during the cooling stage [28,29]. All these effects lead to a global volumetric shrinkage of the component which remains constrained into the mold up to the ejection stage. Once the part is ejected, it keeps cooling until reaching room temperature (20 °C). During this time, the effect of temperature difference remains active provoking the shrinkage of the component and, thus, a decreasing of its dimensions.

Dimensions reduction achieved in samples with recycled material are slightly higher for all dimensions. Ejection temperature is slightly higher for recycled material (118 °C) than raw ones (110 °C). When samples are ejected at their respective ejection temperatures and, then, freely cooled down to the room temperature (20 °C), the thermal difference is higher for recycled material than for the raw one, contributing to a higher shrinkage and, thus, higher  $\Delta M_0$  values in samples manufactured with recycled material. Although D1, D2, and D3 come from the same nominal value, they do not reach the same final dimensions. The lowest value is achieved for D1 and the highest for D3, being  $\Delta M_0$  58% higher in this case. These differences can be attributed to a differential shrinkage in different areas of the part sample caused by a differential cooling, and to different stiffness in the different part sections. Differential cooling is caused by non-uniform thickness in the sample section or by the design of the cooling system of the mold that is not capable of assuring a uniform cooling temperature along

the sample surface. Figure 4 shows the temperature distribution at the ejection time. Most of the part surface presents a temperature around 110–120 °C. However, there are other surfaces marked as blue (60 °C) in which the temperature is lower because they are perpendicular to cooling channels and, in this case, heating extraction from the polymer core is less effective. Other surfaces that present a different temperature are the ones near the injection points, marked in yellow (165 °C), which are hotter because they are close to the polymer entrance to the mold. Sample stiffness can also vary in different sample sections where  $D_i$  are measured because of the geometry features occurring in these sections. In the case of  $D1$ , the section is featured with a set of holes that makes the cross-section less stiff, leading to a higher deformation of the part. A cross-section in which  $D3$  is measured lacks any hole, and it remains stiffer leading to a lower part deformation and a lower  $\Delta M_0$ .  $D4$  and  $D5$  come from the same nominal value, but the  $D4$  dimensional variation is higher than the  $D5$  also due to a lower stiffness in the  $D4$  hollowed cross-section, which leads to a higher deformation.

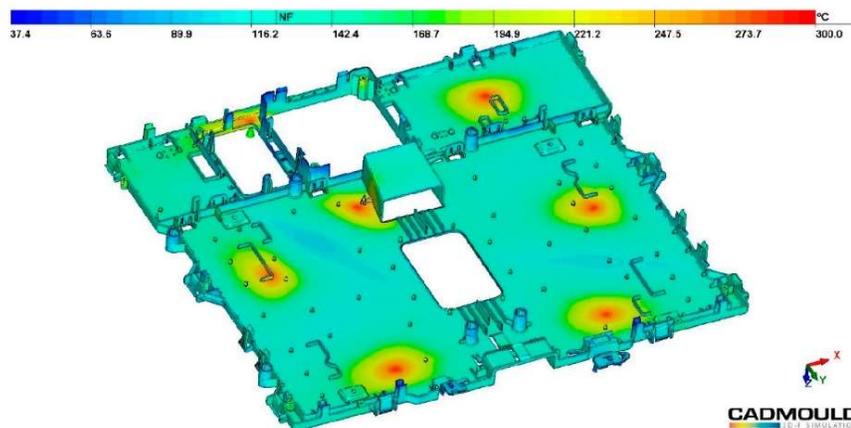


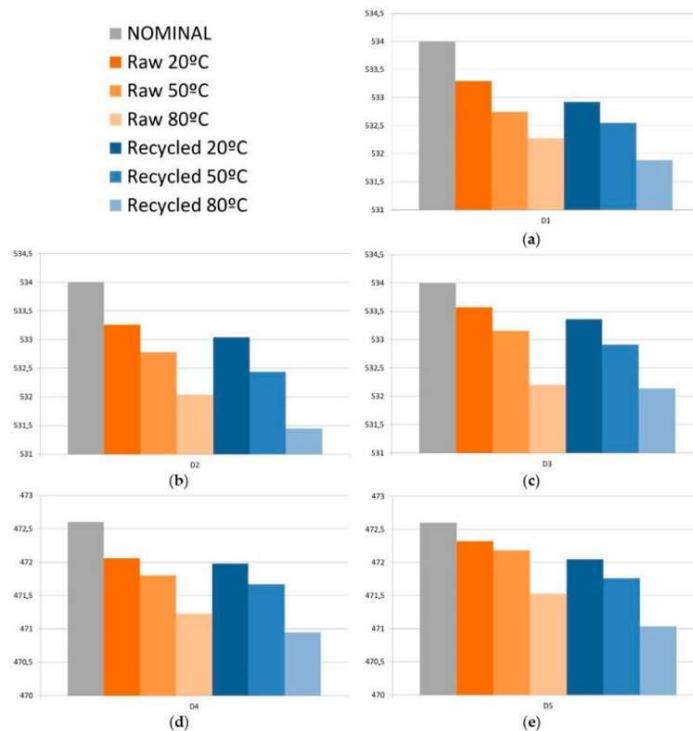
Figure 4. Temperature distribution on the sample at the ejection time.

### 3.2. Dimensions after Storage, and Extreme Performance Conditions

As previously described, storage temperature conditions are achieved after heating the samples at  $M_1$ , and later stabilizing them at room temperature. Extreme performance conditions are achieved after heating the samples at  $M_2$ , and later stabilizing them at room temperature. Figure 5 shows the average dimension values at  $M_1$  and  $M_2$  conditions for all dimensions and each type of material.

All dimensions— $D1$ ,  $D2$ ,  $D3$ ,  $D4$ , and  $D5$ —are reduced for both raw and recycled materials when samples are heated above room temperature and then stabilized again at 20 °C. Lower dimensions are achieved when heating them at 80 °C rather than at 50 °C. On the other hand, samples injected with recycled material reach lower dimensions than those injected with raw material for the same heating temperatures. Recycled material is subjected to two different contributions leading to higher deformations, and so, to a lower dimension value. First, higher residual stresses are achieved in recycled material, and second, they tend to have a lower Young Modulus [48,49]. During the injection molding process, residual stresses are stored into samples due to the conformed cooling into the mold cavity until the sample is ejected. When samples are heated again, residual stresses are released, leading to dimensional changes on the sample [50,51]. According to literature, higher residual stresses are stored in a recycled polymer than in raw materials [52]. Thus, higher stresses will be released at higher temperatures for recycled material when recycling PP, changes related to polymer structure are induced. The most relevant modification is the reduction of the length of the polymer chains [53]. The scission of the polymer changes has two main effects that contribute to a Young modulus reduction.

First, molecular weight  $M_w$  is reduced as polymer chains are shorter [54] and, second, the shorter chains are now included into the amorphous phase of the polymer, leading to a decrease of the Young modulus [48,49].



**Figure 5.** Di measurements (mm) at different environmental conditions for raw and recycled material, (a) D1; (b) D2; (c) D3; (d) D4; (e) D5.

D1, D2, and D3 keep the same trend in the dimensional variation regarding the nominal value as described for the case, in which samples are stabilized at 20 °C. Higher differences are achieved for D1, and lower for D3. As previously described, non-uniform cooling of the part cavity or differences in stiffness of the cross-section can lead to these results. Dimension D3 is also the one that exhibits a lesser difference between raw and recycled material, especially with samples heated at 80 °C.

### 3.3. Dimensional Behavior after Heating

Figure 6 shows dimension differences between heated samples and non-heated samples after stabilization at room temperature, and both obtained from Equations (2) and (3) for raw and recycled material.

These results give us a measure of the shrinkage of these two different materials. As expected, dimension differences for samples heated up to 50 °C are lower than for samples heated up to 80 °C for both materials, raw and recycled. This is due to the higher temperature difference between 80 °C and room temperature that leads to a higher change in the sample volume regarding PVT (pressure-volume-temperature) curves [55]. For samples heated at a temperature of 50 °C, raw material samples exhibit lower differences than the recycled material ones, although for D1 and D3 the difference is very low. For samples heated at a temperature of 80 °C, recycled material samples show higher

differences than the raw ones, except for D1 and D3 dimensions, in which recycled material exhibit lower changes regarding non-heated samples, especially in D3.

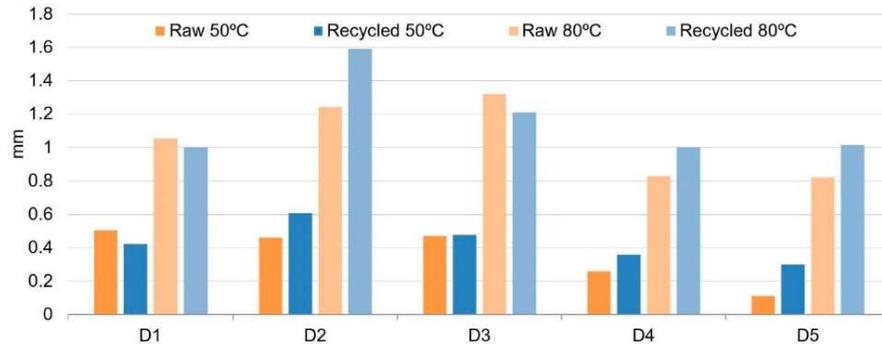


Figure 6. Dimension differences between heated samples and non-heated samples without heating after stabilization at room temperature.

Figure 7 shows differences of measures between samples heated at 50 °C and samples heated at 80 °C. This result obtained from Equation (4) gives information about the shrinkage behavior of the samples between two different temperatures but both above room temperature. Again, differences with raw material are lower for all the dimensions, except for D1 and D3.

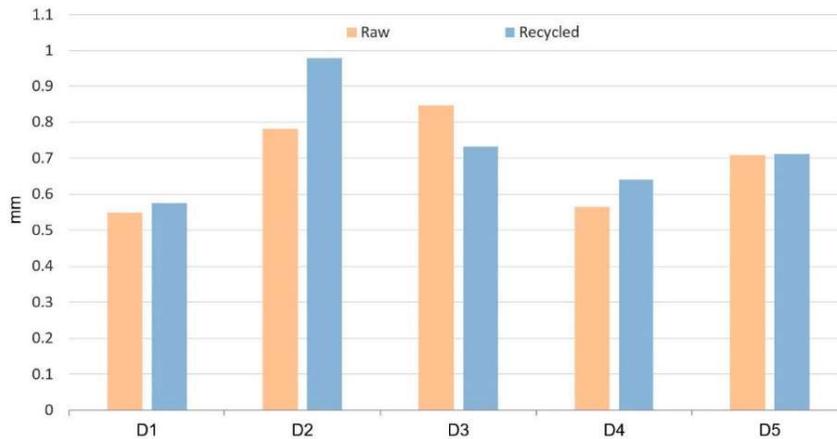


Figure 7. Dimension differences between heated samples at 50 °C and samples heated at 80 °C, after stabilization at room temperature.

Residual stresses induced during the injection molding process are released when the parts are heated, leading to distortion and dimensional changes. As the heating temperature is higher (80 °C), released stresses are higher and, thus, higher dimensional changes are observed. This mechanism applies equally to recycled and raw materials. This is shown in Table 3, where dimensional changes induced on samples subjected to a temperature difference of 30 °C are registered. It can be observed that when the temperature difference is applied between 80 and 50 °C (Figure 7), dimensional changes are higher than when the temperature difference is applied between 50 and 20 °C (Figure 6). This trend is observed for all dimensions  $D_i$  measured.

**Table 3.** Dimensions differences (mm) for  $\Delta T = 20\text{--}50\text{ }^\circ\text{C}$  and  $\Delta T = 50\text{--}80\text{ }^\circ\text{C}$ .

Raw Material					
$\Delta T$	D1	D2	D3	D4	D5
50–80 °C	0.64	0.78	1.41	0.56	0.7
20–50 °C	0.4	0.46	0.47	0.24	0.11
Recycled Material					
50–80 °C	0.57	0.98	0.73	0.64	0.71
20–50 °C	0.42	0.60	0.47	0.35	0.29

### 3.4. Process Capability Parameters ( $C_p$ and $C_{pk}$ )

Given that samples manufactured with recycled material achieve lower post-processing dimensions than those injected with raw material, it is required to evaluate if the changes in dimensions are acceptable from a quality point of view. To evaluate the influence of recycled material on the process capability, parameters  $C_p$  and  $C_{pk}$  have been calculated on Table 4.

**Table 4.**  $C_p$  and  $C_{pk}$  for both materials.

	Raw Material		Recycled Material	
	D1	D4	D1	D4
$C_p$	5.83	10.55	3.873	2.008
$C_{pk}$	2.35	5.09	1.704	1.715

It is commonly accepted in the industry that values of 1.33 for  $C_p$  and  $C_{pk}$  are suitable to consider the process under dimensional control [41]. Therefore, it can be stated that all the dimensions are under the specifications. In the case of raw material,  $C_{pk}$  values are 2.35 for the D1 dimension and 5.09 for D4 dimension. These values are higher enough to consider that more than 99.999998% of the samples are within these limits [42].

For recycled material,  $C_{pk}$  values are 1.704 for D1 dimension and 1.715 for D4 dimension, higher than 1.33, and enough to consider that more than 99.994% of the samples are within limits [42]. Accordingly, with the results obtained in the previous section in which dimensions reduction were higher for samples manufactured with recycled material;  $C_p$  and  $C_{pk}$  values are lower, and, thus, fewer samples are into the specifications. In any case, the value is higher than 1.33 and, so, high enough to make sure the process capability.

Figures 8 and 9 show distribution of the measures for samples injected with raw material. In both cases these measures are quite close around the average value, although they are not centered on the nominal value, according to previous results of reduction of the dimension values after injection molding due to a volumetric shrinkage of the samples. In any case, both dimensions remain under the specifications.

In the case of recycled material, although  $C_{pk}$  values are quite similar for D1 and D4, their distributions are not the same as shown in Figures 10 and 11. D1 distribution of values is much more packed around the average value of the samples and less centered on the nominal value. D4 exhibits the opposite trend, values are more dispersed from the average, but they are more centered on the nominal one. Since the value of  $C_{pk}$  is influenced by both, dispersion and proximity to nominal values [41],  $C_{pk}$  for D1 and D4 remain similar although their distributions are quite different. Molding tools are usually machined with dimensions over the nominal values to try and compensate the volumetric shrinkage of the component during the cooling stage. Therefore, it is possible to obtain dimension values over and under the nominal value for a set of samples injected under the same conditions just depending on their level of volumetric shrinkage induced by the process. D4 dimension can have an over-dimension in the mold cavity higher than the ones for the D1 dimension. It implies that some of

the D4 measures are likely to be higher than the nominal dimension, giving the distribution described in Figure 11. If the overdimension for D1 is lower, it is less probable that D1 measures are over the nominal dimension, as shown in Figure 10.

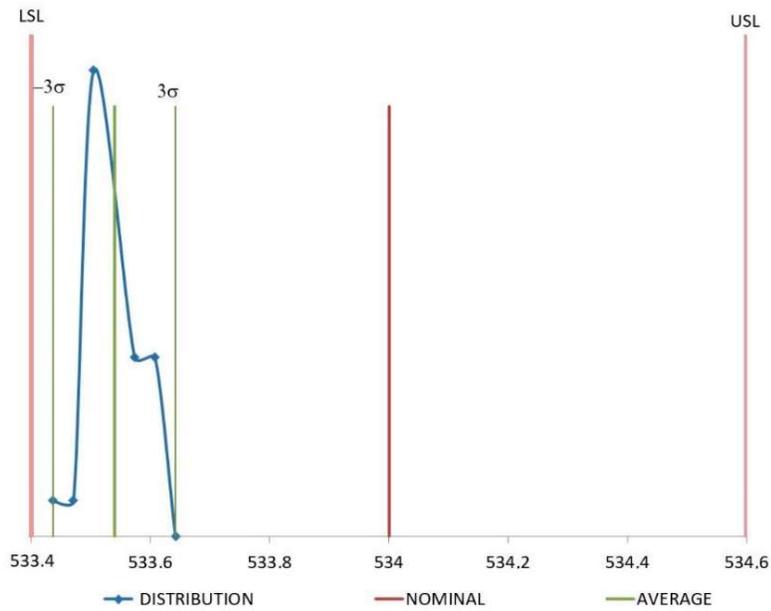


Figure 8. Distribution for D1 (mm) with raw material.

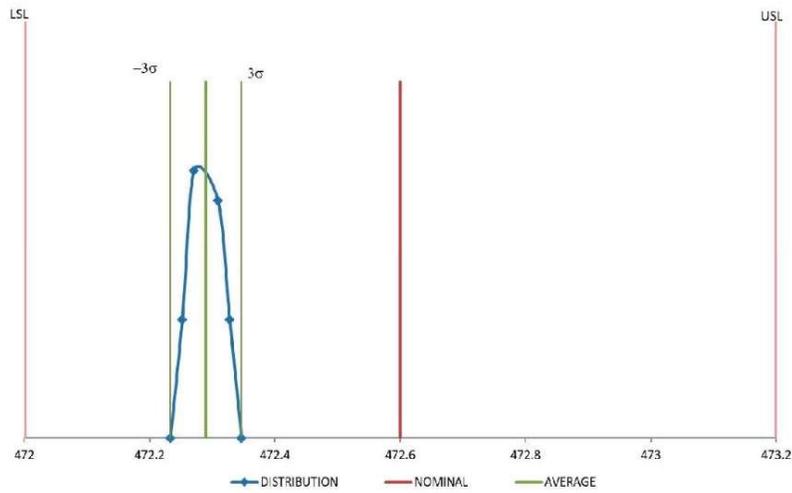


Figure 9. Distribution for D4 (mm) with raw material.

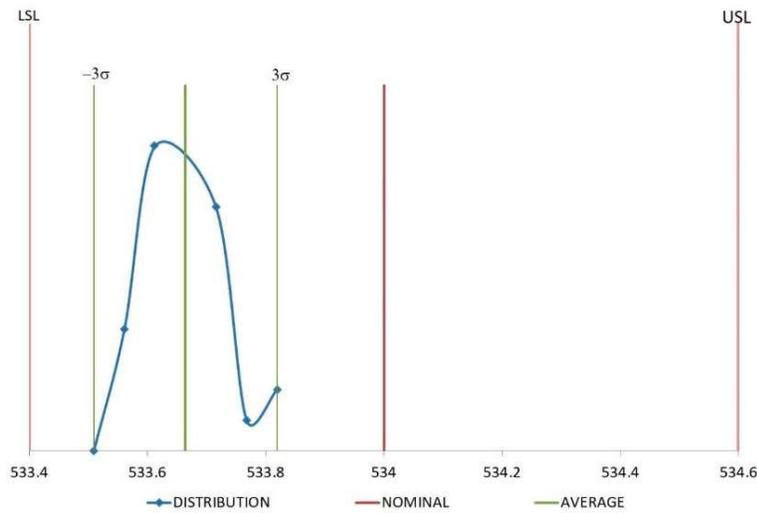


Figure 10. Distribution for D1 (mm) with recycled material.

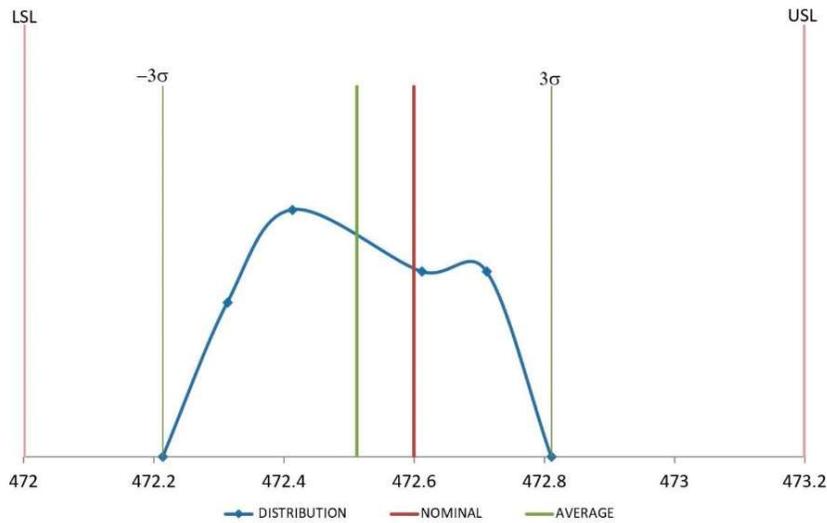


Figure 11. Distribution for D4 (mm) with recycled material.

#### 4. Conclusions

A systematic analysis of the dimensional stability of raw and recycled PP under realistic long-term conditions has been carried out. Variations in key dimensions are determined under manufacturing ejection, storage, and extreme performance conditions. In all the cases dimensions are reduced regarding nominal values due to the volumetric shrinkage of the material according to PVT curves. Not all dimensions exhibit the same behavior. Differences between those with the same nominal value are reported and attributed to a differential cooling and stiffness at different sections of the sample. Scissions of the polymer chains provoke lower Young modulus and higher residual stresses, leading

to lower dimensions in samples manufactured with recycled material. When samples are subjected to realistic conditions involving high temperatures (80 °C), dimensions are lowered more than for conditions at 50 °C. In all the performed tests, dimensional differences between both materials are small, showing that, for this part, recycled PP can be an alternative to raw PP, without affecting its assembly and functionality.

The processing capability of the manufacturing process is higher than the standard value of 1.33 for both raw and recycled material. In spite of the higher differences regarding the nominal value obtained for samples with recycled material, the process capability is adequate for both materials. At this point, recycled ones arise as an alternative for manufacturing from the point of view of the dimensional stability and process capability.

**Author Contributions:** Conceptualization, C.P., Á.F., and C.J.; data curation, J.E.G., I.C., and R.A.; formal analysis, J.E.G., D.E., and I.C.; funding acquisition, C.P. and C.J.; investigation, J.E.G., D.E., I.C., and R.A.; methodology, J.E.G., D.E., and I.C.; project administration, C.P. and C.J.; resources, D.E., C.P., I.C., Á.F., and C.J.; software, J.E.G., I.C., and R.A.; supervision, D.E., C.P., and Á.F.; validation, R.A., Á.F., and C.J.; visualization, D.E. and I.C.; writing—original draft, J.E.G., D.E., and I.C.; writing—review and editing, J.E.G., D.E., and I.C.

**Funding:** The study presented in this paper has been partially supported by the Spanish MINECO under Projects RETO RTC-2014-1847-6 and RTC-2017-5965-6, and has been performed by members of the I+AITIP (DGA-T08\_17R) research group of the FEDER 2014-2020 “Building Europe from Aragón” program, recognized by the Regional Government of Aragón.

**Conflicts of Interest:** The authors declare no conflict of interest. The sponsors had no role in the design, execution, interpretation, or writing of the study.

## References

1. Genis, A.V. Analysis of the Global and Russian Markets of Polypropylene and of Its Main Consumption Areas. *Russ. J. Gen. Chem.* **2017**, *87*, 2137–2150. [CrossRef]
2. Hottle, T.A.; Bilec, M.M.; Landis, A.E. Biopolymer production and end of life comparisons using life cycle assessment. *Resour. Conserv. Recycl.* **2017**, *122*, 295–306. [CrossRef]
3. A European Strategy for Plastics in a Circular Economy. European Commission Environment. Available online: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF) (accessed on 29 November 2018).
4. A European Strategy for Plastics in a Circular Economy (Annexes). European Commission Environment. Available online: [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_2&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_2&format=PDF) (accessed on 29 November 2018).
5. Trica, C.L.; Banacu, C.S.; Busu, M. Environmental Factors and Sustainability of the Circular Economy Model at the European Union Level. *Sustainability* **2019**, *11*, 1114. [CrossRef]
6. De Mattos, C.A.; De Albuquerque, T.L.M. Enabling Factors and Strategies for the Transition Toward a Circular Economy (CE). *Sustainability* **2018**, *10*, 4628. [CrossRef]
7. Cordova-Pizarro, D.; Aguilar-Barajas, I.; Romero, D.; Rodriguez, C.A. Circular Economy in the Electronic Products Sector: Material Flow Analysis and Economic Impact of Cellphone E-Waste in Mexico. *Sustainability* **2019**, *11*, 1361. [CrossRef]
8. Poponi, S.; Colantoni, A.; Cividino, S.R.; Mosconi, E.M. The Stakeholders' Perspective within the B Corp Certification for a Circular Approach. *Sustainability* **2019**, *11*, 1584. [CrossRef]
9. Brown, P.; Bocken, N.; Balkenende, R. Why Do Companies Pursue Collaborative Circular Oriented Innovation? *Sustainability* **2019**, *11*, 635. [CrossRef]
10. Woern, A.L.; Byard, D.J.; Oakley, R.B.; Fiedler, M.J.; Snabes, S.L.; Pearce, J.M. Fused Particle Fabrication 3-D Printing: Recycled Materials' Optimization and Mechanical Properties. *Materials* **2018**, *11*, 1413. [CrossRef] [PubMed]
11. Simões, C.; Costa Pinto, L.; Bernardo, C. Environmental and economic assessment of a road-safety product made with virgin and recycled HDPE: A comparative study. *J. Environ. Manag.* **2013**, *114*, 209–215. [CrossRef]
12. Rajendran, S.; Scelsi, L.; Hodzic, A.; Soutis, C.; Al-Maadeed, M. Environmental impact assessment of composites containing recycled plastics. *Resour. Conserv. Recycl.* **2012**, *60*, 131–139. [CrossRef]

13. Noda, R.; Komatsu, M.; Sumi, E.; Kasakura, T. Evaluation of material recycling for plastics: Environmental aspects. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* **2001**, *3*, 118–125. [[CrossRef](#)]
14. Vo, P.P.; Doan, H.N.; Kinashi, K.; Sakai, W.; Tsutsumi, N.; Huynh, D.P. Centrifugally Spun Recycled PET: Processing and Characterization. *Polymers* **2018**, *10*, 680. [[CrossRef](#)]
15. Mai, V.-D.; Shin, S.-R.; Lee, D.-S.; Kang, I. Thermal Healing, Reshaping and Eco-friendly Recycling of Epoxy Resin Crosslinked with Schiff Base of Vanillin and Hexane-1,6-Diamine. *Polymers* **2019**, *11*, 293. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
16. Galve, J.E.; Elduque, D.; Pina, C.; Javierre, C. Sustainable Supply Chain Management: The Influence of Disposal Scenarios on the Environmental Impact of a 2400 L Waste Container. *Sustainability* **2016**, *8*, 564. [[CrossRef](#)]
17. Yazdanbakhsh, A.; Bank, L.C. A Critical Review of Research on Reuse of Mechanically Recycled FRP Production and End-of-Life Waste for Construction. *Polymers* **2014**, *6*, 1810–1826. [[CrossRef](#)]
18. Devasahayam, S.; Raman, R.K.S.; Chennakesavulu, K.; Bhattacharya, S. Plastics—Villain or Hero? Polymers and Recycled Polymers in Mineral and Metallurgical Processing—A Review. *Materials* **2019**, *12*, 655. [[CrossRef](#)]
19. Achilias, D.S.; Roupakias, C.; Megalokomos, P.; Lappas, A.A.; Antonakou, E.V. Chemical recycling of plastic wastes made from polyethylene (LDPE and HDPE) and polypropylene (PP). *J. Hazard. Mater.* **2007**, *149*, 536–542. [[CrossRef](#)]
20. Aurrekoetxea, J.; Sarrionandia, M.A.; Urrutibeascoa, I.; Maspoch, M.L. Effects of recycling on the microstructure and the mechanical properties of isotactic polypropylene. *J. Mater. Sci.* **2001**, *36*, 2607–2613. [[CrossRef](#)]
21. Kwon, D.E.; Park, B.K.; Lee, Y.-W. Solid-State Foaming of Acrylonitrile-Butadiene-Styrene/Recycled Polyethylene Terephthalate Using Carbon Dioxide as a Blowing Agent. *Polymers* **2019**, *11*, 291. [[CrossRef](#)]
22. Dal Lago, E.; Boaretti, C.; Piovesan, F.; Roso, M.; Lorenzetti, A.; Modesti, M. The Effect of Different Compatibilizers on the Properties of a Post-Industrial PC/PET Blend. *Materials* **2019**, *12*, 49. [[CrossRef](#)]
23. Samper, M.D.; Bertomeu, D.; Arrieta, M.P.; Ferri, J.M.; López-Martínez, J. Interference of Biodegradable Plastics in the Polypropylene Recycling Process. *Materials* **2018**, *11*, 1886. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
24. Javierre, C.; Clavería, I.; Ponz, L.; Aisa, J.; Fernández, A. Influence of the recycled material percentage on the rheological behaviour of HDPE for injection moulding process. *Waste Manag.* **2007**, *27*, 656–663. [[CrossRef](#)]
25. Fernandez, A.; Muniesa, M.; Javierre, C. In-line rheological testing of thermoplastics and monitored device for an injection moulding machine: Application to a raw and recycled polypropylene. *Polym. Test.* **2014**, *33*, 107–115. [[CrossRef](#)]
26. Zheng, R.; Tanner, I.R.; Fan, X. Shrinkage and warpage. In *Injection Molding: Integration of Theory and Modeling Methods*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011; pp. 87–104.
27. Wang, X.; Li, H.; Gu, J.; Li, Z.; Ruan, S.; Shen, C.; Wang, M. Pressure Analysis of Dynamic Injection Molding and Process Parameter Optimization for Reducing Warpage of Injection Molded Products. *Polymers* **2017**, *9*, 85. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
28. Liao, S.J.; Chang, D.Y.; Chen, H.J.; Tsou, L.S.; Ho, J.R.; Yau, H.T.; Hsieh, W.H.; Wang, J.T.; Su, Y.C. Optimal process conditions of shrinkage and warpage of thin-wall parts. *Polym. Eng. Sci.* **2004**, *44*, 917–928. [[CrossRef](#)]
29. Gandhi, U.; Song, Y.Y.; Mandapati, R. Semiempirical approach to predict shrinkage and warpage of fiber-reinforced polymers using measured material properties in finite element model. *J. Thermoplast. Compos. Mater.* **2017**, *30*, 1303–1319. [[CrossRef](#)]
30. Jiang, Q.; Liu, H.; Xiao, Q.; Chou, S.; Xiong, A.; Nie, N. Three-dimensional numerical simulation of total warpage deformation for short-glass-fiber-reinforced polypropylene composite injection-molded parts using coupled FEM. *J. Polym. Eng.* **2017**, *38*, 493–502. [[CrossRef](#)]
31. Barghash, M.A.; Alkaabneh, F.A. Shrinkage and Warpage Detailed Analysis and Optimization for the Injection Molding Process Using Multistage Experimental Design. *Qual. Eng.* **2014**, *26*, 319–334. [[CrossRef](#)]
32. Khanjanzadeh, H.; Tabarsa, T.; Shakeri, A. Morphology, dimensional stability and mechanical properties of polypropylene-wood flour composites with and without nano clay. *J. Reinf. Plast. Compos.* **2017**, *31*, 341–350. [[CrossRef](#)]
33. De Carvalho Fernandes, A.; Fagali De Souza, A.; Leite Howarth, J.L. Mechanical and dimensional characterisation of polypropylene injection moulded parts in epoxy resin/aluminium inserts for rapid tooling. *Int. J. Mater. Prod. Technol.* **2016**, *52*, 37–52. [[CrossRef](#)]

34. Kusumoto, N.; Takata, K.; Kurimoto, Y. Mechanical Properties and Dimensional Stabilities of Wood-Polypropylene Composites Prepared Using Mechanochemically Acetylated Japanese Cedar (*Cryptomeria japonica*) Wood Meal. *BioResources* **2016**, *11*, 3825–3839. [CrossRef]
35. Li, S.; Zhao, G.; Wang, J. A method to improve dimensional accuracy and mechanical properties of injection molded polypropylene parts. *J. Polym. Eng.* **2017**, *37*, 323–334. [CrossRef]
36. Castany, F.J.; Serraller, F.; Clavería, I.; Javierre, C. Methodology in gas assisted injection Molding. *J. Mater. Process. Technol.* **2003**, *143–144*, 214–218. [CrossRef]
37. Nian, S.C.; Wu, C.Y.; Huang, M.S. Warpage control of thin-walled injection molding using local mold temperatures. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* **2015**, *61*, 102–110. [CrossRef]
38. Bergeret, A.; Pires, I.; Foulc, M.P.; Abadie, B.; Ferry, L.; Crespy, A. The hygrothermal behavior of glass-fibre-reinforced thermoplastic composites: A prediction of the composite lifetime. *Polym. Test.* **2001**, *20*, 753–763. [CrossRef]
39. Ozelik, B.; Erzurumlu, T. Comparison of the warpage optimization in the plastic injection moulding using ANOVA, neural network model and genetic algorithm. *J. Mater. Process. Technol.* **2006**, *171*, 437–445. [CrossRef]
40. Mehat, N.M.; Kammarudin, S. Optimization of mechanical properties of recycled plastic products via optimal processing parameters using the Taguchi method. *J. Mater. Process. Technol.* **2011**, *211*, 1989–1994. [CrossRef]
41. Kotz, S.; Johnson, N.L. *Process Capability Indices*, 1st ed.; Chapman and Hall/CRC: London, UK, 1993; pp. 43–74.
42. Patel, S. *The Tactical Guide to Six Sigma Implementation*, 1st ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2016.
43. Negri Bossi Products. Available online: [https://www.negribossi.com/wp-content/uploads/VECTOR-depliant\\_Negri-Bossi\\_2016-10-3-1.pdf](https://www.negribossi.com/wp-content/uploads/VECTOR-depliant_Negri-Bossi_2016-10-3-1.pdf) (accessed on 15 January 2019).
44. Clavería, I.; Elduque, D.; Santolaria, J.; Pina, C.; Javierre, C.; Fernández, A. The influence of environmental conditions on the dimensional stability of components injected with PA6 and PA66. *Polym. Test.* **2016**, *50*, 15. [CrossRef]
45. Zeiss Coordinate Measuring Machines. Available online: <https://www.zeiss.com/metrology/products/systems/coordinate-measuring-machines.html> (accessed on 15 January 2019).
46. Zeiss Tactile Scanning Probes. Available online: <https://www.zeiss.com/metrology/products/sensors/on-cnm/tactile-scanning-probe.html> (accessed on 15 January 2019).
47. Zeiss Calypso—Measuring Software for Geometry. Available online: <https://www.zeiss.com/metrology/products/software/calypso-overview/calypso.html> (accessed on 15 January 2019).
48. Rogueda-Berriet, C.; Bahlouli, N.; Pessey, D.; Rémond, Y. Mechanical Behavior of Recycled Polypropylene Composites Under Tensile, Bending, and Creep Loading: Experimental and Modeling. *J. Eng. Mater. Technol.* **2011**, *133*, 030907. [CrossRef]
49. Incamato, L.; Scarfato, P.; Acierno, D. Rheological and mechanical properties of recycled polypropylene. *Pol. Eng. Sci.* **1999**, *39*, 749–755. [CrossRef]
50. Katmer, S.; Esen, H.; Kataras, C. Residual stresses in injection molded shape memory polymer parts. In Proceedings of the 31st International Conference of the Polymer Processing Society, Jeju Island, Korea, 7–11 June 2015; AIP Publishing LLC: Melville, NY, USA, 2016.
51. Kallel, A.; Lamraoui, M.; Fitoussi, J.; Tcharkhtchi, A. The Residual Stress Effect on the Shape Memory Polymers. *Mater. Res. Proc.* **2016**, *2*, 151–156. [CrossRef]
52. Altan, M.; Yurci, M.E.; Nugay, M. Residual stresses determination in injection molded virgin and recycled HDPE blends: Mechanical properties and morphology. *e-Polymers* **2008**, *8*, 170. [CrossRef]
53. Valenza, A.; La Mantia, F.P. Recycling of polymer waste: Part II—Stress degraded polypropylene. *Polym. Degrad. Stab.* **1988**, *20*, 63–73. [CrossRef]
54. González-González, V.A.; Neira-Velázquez, G.; Angulo-Sánchez, J.L. Polypropylene chain scissions and molecular weight changes in multiple extrusion. *Polym. Degrad. Stab.* **1998**, *60*, 33–42. [CrossRef]
55. Sun, X.; Su, X.; Tibberham, P.; Mao, J.; Tao, J. The application of modified PVT data on the warpage prediction of injection molded part. *J. Pol. Res.* **2016**, *23*, 86. [CrossRef]



© 2019 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Home > Journal profile

JCR YEAR  
2019

# Polymers

Open Access since 2009

ISSN

N/A

EISSN

2073-4360

JCR ABBREVIATION

POLYMERS-BASEL

ISO ABBREVIATION

Polymers

## Journal information

EDITION

Science Citation Index Expanded (SCIE)

CATEGORY

POLYMER SCIENCE - SCIE

LANGUAGES

English

REGION

SWITZERLAND

1ST ELECTRONIC JCR YEAR

2012

## Publisher information

PUBLISHER

MDPI

ADDRESS

ST ALBAN-ANLAGE 66,  
CH-4052 BASEL,  
SWITZERLAND

PUBLICATION FREQUENCY

12 issues/year

## Journal Impact Factor

The Journal Impact Factor (JIF) is a journal-level metric calculated from data indexed in the Web of Science Core Collection. It should be used with careful attention to the many factors that influence citation rates, such as the volume of publication and citations characteristics of the subject area and type of journal. The Journal Impact Factor can complement expert opinion and informed peer review. In the case of academic evaluation for tenure, it is inappropriate to use a journal-level metric as a proxy measure for individual researchers, institutions, or articles.

Learn more

2019 JOURNAL IMPACT FACTOR

3.426

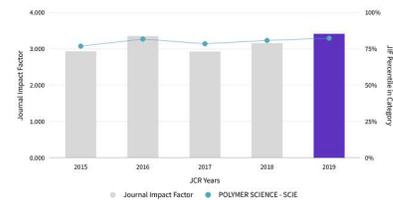
View calculation

JOURNAL IMPACT FACTOR WITHOUT SELF-CITATIONS

2.810

View calculation

## Journal Impact Factor Trend 2019



View all years

## Journal Impact Factor contributing items

Citable Items (2,132)

Citing Sources (1,138)

TITLE	CITATION COUNT
Electrical and Electrochemical Properties of Conducting Polymers	66
Properties and Applications of the beta Phase Poly(vinylidene fluoride)	39
Chitosan and its Derivatives for Application in Mucoadhesive Drug Delivery Systems	35
Thermal Conductivity of Graphene-Polymer Composites: Mechanisms, Properties, and Applications	35
Effect of High Salt Concentration (HSC) on Structural, Morphological, and Electrical Characteristics of Chitosan Based Solid Polymer Electrolytes	34
The Recent Developments in Biobased Polymers toward General and Engineering Applications: Polymers that Are Upgraded from Biodegradable Polymers, Analogous to Petroleum-Derived Polymers, and Newly Developed	33
Block Copolymers: Synthesis, Self-Assembly, and Applications	32
Hydrogel Based Sensors for Biomedical Applications: An Updated Review	31
Fluorinated Polymers as Smart Materials for Advanced Biomedical Applications	29
pH Sensitive Hydrogels in Drug Delivery: Brief History, Properties, Swelling, and Release Mechanism, Material Selection and Applications	27

View in Web of Science

## Rank by Journal Impact Factor

Journals within a category are sorted in descending order by Journal Impact Factor (JIF) resulting in the Category Ranking below. A separate rank is shown for each category in which the journal is listed in JCR. Data for the most recent year is presented at the top of the list, with other years shown in reverse chronological order. Learn more

EDITION

Science Citation Index Expanded (SCIE)

CATEGORY

POLYMER SCIENCE

16/89

JCR YEAR	JIF RANK	JIF QUANTILE	JIF PERCENTILE
2020	18/88	Q1	80.11
2019	16/89	Q1	82.58
2018	17/87	Q1	81.03
2017	19/87	Q1	78.74
2019	16/89	Q1	82.58



# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology: Life Cycle Assessment of a Plastic Part Injected with Recycled Polypropylene. A Comparison with Alternative Virgin Materials

International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology  
<https://doi.org/10.1007/s40684-021-00363-2>

Online ISSN 2198-0810  
 Print ISSN 2288-6206

REGULAR PAPER



## Life Cycle Assessment of a Plastic Part Injected with Recycled Polypropylene: A Comparison with Alternative Virgin Materials

José Eduardo Galve<sup>1</sup> · Daniel Elduque<sup>2</sup> · Carmelo Pina<sup>1</sup> · Carlos Javierre<sup>2</sup>

Received: 12 January 2021 / Revised: 22 March 2021 / Accepted: 3 May 2021  
 © Korean Society for Precision Engineering 2021

### Abstract

Plastics recycling is becoming a common action to reduce our products and processes' environmental impact, and it is of the utmost importance to introduce circular economy strategies. However, for most of the different types of thermoplastics, recycling is not currently its usual end of life due to the technical difficulties in the sorting and recycling processes. This paper presents the complete life cycle assessment of an industrial component made with three different thermoplastics; two virgin thermoplastics typically used for similar parts in the market as Polyamide 6 and Polypropylene, and an alternative source of 100% recycled Polypropylene. All life cycle stages are included in the study. After carrying out the life cycle inventory, calculations of the environmental impact of each life cycle steps have been performed with ReCiPe 2016 EndPoint (H/A) v1.03/World and with IPCC 2013 GWP 100a v1.03 methodologies, comparing all three materials under the same conditions. A sensibility assessment has also been performed, calculating a worst-case scenario of the recycled material, and considering higher material acquisition distances. This study shows that recycled Polypropylene contributes to reducing the overall environmental impact of the component life cycle by 29.8% under ReCiPe, and by 42.8% under Carbon Footprint when compared to virgin Polypropylene. For the worst-case scenario, these reductions in the environmental impact of the component life cycle are also significant: 23.2% and 36.4%, respectively, showing that the use of recycled polymers is a key approach to reduce the environmental impact of plastic components.

**Keywords** Life cycle analysis · LCA · Recycling · Polypropylene · Injection · Post-industrial · Induction hobs

### Abbreviations

EEA	European economic area
EOL	End of life
ErP	Energy-related products
EuP	Energy-using products
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Life Cycle Assessment

PA	Polyamide
PP	Polypropylene
REACH	Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals
REAPro	Resource efficiency assessment of products
RoHS	Restriction of hazardous substances
WEEE	Waste electrical and electronic equipment

✉ Daniel Elduque  
 delduque@unizar.es

José Eduardo Galve  
 jose.galve@bshg.com

Carmelo Pina  
 carmelo.pina@bshg.com

Carlos Javierre  
 carlos.javierre@unizar.es

<sup>1</sup> BSH Electrodomésticos España, S.A. Avda. de La Industria, 49, 50016 Zaragoza, Spain

<sup>2</sup> i+AITIP, Department of Mechanical Engineering, EINA, University of Zaragoza, María de Luna 3, 50018 Zaragoza, Spain

## 1 Introduction

The consumption of plastic materials, especially polypropylene, has increased exponentially in recent decades, and it is now stabilized in its historic maximum [1]. This growth is due to the increase in technological possibilities for this type of material, the rise of consumption in society, and the new manufacturing techniques as additive manufacturing [2–4]. This culture of consumism makes it necessary to establish sustainable environmental management that optimizes the collection, separation, and handling of waste [5], but it also minimizes its use by modifying the social perception of

when it should be used [6] and the affections it causes [7]. Otherwise, some studies foresee an unsustainable situation in the medium term [8], both because of the accumulation of waste [9], and because of the significant environmental impact of certain specific materials [10].

Consumer electronics, household appliances, and other large electrical devices account for much of the waste [11]. These appliances are often challenging to treat and require specialized treatment capable of separating materials that is not always carried out [12]. This is why the European Union published the Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive [13], which promotes the recycling, recovery, and even the reuse of materials from these appliances; and the WEEE2 [14], which classifies and differentiates between appliances and components. It takes into account both internal components and packaging waste.

WEEE and WEEE2 are complemented by the European Directives on Registration, Evaluation, Authorization, and Restriction of Chemicals (REACH) [15] and the one addressing Restriction of Hazardous Substances (RoHS) [16], as well as the RoHS2 [17], which control the use of hazardous raw materials in electrical and electronic equipment.

Since 2019, the European Union has taken a more active role in defining a framework for the member countries' environmental activities [18]. This framework is to be transformed into an action plan to make the Union economies part of the environmental transformation [19].

All these restrictions applied by the European Union affect directly to the product design process. These limitations are mainly focused on energy consumption and the availability of the required documentation to establish the compliance with each regulation [20]. The trend of product design considering environmental impact, also known as ecodesign [21], includes the environmental impact as another factor when making design decisions [22, 23], affecting the choice of raw materials, manufacturing processes [24], assembly and disassembly methods [25, 26]. The choice of less polluting materials means less impact in terms of raw materials, but it must be accompanied by the objective of reducing the overall impact in all activities of the design [27]. One of the options proposed by ecodesign to reduce the environmental impact is facilitating the separation and identification of materials and its recyclability. The ecodesign criteria recommend the use of dismountable joints whenever possible, as Maitre-Ekern and Dalhammar [28], proposed as prevention against planned obsolescence. This also benefits the working time in the treatment centers and the their cost.

These environmental design criteria, put into practice at the end of the appliance's life, favors the trend towards "0 landfill" [29], which implies that all the materials that make up a product should be reusable or recoverable and

recyclable [30]. The European Union has also promoted strategies to push circular economy, and the valorization of plastic components [31, 32], and, therefore, companies are starting to define strategies to introduce circular economy in their business [33].

In the European Union there are laws such as the Energy-using Products (EuP) [34] and the Energy-related Products (ErP) [35] that establish ecodesign requirements for products, especially regarding energy-efficiency. More ambitious approaches have been analyzed by some authors, such as Kiling et al. [36], which proposes a method to integrate functional, economic, and environmental assessments to comply with legislation and achieve even more environmentally conscious designs.

Ecodesign is also directly related to the circular economy that studies the use and valuation of waste [37] and its effect on both the environmental and economic impact [38, 39]. Other authors, such as Ungerman, study circular economy models applied to business models [40]. The materials recovered and reused, either in their original form or treated later, can reduce the problem of the amount of waste originated from consumption. It has been shown that energy intake is also lower in the recycling of certain elements concerning the energy required for their primary extraction [41].

EBA producers and recyclers can share information on materials used due to the methodology proposed in the technical report published by the International Electrotechnical Commission, IEC/TR 62635:2012 [42]. Thanks to this information exchange, more appropriate end-of-life (EOL) treatments can be used [43, 44]. It also allows the calculation of a recyclability index and recovery rate of raw materials [45]. After that, the user can select the most appropriate working methods and the most significant components to recover. On the other hand, the REAPro method was proposed by the European Union to evaluate resource efficiency, identify critical points, and improve potentials [46].

Thermoplastic materials with fillers have different characteristics that make them difficult to reuse and use them again as raw materials [47], and are specified in the design and manufacturing processes, either by their aesthetic finish or by their characteristics and physical properties [48].

Plastic materials can be recycled through two processes that can be compared in terms of results and their environmental impact: mechanical recycling and chemical recycling [49].

When recycling plastic by mechanical methods, the most critical step is the sorting process, as studied by Peeters with the case of different technologies of a single product [50]. Different polymers cannot be mixed if the objective is to obtain a recycled polymer with similar characteristics to the virgin one [51]. The same applies to fillers, binders, and additives, which must be taken into account when classifying and separating materials [52]. To start with, this material

has to be characterized in order to know the starting properties to be, then, crushed into small pieces and fed into the extruder. The size and shape of the raw material shaped in the form of chippings are critical for the recovery process and the industrialization of the procedure as described in the recycling process and installation patented by Rialti SpA [53]. The main sources of recycled material are textile fiber scraps and industrial waste. This procedure also includes mixing it with the necessary additives and fillers in the final product. The step in which these fillers are added to the raw material determines the result and affects water and energy consumptions. These materials or compounds are necessary to stabilize properties such as fluidity, flame resistance, or mechanical strength, among others. The mixture is made by adjusting the starting material so that the resultant one offers the properties stipulated for the final product.

Chemical recycling does not require the proper cleaning of the components to be processed, not even the total separation of the plastics, which reduces the pre-treatment separation costs. This process is much newer and less technologically and industrially developed [54]. It decomposes the materials into monomers or shorter chains than the starting polymers [55], which can be used for the subsequent polymerization into new thermoplastics.

The result of the recycled material will be a new compound, recycled by mechanical means, with physical properties (mechanical, rheological), that allows the material to be a substitute of the materials recycled to obtain it [56].

Depending on the origin of the thermoplastic wastes, two main groups can be described. Post-consumer and post-industrial materials.

Post-consumer materials are those extracted from waste separation, that is, materials from cities or companies that are, subsequently, separated in specific waste treatment facilities [57]. The separation is usually done manually, as the different thermoplastics on the market may be similar in density or vary in their properties depending on the additives. Some materials, such as polyethylene terephthalate (PET) used in commercial bottles or containers, are easily identifiable and recyclable since their use is widespread for certain products [58, 59].

Another source of post-consumer materials is the one of product recovery. Appliances such as household ones, air conditioners, telephones, etc., are managed mainly in two ways. Either they are taken to specialized treatment centers [60] where the different components are separated according to their material [61] and their recovering feasibility; or they are crushed and separated later, looking for the most valuable materials and separating the rest. The materials obtained by separation in specialized centers are considered to be of better quality and purity than those extracted in the separation of domestic waste [62]. But even so, they are unreliable as they can be subject to human error or cross-contamination [63]. The

common agreement is that this is still a field with significant room for improvement [64].

Post-industrial materials are those that come from industrial processes, so their traceability is easier [65], and are derived from excess production, product non-conformities, or other causes of waste in a product's manufacturing process which are not reusable in its primary process [66].

ISO 14040 [67] defines the principles and framework of the LCA for a product. These principles include the definition of the scope, the limitations of the assessment, and the interpretation phase. In addition, the requirements and guidelines for the study are listed under the standard ISO 14044 [68].

The LCA methodology has been successfully applied to assess the impact of PP manufacturing [69] or other materials [70]. The methodology can also reveal the significant phases in which the impact can be identified and reduced, such as the study carried by Zhang et al. on the minimization of the environmental impact by optimizing the cutting parameters [71]. For example, this approach has also been implemented to reveal the most critical areas where not all inventory information is available thanks to sensitivity analyses [72]. Alternative use of the LCA aims to compare design solutions and the impact within the whole life cycle, such as the definition of the manufacturing material [73, 74].

There are many examples of current LCA applied to assess the impact of products [75, 76] or processes [77–79]. Industry and its processes can also be assessed in order to analyze the impact on resources [80, 81] or industrial scenarios [82, 83], and are primarily related to energy production [84, 85] and consumption [86, 87]. LCA can also be mixed with economic factors to include in the development decisions [36].

This paper will analyze the environmental impact of a functional unit depending on the material used. One of the proposed alternatives studied is 100% recycled, while the other two are different virgin thermoplastic alternatives commonly used for the same purpose. PA6 and PA66 have been widely applied to electronic housings. However, they are being replaced by other thermoplastics like PP due to economic reasons. Product designers modified the first concepts used in induction hobs to reduce the mechanical requirements of the materials. In the case of BSH cooktops, introducing a metallic chassis allowed the use of materials with lower mechanical properties, so PP replaced PA6 in most induction cooktops a few years ago after a comprehensive study to prove the feasibility of the material.

## 2 Materials and Methods

To validate the suitability of using recycled materials, two counter-type materials are studied. In this case, polypropylene with 40% talc and HB fire resistance characteristics,

which is the least flame retardant rating defined by a slow burning on a horizontal part. The comparison begins with rheological tests, and after confirming that both materials are comparable, samples for testing are injected [88]. Lifetime and release tests are carried with the test samples. This comparison aims to establish that the properties of the recycled material are similar to those of the virgin material in order to study the environmental impact of the part manufactured with both raw materials.

After a brief comparative study, it was found that virgin and recycled material shared the range of mechanical and rheological characteristics required so that both were interchangeable (Table 1).

In the comparative environmental impact study, the functional unit is also analyzed with unfilled Polyamide 6.

## 2.1 LCA Methodology

The comparison and analysis of the environmental impact were carried out by means of a LCA based on ISO 14040 [67] and 14044 [68], and following the ReCiPe 2016 EndPoint (H/A) v1.03/World (2010) methodology. This approach allows the comparison of the environmental impact on different areas, and the different impact categories are weighted and unified into a single value. This study's result offers a comparable result among different materials, products or services [89].

The study also calculates the Carbon Footprint following the IPCC 2013 GWP 100a v1.03 methodology. This method is also commonly used because of its social relevance, as countries should try to reduce their greenhouse gas (GHG) emissions in order to limit global warming and minimize its negative impact on ecosystems, food security, cities, and so forth [90, 91].

### 2.1.1 Goal and Scope Definition

This study aims to compare the environmental impact associated with the manufacture of a plastic component present in the induction cooktops of a home appliance manufacturer. The study includes an analysis of three different raw materials and will also analyze the influence of the raw materials

on the functional unit's impact, the manufacturing processes, distribution, and its end of life (EOL).

### 2.1.2 Functional Unit

The environmental impact study of the recycled polypropylene was carried out on an injected component used in the 6<sup>th</sup> generation of induction cooktops manufactured by the home appliance producer. This component is defined in polypropylene with 40% talc, and the impact of its variant on unfilled PA6 is also analyzed.

The part is then injected with three raw materials. Two polypropylene references from different suppliers and one PA6. Its dimensions are 534×460×35mm, with a thickness of 1.8 mm (Fig. 1). In order to focus on the impact of the material and the processing, the functional unit is defined as one injected part, delivered to the final consumer, and including the EOL.

This part houses different power electronic boards and manages the electrical routing required for the correct performance of the appliance.

Due to the assembly's design, the efforts of the part and, therefore, its mechanical requirements are minimized. Its working position is fixed on a metal component that supports

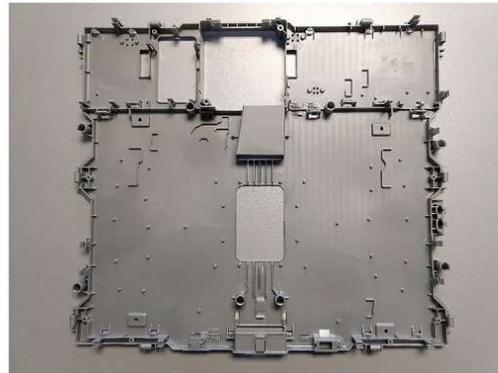


Fig. 1 Plastic component injected in virgin PP

Table 1 Material properties

	PA6	Virgin PP	Recycled PP
Density [g/cm <sup>3</sup> ]	1.16	1.24	1.25
Tensile modulus [MPa]	3400	4200	4000
Tensile Strength at yield [MPa]	60	32	27
Tensile Strength at break [MPa]	70	30	25
Heat Deflection Temperature 1.82 MPa [°C]	185	78	75
Filler %	0	40	40
Melt flow rate (MFR) (230 °C 2.16 kg) [g/10 min]	40	11	9.5

the mechanical stresses made by the components' weight and the compression of the internal springs. This makes it possible to use a thermoplastic with inferior mechanical characteristics and lower price compared to the PA6, which was traditionally used for this type of parts. The maximum temperature measured in the part in cases of extreme use is 73 °C, so even thermal stresses do not require the use of special technical materials. In fact, those with higher use-temperature specifications are needed in other parts of the hob due to the higher temperatures reached.

### 2.1.3 System Boundaries

The LCA limits are established from obtaining the raw material and its manufacture to its transport to the induction cooktop factory in Zaragoza (Spain) where it is assembled. After the complete appliance assembly, it is considered a road distribution by full truck according to the percentages of distribution by countries given by the home appliance producer. The main destination countries are, among others: Germany, France, Spain, and The United Kingdom. In the calculation of the environmental impact, the average route followed by an appliance is calculated (Fig. 2).

### 2.1.4 Inventory Data, Cut-Off Criteria, and Assumptions

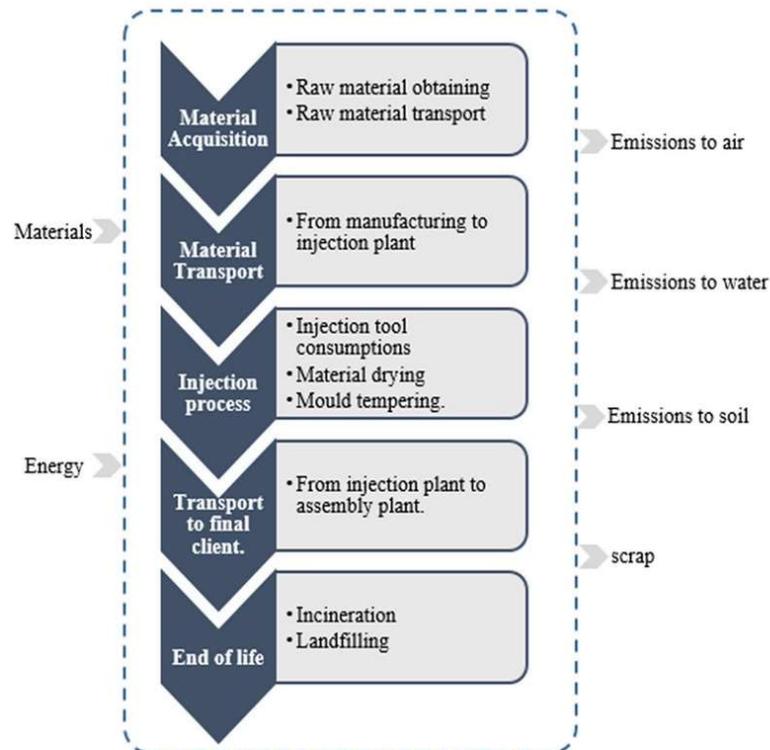
Both polypropylene materials are injected under similar conditions, the same injection machine and the same mold. The injection parameters used are the same. The variant manufactured in PA6 uses the same tools, but it is adapted to the raw material requirements such as drying and injection parameters.

Manufacturing data for virgin PA and PP are extracted from the Plastics Europe publications on plastics production in Europe [92]. Both materials are manufactured in Europe and, therefore, this data is representative for calculations and comparisons with recycled PP, whose calculation is the purpose of the paper.

The environmental impact value of virgin polypropylene is combined with the one of talc, which supposes up to 40% in terms of weight; being both values obtained from the Ecoinvent datasets.

To know exactly the energy consumption of the process, the machine's consumption during the automatic injection process has been measured (Fig. 3) with a Circutor C80 power analyzer [93].

**Fig. 2** System boundaries description with assessed steps, inputs, and outputs



All calculations have been made with the SimaPro 9 software [94] and the EcoInvent database v3.5 [95]. The impact of the energy mix used is also calculated according to the country where the process takes place in.

### 3 Life Cycle Inventory

All the processes involved in the life-cycle of the functional units assessed are broken down into single processes that can be quantified and compared. The impact of these simple processes can be quantified thanks to material or process datasets, and will be later used for calculating the real impact of the functional unit.

Information for material or thermoplastic recycling is not included in such datasets and, therefore, it has been calculated in detail as the required data is available from the recycled material producer. This manufacturer of recycled raw materials has consumption measurements at all points of its manufacturing process to be accurate.

#### 3.1 Polymer Manufacturing and Transportation to the Injection Plant

Values of the environmental impact of the virgin raw materials included in the assessment are obtained from an EcoInvent dataset based on Plastics Europe data [92]. However, transport values and distances are defined according to the real situation of induction cooktop components. Distances are selected from current suppliers of both raw materials and injected parts.

The manufacture of recycled material begins with the identification and transport of post-industrial raw material sources. These materials are transported to the producer by freight trains, freight ships and "> 32 metric ton" trucks; depending on the origin of the post-industrial material. In this case, the manufacturing process of recycled

polypropylene with 40% talc and HB flame resistance has been studied (E-RIALFILL H 07 40 T).

Firstly, it is established that the manufacturing process is the result of mixing three sources:

- Ground material, crushed and stored on the premises until use.
- Scrap from internal manufacturing processes that are not compliant but recoverable.
- Masterbatch, fillers, stabilizers, and other components needed to obtain the specified product.

Materials with these three different origins are mixed in adequate proportions according to the manufacturer's expertise.

Under the description given in the patented process [53], the material is treated to allow its further treatment and to increase the efficiency of processing. Nevertheless, the complete diagram is not included due to the confidentiality agreement reached with the company.

The thermoplastic sources from the first points are homogenized and, if necessary, crushed to obtain sizes and shapes admissible by subsequent processes.

The quantities defined for each type of material are loaded into the production line, where they are extruded, cooled down, and cut. According to the technical data sheet, the result is 100% recycled material with mainly mechanical and other physical characteristics (Fig. 4). These properties are adjusted for each production batch according to the results of the previous analysis of the raw material in the input warehouse.

SCADA systems control each point in the manufacturing process so that there is total traceability both in terms of quantities of material and the energy which contributed to the system; and the result of the line in the final product, line stoppages, and inefficiencies. These systems are used to control processes parameters at a distance.

**Fig. 3** Power consumption measurement in injection facilities. Detail of the power analyzer connection



**Fig. 4** Post-industrial waste converted to recycled raw material compound



The quantities of material supplied by each of the dosing units of the extrusion line analyzed and, therefore, the composition of the recycled material, can be broken down as follows:

- 55% PP,
- 40% Talc,
- 2% Carbonates,
- 3% Masterbatch: additives, lubricant, stabiliser, etc.

For confidentiality reasons, we cannot specify the materials supplied as masterbatch in full detail, which are within the manufacturer's knowledge. These materials will be taken into account for the calculation of the environmental impact, but the manufacturing process will not be fully detailed.

The average production range of recycled raw materials with the defined manufacturing process is between 3000 and 4000 kg/h, while the average energy consumption is between 0.2 and 0.3 kWh/Kg. As said, although the calculations are made with exact values, they are not shown to protect the confidentiality of the process.

These values are obtained as the average calculated from the supplier's data during average production.

Once the material is manufactured, it travels from the supplier by truck to the injection plant. There it is stored in silos for later use. In all cases, it is considered a full "> 32 metric ton" truck transport. The transport distances considered for each of the assessed materials are 1295 km for PA6, 1477 km for virgin PP and 1272 km for recycled PP.

To calculate the value of the recycled PP, it has been considered that the primary raw material has neither a positive, nor a negative impact in itself since it is a material that would have ended up in a landfill or incinerated. However, the transport to the recycling plant does generate an impact, just as the electrical energy or other sources do, such as transport and auxiliary components necessary to calculate the total impact of the material produced in the plant.

### 3.2 Injection Molding Process

Once the impact of the raw materials is known, it is introduced into the analysis of the whole piece defined in the scope of the study.

The injection process uses the same mould and injection machine Engel Duo 550 [96] for all three materials. The differences in the process will be only those related to the specific raw material. These differences are analyzed, including the consumption of the necessary instrumentation.

In order to evaluate this process, electricity consumption measurements were collected during the injection of the various materials.

To avoid consumption peaks that would distort the measurement obtained, they have been carried out with the previously detailed equipment for periods of several hours in automatic mode [97].

The results attained are compared per injected part, as the density of both materials is slightly different, which means a variation in the final weight of the piece (Table 2). Data of the energy consumption of the PA6 processing includes the consumption during the drying of the material necessary before the injection.

### 3.3 Transportation to the Assembly Plant and the Customers

After the injection process, the part is manually handled for packaging and subsequent shipment. The supplier that injects the part is located at a distance of 9 km from the manufacturer's induction cooktop assembly plant in Montañana, Zaragoza. A "> 32 metric ton" milk-run truck, shared with other components, does this transportation to the assembly plant.

After the assembly of the appliances, the distribution scenario of the final product is considered in all cases, but the different weight of each part is taken into account. Freight trains, freight ships, and "> 32 metric ton" trucks,

**Table 2** Injection process

	PA6	Virgin PP	Recycled PP
Weight [g]	563.00	620.00	615.00
Temperature [°C]	255 °C	220 °C	240 °C
Cycle time [s]	51.4	38	39
Energy consumption [kWh/kg]	0.901	0.590	0.601
Energy consumption [kWh/part]	0.507	0.358	0.370
Closing force [Tons]	550	550	550

are used depending on the country of destination. The distances are obtained as the average of the values given by the logistics department of the home appliance manufacturer, and represent the average, in km, carried out by an average worktop. This value has been weighted according to the volume of worktops sent to each country.

### 3.4 End of Life

The EOL of the device and its components are considered and, for this purpose, the average values for recovery and disposal according to IEC-TR 62635 [42] are also taken into account. These values state different percentages of recycling, landfill disposal, or incineration for each raw material type.

As the part under study will be treated with the EOL of the product (an induction hob), and the most typical EoL treatment is shredding, it has been considered that the part will not be recycled. The IEC-TR 62635 considers non-recyclable plastic parts with filling, as these materials are required to be manually separated, a scenario that is not always fulfilled. Therefore, the most restrictive scenario has been considered, with 5% incineration and 95% landfilling, as proposed by IEC-TR 62635.

## 4 Results

Results compare the impact under both methodologies. The different materials are presented broken into the different processes studied. Firstly, a base case is assessed comparing the results of the functional unit (one injected part, delivered to the final consumer, and including the EOL) under the three different raw materials at each step of the complete process.

Once differences are analyzed, a worst-case is defined and assessed in order to evaluate the variation of the results under different conditions.

**Table 3** ReCiPe impact of one injected part delivered to the final consumer and including the EOL

ReCiPe [mPt]	PA6	Virgin PP	Recycled PP
Material production	130.21	29.15	11.29
Material transport	2.13	2.61	2.29
Injection moulding process	9.38	6.83	7.04
Transport to final client	8.57	9.23	9.36
EOL	10.66	11.48	11.65
Total	160.95	59.3	41.63

### 4.1 Base Scenario Results

After assessing the functional unit, results show a reduction in the overall values of the ReCiPe environmental impact of 29.8% compared to virgin material and 74.1% compared to PA6. This aggregated reduction will be separated into different processes to obtain a better insight into the reduction potential in each situation.

The same process is held with IPCC or Carbon Footprint. The reduction of the impact when using recycled materials represents 42.8% compared to virgin materials and 81.2% with PA6.

After the required calculation of the single material impact, the analysis compares the impact of the functional units' complete life cycles in the three different cases.

Using recycled material reduces the environmental impact in comparison with virgin alternatives. Breaking the result down on the different stages of the process included in the inventory is possible to know each process's contribution to the complete impact (Table 3).

The main impact relates to the production of the raw material. The production of PA6 is significantly higher compared to the production or recycling of the PP but, in all cases, it represents the highest percentage of the result. For virgin PP material production represents 48% of the impact, 81% for PA6, and only 27% for recycled PP.

The relevance of the transport processes is remarkable. Adding all affected transportation, the accumulated portion of PA6 transportation is 6% lower due to the higher overall impact. For the virgin ones, PP represents 20%, and for recycled PP 28%. This explains the significant impact of transport-related processes [98]. However, this impact can be reduced by either selecting closer sources of materials and suppliers or improving transport selection [99]. Transportation impact is also affected by the weight of the functional unit. PA6, with its lower density, reflects a lower impact in the LCA phase.

The analyzed material for recycling comes from an extensive provider network, as it arrives from several countries. Achieving a local supplier or, at least, increasing their contribution to the mix of processes material

would reduce the average transport and, therefore, the associated impact.

The different kinds of thermoplastic affect the impact of the processing and injection process, as it can be seen in the case of PA6 given that the electric consumption required for the injection is higher, and requires a previous drying stage which is not needed in the other materials.

Regarding the carbon footprint, the comparative impact shows a significant reduction when using any of the studied PP (Table 4).

The use of recycled material reduces the result of CO<sub>2</sub> eq in 81.2% compared to the use of PA6. The impact is reduced in 42.8% when compared to virgin PP.

The most damaging processes remain the same as in the case of ReCiPe methodology. Material production accounts for 3.824 kg CO<sub>2</sub> eq. of the PA6 functional unit material production, representing 86.7% of the total. For virgin PP the material production casts 0.868 kg CO<sub>2</sub> eq., 60% of the total impact, and for the recycled PP, 0.25 kg CO<sub>2</sub> eq., only 30% of the total impact.

Values are similar in all three cases due to transport. The differences appear because of the different distances traveled in each case, and the different materials' density. However, they account for a different percentage due to the different overall impact. In the case of PA6, transport-related emissions weight 6.4%, and the value increases for virgin PP (22%) and recycled PP (37.6%).

#### 4.2 Worst Case Scenario Analysis

The result obtained from the study is calculated based on characteristics and data obtained in an average real case.

In the study carried out, the existing variation in the recycled polypropylene's origin has been verified. The study was carried out with average values, but given the wide variety of suppliers, it is possible to anticipate different environmental impact values depending on the batch used to manufacture the material.

It was decided to evaluate the piece's environmental impact by modifying the scenario for obtaining the raw material by the recycled material producer (Worst Case or

WC). In the scenario proposed, the material is obtained from a more distant source, such as textile production plants in Turkey. The transport proposed is a combination of road and sea transport to the production plant in Italy.

Of all the sources of impact analyzed in the study, the only one affected in this new scenario is the manufacturing of the recycled polypropylene (Table 5), since the rest of the values remain constant, and it is considered that the modification of the origin of the material does not affect the mechanical properties or the electrical energy required for its processing.

The only value modified is the impact of the material production, which includes the impacts of transporting post-industrial waste to the recycling plant.

The Carbon Footprint results (Table 6) show a rise in the overall impact again. This increase focuses on the production of the recycled material, which includes the necessary transportation of the selected waste to the recycling plant.

The analysis result shows an increase of 9.5% in ReCiPe impact and 11.2% in Carbon Footprint.

Taking into account these calculations, the maximum distances of PP material acquisition that make the recycled results equal to the virgin PP alternative can also be obtained. Following ReCiPe, these theoretical maximum distances would be around 9400 km if all the transportation was carried out by a > 32 metric ton truck, and more than 50,000 km if it was performed by freight ship. With IPCC methodology, these theoretical maximum distances are even higher (around 12,000 km and more than 140,000 km, respectively). All these distances are theoretical and clearly not realistic. Local sources will always be preferred due to their lower environmental impact. However, these high theoretical distance values show that, for the studied process, PP recycling is an interesting option from an environmental point of view, almost regardless of the origin of the materials (as there are relatively low differences between the base scenario and the worst-case scenario already showed).

**Table 4** Global warming potential IPCC [Kg CO<sub>2</sub> eq.] of one injected part delivered to the final consumer and including the EOL

IPCC [Kg CO <sub>2</sub> eq.]	PA6	Virgin PP	Recycled PP
Material production	3.824	0.868	0.250
Material transport	0.063	0.078	0.068
Injection molding process	0.180	0.131	0.135
Transport to final client	0.223	0.240	0.243
EOL	0.119	0.128	0.130
Total	4.410	1.444	0.827

**Table 5** ReCiPe impact of one injected part Base Case vs WC

ReCiPe [mPt]	Recycled PP	Recycled PP WC
Material production	11.29	15.23
Total	41.63	45.57

**Table 6** Global warming potential IPCC [Kg CO<sub>2</sub> eq.] of one injected part Base Case vs WC

IPCC [Kg CO <sub>2</sub> eq.]	Recycled PP	Recycled PP WC
Material production	0.250	0.343
Total	0.827	0.919

Obviously, this statement would not apply from an economic analysis, which is out of this paper's scope.

## 5 Conclusions

Differences in results demonstrate the importance of materials selection in the design process. The environmental impact of a single part can vary up to 30% only depending on the chosen supplier of material and up to 75% depending on the type of thermoplastic selected.

The recycled material can be an option to replace common virgin materials reducing by 30% the environmental impact of the material. This replacement can be executed directly when the mechanical requirements comply with the datasheet of the substituting material.

Using recycled material reduces the impact of raw material manufacturing by 61%. Even when the worst-case scenario is assessed, the reduction is a significant 48%. This focuses on the impact reduction in the recycling process, as there are no significant differences in other processes, but only those related to the distance travelled or the different density among materials.

Transportation of the materials to the injection plants brings significant damage to the environment, as seen in the sensibility assessment. These affections are reduced by 9.5% by selecting local suppliers. When there is no possibility of reducing transport, the impact can be optimized either by modifying the transport processes (train or boat instead of truck for long distances); or by distributing the impact in a more significant share of material (transporting raw material in full containers or at full capacity instead of moving final parts which are more delicate and in need of more space). This mainly affects the Carbon Footprint results (11.2%), that emphasizes the use of fossil fuels in processes and transport.

The impact of the injection molding process remains at similar values among all materials, as electric consumption is the primary source of impact. However, PA6 requires a previous stage of drying which implies an additional step and increases the process impact by 33% compared to the recycled material.

Regarding Carbon Footprint, which is more affected by the electrical consumptions, the injection is the most variable stage of the process after material production, which varies by 37.4% comparing the use of PA6 to virgin PP. The slight difference between virgin and recycled PP is due to the different melting temperatures and mold conditioning in the process.

The EOL stage causes the same impact regardless of the chosen thermoplastic as the most conservative approach, landfilling, has been selected for all of them. Most plastic materials, especially if they included fillers, are not usually

recycled and can only be landfilled or incinerated, as the IEC/TR 62635:2012 shows [42].

The standardization of the use of recycled thermoplastics is the best way to develop a material waste market with the potential to be recycled. The European Union is creating plans to promote circular economy and waste valorization [19] as one of the main areas of the European Green Deal [18].

The design of the complete system must take into account legal requirements that can affect the thermoplastic selection. For the same functional unit, and depending on the raw material, the impact reduction can vary by 50% comparing two raw materials, and by 74%, when the selected thermoplastic is exchanged and when using recycled material. As the presence of renewable energies is increasing in the electricity mix, the environmental impacts of recycled polymers will decrease in the future, as the electrical consumption is relevant for the recycling processes.

After the assessment of post-industrial waste, future research lines would include the evaluation of post-consumption thermoplastic waste. It also opens the analysis of a closed-loop cycle, which would involve re-using the waste generated by the same products in a circular economy aligned scenario.

**Acknowledgements** The authors would like to thank RIALTI SpA for their capacity and for providing data and material for the analysis. Also, we would like to acknowledge the company Inyecciones Montañana (Inymon) for their openness to the processes and their will to collaborate in the study. The study presented in this paper has been partially supported by the Spanish MINECO under Project RETO RTC-2017-5965-6, and has been performed by members of the I+D+i+D+i (DGA-T08\_20R) research group of the FEDER 2014-2020 "Building Europe from Aragón" program, recognized by the Regional Government of Aragón.

## Declarations

**Conflict of Interest** On behalf of all authors, the corresponding author states that there is no conflict of interest.

## References

1. Plastics Europe. (2019). *Plastics. The facts 2019. An analysis of European plastics*. Plastics Europe.
2. Renjith, S. C., Park, K., Okudan, G. E., & Kremer. (2020). A design framework for additive manufacturing: integration of additive manufacturing capabilities in the early design process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21, 329–345
3. den Boer, J., Lambrechts, W., & Krikke, H. (2020). Additive manufacturing in military and humanitarian missions: Advantages and challenges in the spare parts supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120301
4. Ma, J. (2020). Environmentally sustainable management of 3D printing network: decision support for 3D printing work

- allocation. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21, 537–544
5. Chen, W.-Q., Ciacci, L., Sun, N.-N., & Yoshioka, T. (2020). Sustainable cycles and management of plastics: A brief review of RCR publications in 2019 and early 2020. *Resources, Conservation and Recycling*, 159, 104822
  6. Abejón, R., Bala, A., Vázquez-Rowe, I., Aldaco, R., & Fullana-Palmer, P. (2020). When plastic packaging should be preferred: Life cycle analysis of packages for fruit and vegetable distribution in the Spanish peninsular market. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104666
  7. Van Rensburg, M. L., Nkomo, S. L., & Dube, T. (2020). The “plastic waste era”; social perceptions towards single use plastic consumption and impacts on the marine environment in Durban. *South Africa. Applied Geography*, 114, 102132
  8. Albanna, M. (2011). Solid waste management options and their impacts on climate change and human health. *Environmental protection strategies for sustainable development*. (pp. 499–528). Springer.
  9. Antelava, A., Damilos, S., Hafeez, S., Manos, G., Al-Salem, S. M., Sharma, B. K., Kohli, K., & Constantinou, A. (2019). Plastic solid waste (PSW) in the Context of Life Cycle Assessment (LCA) and sustainable management. *Environmental Management*, 64, 230–244
  10. Gómez, P., Elduque, D., Clavería, I., Pina, C., & Javierre, C. (2019). Influence of the material composition on the environmental impact. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7, 431–442
  11. Islam, M. T., & Huda, N. (2020). Assessing the recycling potential of unregulated e-waste in Australia. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 104526
  12. Jaunich, M. K., & J. D.-Z.-A. (2020). Life-cycle modeling framework for electronic waste recovery and recycling processes. *Resources, Conservation and Recycling*, 161, 104841
  13. Council of the EU. (2003). Directive 2002/96/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE). *Official Journal of the European Union*, EU Publications Office.
  14. European Parliament Directive. (2012). 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment (WEEE). *Official Journal of the European Union*.
  15. E Parliament. (2006). *1907/2006 Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals (REACH)*. European Parliament.
  16. European Parliament. (2003). *Directive 2002/95/EC of the European Parliament and of the Council of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment (RoHS)*. EU Publications Office.
  17. European Parliament. (2011) Directive 2011/65/EU Restriction of Hazardous Substances in Electrical and Electronic Equipment. Luxembourg: *Official Journal of the European Union*.
  18. European Commission. (2019). *The European Green Deal. Brussels: Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions.*
  19. European Commission (2020) *A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe. Brussels: Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the regions.*
  20. European Commission. (2014). Commission Regulation (EU) No 66/2014 of 14 January 2014 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for domestic ovens, hobs and range hoods. *Official Journal of the European Union*.
  21. Kuo, T. C., & Wang, C. J. (2019). Integrating robust design criteria and axiomatic design principles to support sustainable product development. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6, 549–557
  22. Pantano, A., Tucciarelli, T., Montinaro, N., & Mancino, A. (2019). Design of a telescopic tower for wind energy production with reduced environmental impact. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7, 119–130
  23. Civancik-Uslu, D., Puig, R., Voigt, S., Walter, D., & Fullana-Palmer, P. (2019). Improving the production chain with LCA and eco-design: application to cosmetic packaging. *Resources, Conservation and Recycling*, 151, 104475
  24. Lee, H. T., et al. (2019). Research trends in sustainable manufacturing: a review and future perspective based on research databases. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6, 809–819
  25. Aguilar, C. M. G., Panameño, R., Velazquez, A. P., Álvarez, B. E. A., Kiperstok, A., & César, S. F. (2017). Cleaner production applied in a small furniture industry in Brazil: addressing focused changes in design to reduce waste. *Sustainability*, 9, 1867
  26. Lee, S. C., Tseng, H. E., Chang, C. C., & Huang, Y. M. (2020). Applying interactive genetic algorithms to disassembly sequence planning. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21, 663–679
  27. Rodrigues, V. P., Pigosso, D. C. A., & McAloone, T. C. (2017). Measuring the implementation of ecodesign management practices: A review and consolidation of process-oriented performance indicators. *Journal of Cleaner Production*, 156, 293–309
  28. Maitre-Ekern, E., & Dalhammar, C. (2016). Regulating planned obsolescence: a review of legal approaches to increase product durability and reparability in Europe. *RECIEL*, 25, 378–394
  29. Polverini, D., & Miretti, U. (2019). An approach for the techno-economic assessment of circular economy requirements under the Ecodesign Directive. *Resources, Conservation and Recycling*, 150, 104425
  30. Milios, L. (2017). Advancing to a circular economy: three essential ingredients for a comprehensive policy mix. *Sustainability Science*, 13, 861–878
  31. European Commission, Environment. Home Page. (2018). [https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_1&format=PDF](https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_1&format=PDF). Accessed 6 Apr 2020.
  32. EURLEX. (2018). [https://eurlex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC\\_2&format=PDF](https://eurlex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:2df5d1d2-fac7-11e7-b8f5-01aa75ed71a1.0001.02/DOC_2&format=PDF). Accessed 6 Apr 2020.
  33. Khan, O., Daddib, T., Slabbinck, H., Kleinhans, K., Vazquez-Brust, D., & De Meester, S. (2020). Assessing the determinants of intentions and behaviors of organizations towards a circular economy for plastics. *Resources, Conservation & Recycling*, 163, 105069
  34. European Parliament. (2009). Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 Establishing a Framework for the Setting of Ecodesign Requirements for Energy-Related Products. *Official Journal of the European Union*, EU Publications Office.
  35. European Parliament. (2009). *2009/125/EC ErP (Energy related Products)*. European Parliament.
  36. Kiling, F. S., Shin, S.-J., Lee, M.-K., & Meilanitasari, P. (2020). An energy-related products compliant eco-design method with durability-embedded economic and environmental assessments. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8, 561–581
  37. van Ewijk, S., & Stegemann, J. A. (2020). Recognising waste use potential to achieve a circular economy. *Waste Management*, 105, 1–7

38. Peng, S. T., Yang, Y., Li, T., Smith, T. M., Tan, G. Z., & Zhang, H. C. (2019). Environmental benefits of engine remanufacture in China's circular economy development. *Environmental Science & Technology*, *53*, 19
39. Paletta, A., Filho, W. L., Balogun, A.-L., Foschi, E., & Bonoli, A. (2019). Barriers and challenges to plastics valorization in the context of a circular economy: Case studies from Italy. *Journal of Cleaner Production*, *241*, 118149
40. Ungerman, O., & Dědková, J. (2019). Model of the circular economy and its application in business practice. *Environment, Development and Sustainability*, *22*, 3407–3432
41. Hao, H., Qiao, Q., Liu, Z., & Zhao, F. (2017). Impact of recycling on energy consumption and greenhouse gas emissions from electric vehicle production: The China 2025 case. *Resources, Conservation and Recycling*, *122*, 114–125
42. IEC, International Electrotechnical Commission. IEC TR 62635:2012. 19 October 2012. <https://webstore.iec.ch/publication/7292>. Accessed 8 Apr 2020.
43. Jaunich, M. K., Levis, J. W., DeCarolis, J. F., Barlaz, M. A., & Ranjithan, S. R. (2019). Solid waste management policy implications on waste process choices and systemwide cost and greenhouse gas performance. *Environmental Science & Technology*, *53*, 1766–1775
44. Wang, Y. X., Levis, J. W., & Barlaz, M. A. (2020). An assessment of the dynamic global warming impact associated with long-term emissions from landfills. *Environmental Science & Technology*, *54*, 1304–1313
45. Roithner, C., & Rechberger, H. (2020). Implementing the dimension of quality into the conventional quantitative definition of recycling rates. *Waste Management*, *105*, 586–593
46. Munusamy, Y., Sethupathi, S., & Choon, C. H. (2019). Potential use of waste cockle shell as filler for thermoplastic composite. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *21*, 1063–1074
47. Dorigato, A. (2021). Recycling of polymer blends. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, *4*, 53–69
48. Malinowski, R., Krasowska, K., Sikorska, W., Moraczewski, K., Kaczor, D., Kosmalka, D., & Królikowski, B. (2020). Studies on manufacturing, mechanical properties and structure of polybutylene adipate-coterephthalate-based green composites modified by coconut fibers. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*.
49. de Andrade, M. F. C., Souza, P. M. S., Cavalett, O., & Morales, A. R. (2016). Life Cycle Assessment of Poly Lactic Acid (PLA): comparison between chemical recycling, mechanical recycling and composting. *Journal of Polymers and the Environment*, *24*, 372–384
50. Peeters, J. R., Vanegas, P., Kellens, K., Wang, F., Huisman, J., Dewulf, W., & Dufou, J. R. (2015). Forecasting waste compositions: A case study on plastic waste of electronic display housings. *Waste Management*, *46*, 28–39
51. Maris, J., Bourdon, S., Brossard, J.-M., Cauret, L., Fontaine, L., & Montembault, V. (2018). Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes. *Polymer Degradation and Stability*, *147*, 245–266
52. Lin, T. A., Lin, J.-H., & Bao, L. (2020). Polypropylene/thermoplastic polyurethane blends: mechanical characterizations, recyclability and sustainable development of thermoplastic materials. *Journal of Materials Research and Technology*, *9*, 5304–5312
53. Toso, M.D., & Toso, M.D. (2020). *Process for recovering plastic material and related plant*. Italy Patent WO/2020/115335. 11 06.
54. Solis, M., & Silveira, S. (2020). Technologies for chemical recycling of household plastics—A technical review and TRL assessment. *Waste Management*, *105*, 128–138
55. Braido, R. S., Borges, L. E. P., & Pinto, J. C. (2018). Chemical recycling of crosslinked polymethyl methacrylate and characterization of polymers produced with the recycled monomer. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *132*, 47–55
56. Maisel, F., Chancerel, P., Dimitrova, G., Emmerich, J., Nissen, N. F., & Schneider-Ramelow, M. (2020). Preparing WEEE plastics for recycling—How optimal particle sizes in pre-processing can improve the separation efficiency of high-quality plastics. *Resources, Conservation and Recycling*, *154*, 104619
57. Singkran, N. (2020). Assessment of urban product consumption and relevant waste management. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, *22*, 1019–1026
58. Zhang, R., et al. (2020). PET bottles recycling in China: An LCA coupled with LCC case study of blanket production made of waste PET bottles. *Journal of Environmental Management*, *260*, 110062
59. Dahlbo, H., Poliakov, V., Mylläri, V., Sahimaa, O., & Anderson, R. (2018). Recycling potential of post-consumer plastic packaging waste in Finland. *Waste Management*, *71*, 52–61
60. Siman, R. R., Yamane, L. H., Baldam, R. D., Tackla, J. P., Lessa, S. F. D., & de Britto, P. M. (2020). Governance tools: Improving the circular economy through the promotion of the economic sustainability of waste picker organizations. *Waste Management*, *105*, 149–169
61. Xu, G. C., Yano, J., & Sakai, S. (2019). Recycling potentials of precious metals from end-of-life vehicle parts by selective dismantling. *Environmental Science & Technology*, *53*, 733–742
62. Jang, Y.-C., Lee, G., Kwon, Y., Lim, J.-h., & Jeong, J.-h. (2020). Recycling and management practices of plastic packaging waste towards a circular economy in South Korea. *Resources, Conservation and Recycling*, *158*, 104798
63. Wagner, F., Peeters, J. R., Ramon, H., De Keyzer, J., Dufou, J. R., & Dewulf, W. (2020). Quality assessment of mixed plastic flakes from Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) by spectroscopic techniques. *Resources, Conservation and Recycling*, *158*, 104801
64. Hahladakis, J. N., & Iacovidou, E. (2019). An overview of the challenges and trade-offs in closing the loop of post-consumer plastic waste (PCPW): Focus on recycling. *Journal of Hazardous Materials*, *380*, 120887
65. Huysman, S., De Schaepepeester, J., Ragaert, K., Dewulf, J., & De Meester, S. (2017). Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. *Resources, Conservation and Recycling*, *120*, 46–54
66. Prosman, E. J., & Wöhrens, B. V. (2019). Managing waste quality in industrial symbiosis: Insights on how to organize supplier integration. *Journal of Cleaner Production*, *234*, 113–123
67. ISO. (2006). ISO 14040:2006 environmental management—life cycle assessment—principles and framework. Geneva, Switzerland: ISO
68. ISO. (2006). ISO 14040:2006 environmental management—life cycle assessment—requirements and guidelines. Geneva, Switzerland: ISO
69. Moretti, C., Junginger, M., & Shen, L. (2020). Environmental life cycle assessment of polypropylene made from used cooking oil. *Resources, Conservation & Recycling*, *157*, 104750
70. Bartolozzi, I., Daddi, T., Punta, C., Fiorati, A., & Irlando, F. (2020). Life cycle assessment of emerging environmental technologies in the early stage of development: A case study on nanostructured materials. *Journal of Industrial Ecology*, *24*, 1
71. Zhang, L., Zhang, B., Bao, H., & Huang, H. (2018). Optimization of cutting parameters for minimizing environmental impact: considering energy efficiency, noise emission and economic dimension. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, *19*, 613–624
72. Kozderka, M., Rose, B., Kočí, V., Caillaud, E., & Bahlouli, N. (2015). High Impact Polypropylene Recycling—Mechanical Resistance and LCA Case Study with Improved Efficiency by Preliminary Sensitivity Analysis. Product Life-cycle

- Management in the Era of Internet of Things. In: IFIP *International Conference on Product Lifecycle Management*, Doha.
73. Kočí, V. (2019). Comparisons of environmental impacts between wood and plastic transport pallets. *Science of The Total Environment*, 686, 514–528
  74. Gradin, K. T., & Åström, A. H. (2020). Comparative life cycle assessment of car disc brake systems—case study results and method discussion about comparative LCAs. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 350–362
  75. Lozano-Miralles, J. A., Hermoso-Orzaez, M. J., Gago Calderon, A., & Brito, P. (2020). LCA case study to LED outdoor luminaries as a circular economy solution to local scale. *Sustainability*, 12, 190
  76. de Bortoli, A., Bouhaya, L., & Feraïlle, A. (2020). A life cycle model for high-speed rail infrastructure: environmental inventories and assessment of the Tours-Bordeaux railway in France. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 814–830
  77. Pratico, F. G., Giunta, M., & Mistretta, M. (2020). Energy and environmental life cycle assessment of sustainable pavement materials and technologies for urban roads. *Sustainability*, 12, 704
  78. Goswein, V., Rodrigues, C., Silvestre, J. D., Freire, F., Habert, G., & König, J. (2020). Using anticipatory life cycle assessment to enable future sustainable construction. *Journal of Industrial Ecology*, 24, 1
  79. Halim, N. H. A., Haron, C. H. C., & Ghani, J. A. (2020). Sustainable machining of Hardened Inconel 718: a comparative study. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 21, 1375–1387
  80. Lodato, C., Tonini, D., Damgaard, A., & Astrup, T. F. (2020). A process-oriented life-cycle assessment (LCA) model for environmental and resource-related technologies (EASETECH). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 73–88
  81. Winans, K., Brodt, S., & Kendall, A. (2020). Life cycle assessment of California processing tomato: an evaluation of the effects of evolving practices and technologies over a 10-year (2005–2015) timeframe. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25, 538–547
  82. Aissani, L., Lacassagne, A., Bahers, J. B., & Le Feon, S. (2019). Life cycle assessment of industrial symbiosis: A critical review of relevant reference scenarios. *Journal of Industrial Ecology*, 23, 972–985
  83. Jain, A., Kumar, S., Bajpai, V., & Park, H. W. (2019). Replacement of hazard lubricants by green coolant in machining of Ti6Al4V: A 3D FEM approach. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20, 1027–1035
  84. Zhang, C., & Xu, Y. (2020). Economic analysis of largescale farm biogas power generation system considering environmental benefits based on LCA: A case study in China. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120985
  85. Blanco, C. F., Cucurachi, S., Peijnenburg, W. J. G. M., Guinée, J. B., Vijver, M. G., Trattnig, R., & Heijungs, R. (2020). Assessing the sustainability of emerging technologies: A probabilistic LCA method applied to advanced photovoltaics. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120968
  86. Burchart-Korol, D., Jursova, S., Folega, P., & Pustejovska, P. (2020). Life cycle impact assessment of electric vehicle battery charging in European Union countries. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120476
  87. Vandepaer, L., Cloutier, J., Bauer, C., & Amor, B. (2019). Integrating batteries in the future swiss electricity supply system: A consequential environmental assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 23, 709–725
  88. Galve, J.E., Elduque, D., Pina, C., Clavería, I., & Javierre, C. (2018). Processability analysis of an injected part in virgin or recycled polypropylene. In: *The 30th European Modeling & Simulation Symposium*. Budapest: EMSS.
  89. Forcellese, A., Marconi, M., Simoncini, M., & Vita, A. (2020). Life cycle impact assessment of different manufacturing technologies for automotive CFRP components. *Journal of Cleaner Production*, 271, 122677
  90. Ichisugi, Y., Masui, T., Karkour, S., & Itsubo, N. (2019). Projection of national carbon footprint in Japan with integration of LCA and IAMS. *Sustainability*, 11, 6875
  91. Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P.R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J.B.R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M.I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M., & Waterfield, T. (eds.) (2018). *Global Warming of 1.5 °C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. IPCC
  92. Plastics Europe. n.d. <https://www.plasticsEurope.org/en/focus-arcas/life-cycle-thinking>. Accessed 08 2020.
  93. Elduque, A., Elduque, D., Clavería, I., & Javierre, C. (2018). Influence of material and injection molding machine's selection in the electricity consumption and environmental impact of the injection molding process: an experimental approach. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 5, 13–28
  94. PRÉ. (2020). SimaPro Database Manual. *Methods Library (v 4.15)*. Consultants B. V.
  95. Ecoinvent. <https://www.ecoinvent.org/about/mission-andvision/mission-and-vision.html>. Accessed 08 2020.
  96. Engel. [https://www.engelglobal.com/fileadmin/master/Downloads/Broschueren/ENGEL\\_duo\\_en.pdf](https://www.engelglobal.com/fileadmin/master/Downloads/Broschueren/ENGEL_duo_en.pdf). Accessed 08 2020
  97. Elduque, A., Elduque, D., Javierre, C., Fernández, Á., & Santolaria, J. (2015). Environmental impact analysis of the injection molding process: analysis of the processing of high density polyethylene parts. *Journal of Cleaner Production*, 108, 80–89
  98. Gobbi, G. P., Di Liberto, L., & Barnaba, F. (2020). Impact of port emissions on EU-regulated and non-regulated air quality indicators: The case of Civitavecchia (Italy). *Science of the Total Environment*, 719, 134948
  99. Hammad, A. W. A., Rey, D., Bu-Qammar, A., Grzybowska, H., & Akbarnezhad, A. (2020). Mathematical optimization in enhancing the sustainability of aircraft trajectory: A review. *International Journal of Sustainable Transportation*, 14, 413–436

**Publisher's Note** Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



**José Eduardo Galve** finished his degree in Industrial Engineering at the University of Zaragoza in 2012. He works at BSH Home Appliances Group – Spain. Since September 2014 he is a PhD candidate in Mechanical Engineering at the University of Zaragoza. His work focuses on ecodesign using recyclable materials.



**Daniel Elduque** is an Associate Professor at the University of Zaragoza in the Department of Mechanical Engineering and PhD Co-Director of Jose Eduardo Galve. He is part of the i+aitiip research group. He received his PhD in 2014. His main research interests include mechanical engineering, Life Cycle Assessment and environmental impact.



**Carlos Javierre** is a Professor at the University of Zaragoza in the Department of Mechanical Engineering. He is part of the i+aitiip research group. His main research interests include mechanical engineering, Life Cycle Assessment and environmental impact.



**Carmelo Pina** is a part-time professor at the University of Zaragoza in the Department of Design and Manufacturing and PhD Co-Director of Jose Eduardo Galve. He also works at BSH Home Appliances Group – Spain and is the Head of Mechanical Platform Development of Induction Cooktops. He received his PhD in 2015.

Home > Journal profile

JCR YEAR

2020

# International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology

ISSN  
2288-6206

EISSN  
2198-0810

JCR ABBREVIATION  
INT J PR ENG MAN-GT

ISO ABBREVIATION  
Int. J. Precis Eng Manuf-Green Technol.

## Journal information

EDITION  
Science Citation Index Expanded (SCIE)

CATEGORY  
GREEN & SUSTAINABLE SCIENCE & TECHNOLOGY - SCIE

ENGINEERING, MECHANICAL - SCIE

ENGINEERING, MANUFACTURING - SCIE

LANGUAGES REGION 1ST ELECTRONIC JCR YEAR  
English SOUTH KOREA 2014

## Publisher information

PUBLISHER ADDRESS PUBLICATION FREQUENCY  
KOREAN SOC PRECISION ENG RM 306, KWANGMYUNG BLDG, 5-4 NONHYUN-DONG, KANGNAM-GU, SEOUL 135-010, SOUTH KOREA 4 issues/year

## Journal Impact Factor

The Journal Impact Factor (JIF) is a journal-level metric calculated from data indexed in the Web of Science Core Collection. It should be used with careful attention to the many factors that influence citation rates, such as the volume of publication and citations characteristics of the subject area and type of journal. The Journal Impact Factor can complement expert opinion and informed peer review. In the case of academic evaluation for tenure, it is inappropriate to use a journal-level metric as a proxy measure for individual researchers, institutions, or articles. [Learn more](#)

2020 JOURNAL IMPACT FACTOR

5.671

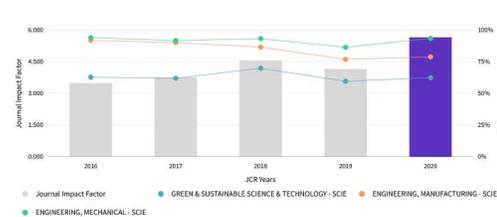
[View calculation](#)

JOURNAL IMPACT FACTOR WITHOUT SELF CITATIONS

3.965

[View calculation](#)

## Journal Impact Factor Trend 2020



[View all years](#)

## Journal Impact Factor contributing items

Item	Citation Count
A Review on Optical Fiber Sensors for Environmental Monitoring	39
Sustainable Industrial Value Creation in SMEs: A Comparison between Industry 4.0 and Made in China 2025	29
Smart Machining Process Using Machine Learning: A Review and Perspective on Machining Industry	28
Processing Characteristics of Vegetable Oil-based Nanofluid MQL for Grinding Different Workpiece Materials	28
Recent Advances in the Machining of Titanium Alloys using Minimum Quantity Lubrication (MQL) Based Techniques	21
Estimation of Energy and Time Savings in Optical Glass Manufacturing When Using Ultrasonic Vibration-Assisted Grinding	21
A Review of Human-Powered Energy Harvesting for Smart Electronics: Recent Progress and Challenges	19
Thin Film Solid Oxide Fuel Cells Operating Below 600 degrees C: A Review	17
Energy Consumption Model for Additive-Subtractive Manufacturing Processes with Case Study	16
Machinability of Titanium Alloy (Ti-6Al-4V) in Environmentally-Friendly Micro-Drilling Process with Nanofluid Minimum Quantity Lubrication Using Nanodiamond Particles	16

## Rank by Journal Impact Factor

Journals within a category are sorted in descending order by Journal Impact Factor (JIF) resulting in the Category Ranking below. A separate rank is shown for each category in which the journal is listed in JCR. Data for the most recent year is presented at the top of the list, with other years shown in reverse chronological order. [Learn more](#)

EDITION  
Science Citation Index Expanded (SCIE)  
CATEGORY  
ENGINEERING, MECHANICAL  
9/135

JCR YEAR	JIF RANK	JIF QUANTILE	JIF PERCENTILE
2020	9/135	Q1	93.70
2019	18/130	Q1	86.54
2018	9/129	Q1	93.41
2017	11/128	Q1	91.80
2016	8/130	Q1	94.23

EDITION  
Science Citation Index Expanded (SCIE)  
CATEGORY  
ENGINEERING, MANUFACTURING  
11/50

JCR YEAR	JIF RANK	JIF QUANTILE	JIF PERCENTILE
2020	11/50	Q1	79.00
2019	12/50	Q1	77.00
2018	7/49	Q1	86.73
2017	5/46	Q1	90.22
2016	4/44	Q1	92.05

## Rank by Journal Impact Factor

Journals within a category are sorted in descending order by Journal Impact Factor (JIF) resulting in the Category Ranking below. A separate rank is shown for each category in which the journal is listed in JCR. Data for the most recent year is presented at the top of the list, with other years shown in reverse chronological order. [Learn more](#)

EDITION  
Science Citation Index Expanded (SCIE)  
CATEGORY  
GREEN & SUSTAINABLE SCIENCE & TECHNOLOGY  
17/44

JCR YEAR	JIF RANK	JIF QUANTILE	JIF PERCENTILE
2020	17/44	Q2	62.50
2019	17/41	Q2	59.76
2018	11/35	Q2	70.00
2017	13/33	Q2	62.12
2016	12/31	Q2	62.90





**WO 2019/048976 A1** 

**(84) Bestimmungsstaaten** (soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), europäisches (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

**Veröffentlicht:**

— mit internationalem Recherchenbericht (Artikel 21 Absatz 3)

schlagen, dass das Gebläserad (16a-b) in einer Einbaulage in einer Vertikalrichtung (22a-b) zwischen der Elektronikeinheit (20a-b) und dem Heizelement (12a-b) angeordnet ist.

werden. Die Elektroneinheit kann insbesondere in einem ausreichend großen Abstand zu dem Heizelement und damit in einem Bereich angeordnet werden, in welchem ein Erreichen von kritischen Temperaturen vermieden werden kann. Insbesondere kann eine bis dato neuartige Konstruktion geschaffen werden, insbesondere in einem Vergleich mit Produkten von Wettbewerbern und/oder Konkurrenten. Die Abzugseinheit kann insbesondere bei kleineren Kochfeldern, welche insbesondere bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene einer Kochfeldplatte eine Abmessung von im Wesentlichen 60 cm aufweisen, angewendet werden, und zwar insbesondere unter Aufrechterhaltung einer Abzugsleistung in einem Vergleich zu aus dem Stand der Technik bekannten Ausgestaltungen. Insbesondere kann eine Unterbrechung der Elektroneinheit und/oder eines von einer Außengehäuseinheit definierten Lagerraums vermieden werden, wodurch insbesondere eine großflächige Elektroneinheit ermöglicht werden kann. Die Elektroneinheit kann vorteilhaft außerhalb eines Abzugskanals, durch welchen die in dem Betriebszustand entstehenden Dämpfe strömen, angeordnet werden, wodurch insbesondere eine sichere Anordnung der Elektroneinheit ermöglicht werden kann.

Unter einer „Kochfeldvorrichtung“, insbesondere unter einer „Induktionskochfeldvorrichtung“, soll insbesondere zumindest ein Teil, insbesondere eine Unterbaugruppe, eines Kochfelds, insbesondere eines Induktionskochfelds, verstanden werden. Die Kochfeldvorrichtung weist insbesondere zumindest eine Kochfeldplatte auf. Unter einer „Kochfeldplatte“ soll insbesondere eine Einheit verstanden werden, die in wenigstens einem Betriebszustand zu einem Aufstellen von Gargeschirr vorgesehen ist und die insbesondere dazu vorgesehen ist, einen Teil eines Kochfeldaußengehäuses, insbesondere der Kochfeldvorrichtung und/oder eines die Kochfeldvorrichtung aufweisenden Kochfelds, auszubilden. Insbesondere bildet die Kochfeldplatte in einer Einbaulage einen einem Bediener zugewandten Teil des Kochfeldaußengehäuses aus. Die Kochfeldplatte besteht insbesondere wenigstens zu einem Großteil aus Glas und/oder Glaskeramik. Unter „wenigstens zu einem Großteil“ soll insbesondere zu einem Anteil von mindestens 70 %, insbesondere zu mindestens 80 %, vorteilhaft zu mindestens 90 % und vorzugsweise zu mindestens 95 % verstanden werden.

Unter einem „Heizelement“ soll in diesem Zusammenhang insbesondere ein Element verstanden werden, welches dazu vorgesehen ist, Energie, vorzugsweise elektrische Energie, in Wärme umzuwandeln und insbesondere zumindest einem Gargeschirr zuzuführen. Vorteilhaft ist das Heizelement insbesondere als Induktionsheizelement ausgebildet und dabei vorzugsweise dazu vorgesehen, ein elektromagnetisches Wechselfeld insbesondere mit einer Frequenz zwischen 20 kHz und 100 kHz zu erzeugen, das insbesondere dazu vorgesehen ist, in einem aufgestellten, insbesondere metallischen, vorzugsweise ferromagnetischen

Gargeschirrboden durch Wirbelstrominduktion und/oder Ummagnetisierungseffekte in Wärme umgewandelt zu werden. In einer Einbaulage ist das Heizelement insbesondere unterhalb der Kochfeldplatte angeordnet. Vorteilhaft ist das Heizelement in einer Einbaulage in einem Nahbereich der Kochfeldplatte angeordnet.

- 5 Unter einer „Abzugseinheit“ soll insbesondere eine Einheit verstanden werden, welche dazu vorgesehen ist, mittels des Gebläserads in wenigstens einem Betriebszustand entstehende Dämpfe abzusaugen und/oder zu filtern, und welche insbesondere dazu vorgesehen ist, mittels des Gebläserads diese Dämpfe aus einem Kochbereich zumindest wegzutransportieren. Die Abzugseinheit weist insbesondere zumindest eine Fettfiltereinheit auf, welche dazu vor-
- 10 gesehen ist, in den in wenigstens einem Betriebszustand entstehenden Dämpfen gelöste Fettpartikel wenigstens im Wesentlichen aufzunehmen und/oder aus den Dämpfen wenigstens im Wesentlichen zu entfernen. Insbesondere weist die Abzugseinheit zumindest eine Luftleiteinheit auf, welche insbesondere zumindest einen Abzugskanal definiert und welche insbesondere dazu vorgesehen ist, mittels des Abzugskanals den Kochraum mit dem Geblä-
- 15 serad zu verbinden. Insbesondere ist der Abzugskanal zu einer Leitung der in dem Betriebszustand entstehenden Dämpfe vorgesehen.

- Unter einem „Gebläserad“ soll insbesondere eine Einheit verstanden werden, welche dazu vorgesehen ist, in wenigstens einem Betriebszustand zumindest einen Ansaugstrom für in dem Betriebszustand entstehende Dämpfe bereitzustellen und insbesondere die abgesaug-
- 20 ten Dämpfe aus dem Kochbereich zumindest abzutransportieren. Beispielsweise könnte die Abzugseinheit dazu vorgesehen sein, die in dem Betriebszustand entstehenden Dämpfe mittels des Gebläserads aus dem Kochbereich und zusätzlich aus einem Kochraum abzuleiten und beispielsweise zumindest einer Abluftleitung zuzuführen. Alternativ könnte die Ab-
- 25 zugseinheit insbesondere dazu vorgesehen sein, die in dem Betriebszustand entstehenden Dämpfe mittels des Gebläserads aus dem Kochbereich in zumindest einen weiteren Teilbereich des Kochraums zu transportieren. Unter einem „Kochbereich“ soll insbesondere ein Teilbereich eines Kochraums verstanden werden, in welchem in dem Betriebszustand ein Garvorgang erfolgt und in welchen insbesondere bei dem Garvorgang entstehende Dämpfe aus zumindest einem beheizten Gargeschirr entweichen und welcher sich vorteilhaft in einer
- 30 Einbaulage wenigstens zu einem Großteil oberhalb der Kochfeldplatte erstreckt. Unter einem „Kochraum“ soll insbesondere ein Raum verstanden werden, in welchem ein die Kochfeldvorrichtung umfassendes Kochfeld aufgestellt und/oder angeordnet ist.

- Unter einer „Elektronikeinheit“ soll insbesondere eine elektrische und/oder elektronische Einheit verstanden werden, welche zumindest eine elektrische und/oder elektronische Bauein-
- 35 heit aufweist, die vorzugsweise als ein Leistungsbauelement ausgebildet ist. Insbesondere

WO 2019/048976

4

PCT/IB2018/056439

weist die Elektronikeinheit zumindest eine Leiterplatte und insbesondere zusätzlich zumindest eine Baueinheit auf, die insbesondere wenigstens in einem montierten Zustand an der Leiterplatte angeordnet ist. Die Baueinheit könnte beispielsweise zumindest einen Wechselrichter und/oder zumindest eine Steuereinheit und/oder zumindest eine Kühlungseinheit sein. Insbesondere ist die Elektronikeinheit zumindest zu einer Versorgung des Heizelements, insbesondere mit elektrischer Energie, vorgesehen.

5

Die Vertikalrichtung ist in einer Einbaulage insbesondere senkrecht zu einer Haupterstreckungsebene der Elektronikeinheit und/oder zu einer Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte ausgerichtet. Unter einer „Haupterstreckungsebene“ eines Objekts soll insbesondere eine Ebene verstanden werden, welche parallel zu einer größten Seitenfläche eines kleinsten gedachten geometrischen Quaders ist, welcher das Objekt gerade noch vollständig umschließt, und insbesondere durch den Mittelpunkt des Quaders verläuft.

10

Bei einer Betrachtung in einer parallel zu einer Haupterstreckungsebene der Elektronikeinheit und/oder zu einer Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte ausgerichteten Richtung sind das Heizelement und die Elektronikeinheit insbesondere auf einander gegenüberliegenden Seiten des Gebläserads angeordnet. Insbesondere weist das Gebläserad in wenigstens einem montierten Zustand einen Abstand zu der Kochfeldplatte auf, welcher insbesondere größer ist als ein Abstand des Heizelements zu der Kochfeldplatte und welcher insbesondere kleiner ist als ein Abstand der Elektronikeinheit zu der Kochfeldplatte.

15

Unter „vorgesehen“ soll insbesondere speziell programmiert, ausgelegt und/oder ausgestattet verstanden werden. Darunter, dass ein Objekt zu einer bestimmten Funktion vorgesehen ist, soll insbesondere verstanden werden, dass das Objekt diese bestimmte Funktion in zumindest einem Anwendungs- und/oder Betriebszustand erfüllt und/oder ausführt.

20

Beispielsweise könnten das Heizelement und/oder das Gebläserad und/oder die Elektronikeinheit bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Elektronikeinheit nebeneinander und insbesondere überlappungsfrei angeordnet sein. Insbesondere könnten das Heizelement und/oder das Gebläserad und/oder die Elektronikeinheit in einer Horizontalrichtung nebeneinander angeordnet sein. Die Horizontalrichtung könnte insbesondere senkrecht zu der Vertikalrichtung und insbesondere parallel zu einer Haupterstreckungsebene der Elektronikeinheit und/oder zu einer Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte ausgerichtet sein. Vorzugsweise ist das Gebläserad bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Elektronikeinheit wenigstens teilweise und insbesondere vollständig überlappend mit der Elektronikeinheit angeordnet. Unter der Wendung, dass ein erstes Objekt bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene

25

30

der Elektronikeinheit wenigstens „teilweise“ überlappend mit einem zweiten Objekt angeordnet ist, soll insbesondere verstanden werden, dass das erste Objekt bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Elektronikeinheit zu einem Flächenanteil von mindestens 20 %, insbesondere von mindestens 40 %, vorteilhaft von mindestens 60 %, besonders vorteilhaft von mindestens 80 % und vorzugsweise von mindestens 90 % einer Fläche des ersten Objekts mit einer Fläche des zweiten Objekts überlappend angeordnet ist. Das Heizelement ist insbesondere bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Elektronikeinheit wenigstens teilweise und insbesondere vollständig überlappend mit der Elektronikeinheit angeordnet. Das Gebläserad könnte bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Elektronikeinheit wenigstens teilweise überlappend und insbesondere wenigstens teilweise überlappungsfrei mit dem Heizelement angeordnet sein. Alternativ oder zusätzlich könnte das Gebläserad bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Elektronikeinheit wenigstens teilweise und insbesondere vollständig überlappend mit der Elektronikeinheit angeordnet sein. Dadurch kann insbesondere eine optimale Raumausnutzung und/oder eine kompakte Ausgestaltung erzielt werden.

Zudem wird vorgeschlagen, dass die Abzugseinheit zumindest eine Luftleiteinheit aufweist, welche dazu vorgesehen ist, zumindest die Dämpfe von der Elektronikeinheit fernzuhalten. Die Luftleiteinheit weist insbesondere zumindest einen Teilbereich auf, welcher in einer Einbaulage zwischen dem Gebläserad und der Elektronikeinheit angeordnet ist. Beispielsweise könnte die Luftleiteinheit wenigstens im Wesentlichen plattenförmig ausgebildet sein und insbesondere in einer Einbaulage unterhalb des Gebläserads angeordnet sein. Vorteilhaft umgibt die Luftleiteinheit das Gebläserad in wenigstens einem montierten Zustand bezüglich eines Mittelpunkts und/oder Schwerpunkts des Gebläserads über einen Winkelbereich von mindestens 90°, insbesondere von mindestens 180°, vorteilhaft von mindestens 270°, besonders vorteilhaft von mindestens 300° und vorzugsweise von 330°. Insbesondere ist die Luftleiteinheit dazu vorgesehen, in wenigstens einem Betriebszustand die Elektronikeinheit gegenüber dem Gebläserad abzusichern. Die Luftleiteinheit ist insbesondere dazu vorgesehen, in wenigstens einem Betriebszustand gegenüber von dem Gebläserad kommenden Fluiden wenigstens im Wesentlichen abzusichern und insbesondere diese Fluide von der Elektronikeinheit fernzuhalten. Die von dem Gebläserad kommenden Fluide könnten insbesondere von dem Gebläserad tropfende Flüssigkeiten, wie beispielsweise Öl und/oder Wasser und/oder Wrasen sein. Dadurch kann insbesondere ein vorzeitiger Defekt und/oder eine Beschädigung der Elektronikeinheit vermieden werden, wodurch insbesondere eine langlebige Ausgestaltung erzielt werden kann.

WO 2019/048976

6

PCT/IB2018/056439

5 Weiterhin wird vorgeschlagen, dass die Luftleiteinheit dazu vorgesehen ist, die Dämpfe in  
zumindest einen Außenbereich abzuleiten. Unter einem „Außenbereich“ soll insbesondere  
ein Bereich verstanden werden, welcher in wenigstens einem montierten Zustand außerhalb  
der Außengehäuseeinheit angeordnet ist. Insbesondere definiert und/oder begrenzt die Luft-  
leiteinheit zumindest einen Abluftkanal, welcher insbesondere das Gebläserad mit dem Au-  
ßenbereich verbindet und welcher insbesondere in wenigstens einem Betriebszustand zu  
einem Führen der Dämpfe von dem Gebläserad in den Außenbereich vorgesehen ist, und  
zwar insbesondere aufgrund einer von dem Gebläserad den Dämpfen zugeführten Bewe-  
gungsenergie. Dadurch können die Dämpfe insbesondere gezielt abtransportiert werden,  
10 wodurch insbesondere ein hoher Bedienerkomfort erreicht werden kann.

Der Außenbereich könnte in einer Einbaulage insbesondere ein seitlicher Bereich der Au-  
ßengehäuseeinheit sein. Alternativ oder zusätzlich könnte der Außenbereich in einer Einbaulage  
insbesondere ein frontseitiger Bereich sein, welcher insbesondere einem Bediener zu-  
gewandt angeordnet sein könnte. Vorzugsweise ist der Außenbereich ein in einer Einbaulage  
15 rückseitiger Bereich, welcher insbesondere einem Bediener abgewandt angeordnet ist.  
Dadurch können die Dämpfe insbesondere von einem Bediener ferngehalten werden,  
wodurch insbesondere ein angenehmes Bedienen und/oder Garen ermöglicht werden kann.

Zudem wird vorgeschlagen, dass die Kochfeldvorrichtung zumindest eine Außengehäu-  
seeinheit aufweist, welche die Luftleiteinheit wenigstens zu einem Großteil umgibt. Unter  
20 einer „Außengehäuseeinheit“ soll insbesondere eine Einheit verstanden werden, welche in  
wenigstens einem montierten Zustand einem Bediener zugewandt und/oder zugänglich an-  
geordnet ist und welche insbesondere in dem montierten Zustand mit der Kochfeldplatte ver-  
bunden ist und insbesondere mit der Kochfeldplatte einen Lagerraum, welcher insbesondere  
einen Geräteinnenraum definieren könnte, wenigstens zu einem Großteil begrenzt und/oder  
25 definiert. Unter der Wendung, dass die Außengehäuseeinheit die Luftleiteinheit wenigstens  
„zu einem Großteil“ umgibt, soll insbesondere verstanden werden, dass die Außengehäu-  
seeinheit die Luftleiteinheit bezüglich eines Mittelpunkts und/oder Schwerpunkts der Luftleit-  
einheit in wenigstens einer Ebene, welche insbesondere beliebig gewählt werden kann und  
vorteilhaft insbesondere wenigstens im Wesentlichen parallel zu einer Haupterstreckungs-  
ebene der Elektronikeinheit und/oder zu einer Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte  
30 ausgerichtet ist, über einen Winkelbereich von mindestens 270°, insbesondere von mindes-  
tens 300°, vorteilhaft von mindestens 320°, besonders vorteilhaft von mindestens 340° und  
vorzugsweise von 350° umgibt. Die Luftleiteinheit ist in wenigstens einem montierten Zu-  
stand insbesondere innerhalb des Lagerraums angeordnet. Dadurch kann insbesondere eine

geschützte Anordnung der Luftleiteinheit und/oder des Gebläserads erzielt werden, wodurch insbesondere eine langlebige Ausgestaltung erreicht werden kann.

Weiterhin wird vorgeschlagen, dass die Kochfeldvorrichtung zumindest eine Außengehäuseeinheit aufweist, welche zumindest ein Bodengehäuseteil aufweist, von dem die Elektronikeinheit getragen ist. Unter einem „Bodengehäuseteil“ soll insbesondere ein Element verstanden werden, welches in einer Einbaulage eine unterste Begrenzung wenigstens eines von der Außengehäuseeinheit wenigstens teilweise begrenzten Lagerraums bildet und/oder welches sich bei einer senkrechten Betrachtung auf zumindest eine Haupterstreckungsebene der Außengehäuseeinheit und/oder auf zumindest eine Haupterstreckungsebene der Elektronikeinheit über einen Flächenanteil von mindestens 50 %, insbesondere von mindestens 60 %, vorteilhaft von mindestens 70 %, besonders vorteilhaft von mindestens 80 % und vorzugsweise von mindestens 90 % einer Gesamtfläche der Außengehäuseeinheit erstreckt. Die Elektronikeinheit liegt in einer Einbaulage insbesondere wenigstens teilweise auf dem Bodengehäuseteil auf. In einer Einbaulage nimmt das Bodengehäuseteil insbesondere eine Gewichtskraft der Elektronikeinheit wenigstens zu einem Großteil auf und leitet die aufgenommene Gewichtskraft insbesondere an zumindest eine weitere Einheit weiter, wie insbesondere die Kochfeldplatte. In wenigstens einem montierten Zustand erstreckt sich die Elektronikeinheit insbesondere über einen Flächenanteil von mindestens 50 %, insbesondere von mindestens 60 %, vorteilhaft von mindestens 70 %, besonders vorteilhaft von mindestens 80 % und vorzugsweise von mindestens 90 % einer Gesamtfläche des Bodengehäuseteils und/oder über eine Fläche von mindestens 1800 cm<sup>2</sup>, insbesondere von mindestens 2150 cm<sup>2</sup>, vorteilhaft von mindestens 2500 cm<sup>2</sup>, besonders vorteilhaft von mindestens 2750 cm<sup>2</sup> und vorzugsweise von mindestens 3000 cm<sup>2</sup>. Dadurch kann insbesondere eine großflächige Ausgestaltung und/oder sichere Anordnung der Elektronikeinheit ermöglicht werden.

Ferner wird vorgeschlagen, dass in einer Einbaulage ein insbesondere kleinster Abstand zwischen dem Gebläserad und dem Heizelement in der Vertikalrichtung maximal 70 mm, insbesondere maximal 60 mm, vorteilhaft maximal 50 mm, besonders vorteilhaft maximal 45 mm und vorzugsweise maximal 40 mm beträgt. Insbesondere beträgt ein insbesondere kleinster Abstand zwischen dem Gebläserad und dem Heizelement in der Vertikalrichtung mindestens 5 mm, insbesondere mindestens 10 mm, vorteilhaft mindestens 15 mm, besonders vorteilhaft mindestens 20 mm und vorzugsweise mindestens 25 mm. Dadurch kann insbesondere eine kompakte Ausgestaltung erreicht werden.

Zudem wird vorgeschlagen, dass in einer Einbaulage ein insbesondere kleinster Abstand zwischen der Elektronikeinheit und dem Heizelement in der Vertikalrichtung mindestens

- 70 mm, insbesondere mindestens 85 mm, vorteilhaft mindestens 100 mm, besonders vorteilhaft mindestens 120 mm und vorzugsweise mindestens 130 mm beträgt. Insbesondere beträgt ein insbesondere kleinster Abstand zwischen der Elektronikeinheit und dem Heizelement in der Vertikalrichtung maximal 180 mm, insbesondere maximal 200 mm, vorteilhaft maximal 210 mm, besonders vorteilhaft maximal 220 mm und vorzugsweise maximal 230 mm. Dadurch kann insbesondere eine räumliche Trennung zwischen der Elektronikeinheit und dem Heizelement ermöglicht werden, wodurch die Elektronikeinheit insbesondere in einem Bereich angeordnet werden kann, in welchem ein Erreichen von kritischen Temperaturen vermieden werden kann.
- 5
- 10 Weiterhin wird vorgeschlagen, dass die Kochfeldvorrichtung zumindest eine Kochfeldplatte aufweist, welche zumindest eine Abzugsausnehmung aufweist, die zu einem Durchtritt der Dämpfe vorgesehen ist. Unter einer „Abzugsausnehmung“ soll insbesondere eine Öffnung und/oder ein Loch in der Kochfeldplatte verstanden werden, durch welche/welches in wenigstens einem Betriebszustand das Gebläserad die Dämpfe aus dem Kochraum absaugt.
- 15 Insbesondere definiert und/oder begrenzt die Luftleiteinheit zumindest einen Abzugskanal, welcher insbesondere in wenigstens einem montierten Zustand die Abzugsausnehmung und das Gebläserad miteinander verbindet. Die Luftleiteinheit ist insbesondere dazu vorgesehen, mittels des Abzugskanals den Kochraum mit dem Gebläserad zu verbinden. Insbesondere ist der Abzugskanal zu einer Leitung der in dem Betriebszustand entstehenden Dämpfe vorgesehen. Dadurch kann insbesondere eine kompakte Ausgestaltung erreicht werden.
- 20
- Ferner wird vorgeschlagen, dass das Gebläserad bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte wenigstens teilweise überlappend mit der Abzugsausnehmung angeordnet ist. Unter der Wendung, dass das Gebläserad bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte wenigstens „teilweise“ überlappend mit der Abzugsausnehmung angeordnet ist, soll insbesondere verstanden werden, dass das Gebläserad bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte zu einem Flächenanteil von mindestens 50 %, insbesondere von mindestens 60 %, vorteilhaft von mindestens 70 %, besonders vorteilhaft von mindestens 80 % und vorzugsweise von mindestens 90 % einer Gesamtfläche des Gebläserads und/oder der Abzugsausnehmung überlappend mit der Abzugsausnehmung angeordnet ist.
- 25
- 30 Das Gebläserad ist in einer Einbaulage insbesondere in der Vertikalrichtung wenigstens teilweise unterhalb der Abzugsausnehmung angeordnet. Dadurch kann insbesondere eine einfache Absaugung der Dämpfe erzielt werden, da insbesondere eine kurze Wegstrecke zwischen der Abzugsausnehmung und dem Gebläserad bereitgestellt und damit insbesondere eine kurze zurückzulegende Wegstrecke der Dämpfe ermöglicht werden kann.
- 35

Beispielsweise könnte die Abzugseinheit ausschließlich das Gebläserad aufweisen. Vorzugsweise weist die Abzugseinheit zumindest ein weiteres Gebläserad auf, welches dazu vorgesehen ist, in wenigstens einem Betriebszustand entstehende Dämpfe aus dem Kochbereich wenigstens teilweise abzusaugen und welches in einer Einbaulage in der Vertikalrichtung zwischen der Elektronikeinheit und dem Heizelement angeordnet ist. Dadurch können die Dämpfe insbesondere besonders schnell aus dem Kochbereich abgesaugt werden, da insbesondere eine hohe Triebkraft zu einer Absaugung bereitgestellt werden kann. Besonders vorteilhaft kann bei Ausfall eines der Gebläseräder insbesondere ein weiteres der Gebläseräder einen Garbetrieb aufrechterhalten, wodurch insbesondere eine geringe Wahrscheinlichkeit eines kompletten Ausfalls der Abzugseinheit erzielt werden kann. Insbesondere kann anstatt eines einzigen, sehr teuren und hochwertigen Gebläserads zwei im Vergleich billigere Gebläseräder verwendet werden, wodurch insbesondere geringe Kosten erreicht werden können.

Das Gebläserad und das weitere Gebläserad könnten beispielsweise bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte wenigstens teilweise überlappend mit der Abzugsausnehmung angeordnet sein. Alternativ oder zusätzlich könnten das Gebläserad und das weitere Gebläserad bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte auf einer insbesondere einzigen Seite der Abzugsausnehmung angeordnet sein. Vorzugsweise sind das Gebläserad und das weitere Gebläserad bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte auf einander gegenüberliegenden Seiten der Abzugsausnehmung angeordnet. Dadurch kann insbesondere auf eine Anordnung eines Gebläserads direkt unterhalb der Abzugsausnehmung verzichtet werden, wodurch insbesondere in wenigstens einem Betriebszustand geringe Geräusche und einem Bediener ein komfortables Arbeiten insbesondere unter Vermeidung einer Geräuschbelästigung ermöglicht werden kann.

Ferner wird vorgeschlagen, dass die Abzugseinheit zumindest eine Fettfiltereinheit aufweist, welche insbesondere in einer Einbaulage einen minimalen Abstand von einer Oberkante der Kochfeldplatte von maximal 70 mm, insbesondere von maximal 50 mm, vorteilhaft von maximal 40 mm, besonders vorteilhaft von maximal 30 mm, vorzugsweise von maximal 20 mm und besonders bevorzugt von maximal 10 mm aufweist. Dadurch kann insbesondere eine besonders kompakte Ausgestaltung erzielt werden.

Die Kochfeldvorrichtung soll hierbei nicht auf die oben beschriebene Anwendung und Ausführungsform beschränkt sein. Insbesondere kann die Kochfeldvorrichtung zu einer Erfüllung einer hierin beschriebenen Funktionsweise eine von einer hierin genannten Anzahl von einzelnen Elementen, Bauteilen und Einheiten abweichende Anzahl aufweisen.

WO 2019/048976

10

PCT/IB2018/056439

Weitere Vorteile ergeben sich aus der folgenden Zeichnungsbeschreibung. In der Zeichnung sind Ausführungsbeispiele der Erfindung dargestellt. Die Zeichnung, die Beschreibung und die Ansprüche enthalten zahlreiche Merkmale in Kombination. Der Fachmann wird die Merkmale zweckmäßigerweise auch einzeln betrachten und zu sinnvollen weiteren Kombinationen zusammenfassen.

5

Es zeigen:

- Fig. 1 ein Kochfeld mit einer Kochfeldvorrichtung in einer schematischen Draufsicht,
- Fig. 2 einen Schnitt entlang der Linie II-II aus Figur 1 in einer schematischen Darstellung,
- Fig. 3 ein alternatives Kochfeld mit einer alternativen Kochfeldvorrichtung in einer schematischen Draufsicht und
- Fig. 4 einen Schnitt entlang der Linie IV-IV aus Figur 3 in einer schematischen Darstellung.

10

15 Fig. 1 zeigt ein Kochfeld 46a, das als ein Induktionskochfeld ausgebildet ist, mit einer Kochfeldvorrichtung 10a, die als eine Induktionskochfeldvorrichtung ausgebildet ist.

Die Kochfeldvorrichtung 10a weist eine Kochfeldplatte 36a auf. In einem montierten Zustand bildet die Kochfeldplatte 36a einen Teil eines Kochfeldaußengehäuses aus, und zwar insbesondere eines Kochfeldaußengehäuses insbesondere des Kochfelds 46a. Die Kochfeldplatte 20 36a ist zu einem Aufstellen von Gargeschirr vorgesehen (nicht dargestellt).

Die Kochfeldvorrichtung 10a weist im vorliegenden Ausführungsbeispiel acht Heizelemente 12a auf. Von mehrfach vorhandenen Objekten ist in den Figuren jeweils lediglich eines mit einem Bezugszeichen versehen. Die Heizelemente 12a sind matrixförmig angeordnet. Jeweils vier der Heizelemente 12a sind in einer Reihe angeordnet.

25 Alternativ könnte die Kochfeldvorrichtung 10a eine andere Anzahl an Heizelementen 12a aufweisen. Beispielsweise könnte die Kochfeldvorrichtung 10a zumindest zehn, insbesondere zumindest zwölf und vorteilhaft zumindest fünfzehn und vorzugsweise eine Vielzahl an Heizelementen 12a aufweisen. Die Kochfeldvorrichtung 10a könnte alternativ eine geringere Anzahl an Heizelementen 12a aufweisen, wie beispielsweise zwei und/oder drei und/oder 30 vier Heizelemente 12a. Im Folgenden wird lediglich eines der Heizelemente 12a beschrieben.

Das Heizelement 12a ist in einer Einbaulage unterhalb der Kochfeldplatte 36a angeordnet. Das Heizelement 12a ist dazu vorgesehen, auf der Kochfeldplatte 36a oberhalb der Heiz-

elemente 12a aufgestelltes Gargeschirr zu erhitzen. Das Heizelement 12a ist als Induktionsheizelement ausgebildet.

Die Kochfeldvorrichtung 10a weist eine Bedienerschnittstelle 48a zu einer Eingabe und/oder Auswahl von Betriebsparametern auf, beispielsweise einer Heizleistung und/oder einer Heizleistungsdichte und/oder einer Heizzone. Die Bedienerschnittstelle 48a ist zu einer Ausgabe eines Werts eines Betriebsparameters an einen Bediener vorgesehen.

Die Kochfeldvorrichtung 10a weist eine Steuereinheit 50a auf. Die Steuereinheit 50a ist dazu vorgesehen, in Abhängigkeit von mittels der Bedienerschnittstelle 48a eingegebener Betriebsparameter Aktionen auszuführen und/oder Einstellungen zu verändern. Die Steuereinheit 50a regelt in einem Heizbetriebszustand eine Energiezufuhr zu dem Heizelement 12a.

Die Kochfeldvorrichtung 10a weist eine Außengehäuseeinheit 28a auf (vgl. Fig. 2). Die Außengehäuseeinheit 28a bildet einen Teil des Kochfeldaußengehäuses aus. In einem montierten Zustand sind die Außengehäuseeinheit 28a und die Kochfeldplatte 36a miteinander verbunden, insbesondere aneinander befestigt. Die Außengehäuseeinheit 28a und die Kochfeldplatte 36a definieren einen Lagerraum 52a.

Die Kochfeldvorrichtung 10a weist ein Raumteilerelement 54a auf (vgl. Fig. 2). In einem montierten Zustand ist das Raumteilerelement 54a teilweise an der Außengehäuseeinheit 28a befestigt. In einer Einbaulage liegt das Raumteilerelement 54a teilweise auf der Außengehäuseeinheit 28a, insbesondere auf einer Ausformung der Außengehäuseeinheit 28a und/oder auf einer Stufe der Außengehäuseeinheit 28a, auf.

Das Raumteilerelement 54a unterteilt den Lagerraum 52a in zwei Teilräume. Ein erster Teilraum ist in einer Einbaulage oberhalb des Raumteilerelements 54a angeordnet. Der erste Teilraum ist in einem montierten Zustand auf einer der Kochfeldplatte 36a zugewandten Seite des Raumteilerelements 54a angeordnet. In dem ersten Teilraum ist das Heizelement 12a angeordnet. Das Raumteilerelement 54a trägt in einer Einbaulage das Heizelement 12a zu einem Großteil.

Ein zweiter Teilraum ist in einer Einbaulage unterhalb des Raumteilerelements 54a angeordnet. Der zweite Teilraum ist in einem montierten Zustand auf einer der Kochfeldplatte 36a abgewandten Seite des Raumteilerelements 54a angeordnet. In dem zweiten Teilraum ist die Steuereinheit 50a angeordnet.

Die Kochfeldvorrichtung 10a weist eine Elektronikeinheit 20a auf (vgl. Fig. 2). In einer Einbaulage ist die Elektronikeinheit 20a in dem Lagerraum 52a, und zwar insbesondere in dem zweiten Teilraum, angeordnet. In einer Einbaulage ist die Elektronikeinheit 20a unterhalb des Heizelements 12a angeordnet.

Die Außengehäuseeinheit 28a weist ein Bodengehäuseteil 30a auf. In einer Einbaulage ist die Elektronikeinheit 20a von dem Bodengehäuseteil 30a getragen. Die Elektronikeinheit 20a liegt in einer Einbaulage auf dem Bodengehäuseteil 30a teilweise auf.

5 Im vorliegenden Ausführungsbeispiel ist die Elektronikeinheit 20a als eine Versorgungselektronik ausgebildet. Die Elektronikeinheit 20a ist zu einer Versorgung des Heizelements 12a vorgesehen. Zu diesem Zweck ist die Elektronikeinheit 20a mit dem Heizelement 12a insbesondere elektrisch verbunden (nicht dargestellt).

10 Das Raumteilerelement 54a ist als ein Abschirmelement ausgebildet. In einem Betriebszustand schirmt das Raumteilerelement 54a in dem zweiten Teilraum angeordnete Objekte gegenüber elektromagnetischer Strahlung, welche insbesondere von dem Heizelement 12a ausgeht, im Wesentlichen ab.

15 Die Kochfeldvorrichtung 10a weist eine Abzugseinheit 14a auf (vgl. Fig. 1 und 2). In einer Einbaulage ist die Abzugseinheit 14a teilweise in dem Lagerraum 52a angeordnet. Die Abzugseinheit 14a weist ein Gebläserad 16a auf. In einem Betriebszustand saugt die Abzugseinheit 14a mittels des Gebläserads 16a in einem Betriebszustand entstehende Dämpfe aus einem Kochbereich 18a teilweise ab. Der Kochbereich 18a ist ein Bereich, welcher sich in einer Einbaulage oberhalb der Kochfeldplatte 36a befindet.

20 Das Gebläserad 16a ist in einer Einbaulage in dem Lagerraum 52a angeordnet. In einer Einbaulage ist das Gebläserad 16a in einer Vertikalrichtung 22a zwischen der Elektronikeinheit 20a und dem Heizelement 12a angeordnet. Die Vertikalrichtung 22a ist im Wesentlichen senkrecht zu dem Bodengehäuseteil 30a ausgerichtet.

25 Im vorliegenden Ausführungsbeispiel beträgt in einer Einbaulage ein Abstand 32a zwischen dem Gebläserad 16a und dem Heizelement 12a in der Vertikalrichtung 22a im Wesentlichen 10 mm. In einer Einbaulage beträgt im vorliegenden Ausführungsbeispiel ein Abstand 34a zwischen der Elektronikeinheit 20a und dem Heizelement 12a in der Vertikalrichtung 22a im Wesentlichen 60 mm.

30 In einer Horizontalrichtung 56a ist das Gebläserad 16a in einer Einbaulage im Wesentlichen mittig angeordnet. Die Horizontalrichtung 56a ist im Wesentlichen senkrecht zu der Vertikalrichtung 22a ausgerichtet. Die Horizontalrichtung 56a ist im Wesentlichen parallel zu einer Frontkante der Kochfeldplatte 36a ausgerichtet.

Das Gebläserad 16a ist in einer Tiefenrichtung 58a in einer Einbaulage im Wesentlichen mittig angeordnet. Die Tiefenrichtung 58a ist im Wesentlichen senkrecht zu der Vertikalrichtung 22a ausgerichtet. Die Tiefenrichtung 58a ist im Wesentlichen senkrecht zu einer Frontkante der Kochfeldplatte 36a ausgerichtet.

- Bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Elektronikeinheit 20a ist das Gebläserad 16a überlappend mit der Elektronikeinheit 20a angeordnet. In einer Einbaulage ist das Gebläserad 16a in der Vertikalrichtung 22a oberhalb der Elektronikeinheit 20a angeordnet. Zwischen der Elektronikeinheit 20a und dem Gebläserad 16a ist in einer Einbaulage in der Vertikalrichtung 22a eine Luftleiteinheit 24a angeordnet.
- Die Abzugseinheit 14a weist die Luftleiteinheit 24a auf. Die Luftleiteinheit 24a hält in einem Betriebszustand die Dämpfe, welche in dem Betriebszustand entstehen, von der Elektronikeinheit 20a fern. In einem montierten Zustand umgibt die Luftleiteinheit 24a das Gebläserad 16a bezüglich eines Mittelpunkts und/oder Schwerpunkts des Gebläserads 16a in einer Ebene betrachtet, welche insbesondere parallel zu einer Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte 36a ausgerichtet ist, im Wesentlichen vollständig.
- In einem Betriebszustand leitet die Luftleiteinheit 24a die in dem Betriebszustand entstehenden Dämpfe in einen Außenbereich 26a ab (vgl. Fig. 1). Im vorliegenden Ausführungsbeispiel ist der Außenbereich 26a ein in einer Einbaulage rückseitiger Bereich.
- Die Luftleiteinheit 24a weist eine Abluftausnehmung 60a auf. Die Abluftausnehmung 60a der Luftleiteinheit 24a ist in einem rückseitigen Bereich der Luftleiteinheit 24a angeordnet. Die Abluftausnehmung 60a der Luftleiteinheit 24a ist in der Horizontalrichtung 56a in einem seitlichen Bereich der Luftleiteinheit 24a angeordnet.
- In einer Einbaulage ist die Luftleiteinheit 24a in dem Lagerraum 52a angeordnet. Die Außengehäuseeinheit 28a umgibt die Luftleiteinheit 24a in einer Einbaulage.
- Die Außengehäuseeinheit 28a weist eine Abluftausnehmung 62a auf. Die Abluftausnehmung 60a der Außengehäuseeinheit 28a ist in einem rückseitigen Bereich der Außengehäuseeinheit 28a angeordnet. Bei einer Betrachtung in einer parallel zu der Tiefenrichtung 58a ausgerichteten Blickrichtung sind die Abluftausnehmung 60a der Luftleiteinheit 24a und die Abluftausnehmung 62a der Außengehäuseeinheit 28a teilweise überlappend miteinander angeordnet.
- In einem Betriebszustand leitet die Luftleiteinheit 24a die in dem Betriebszustand entstehenden Dämpfe über die Abluftausnehmung 60a der Luftleiteinheit 24a und über die Abluftausnehmung 62a der Außengehäuseeinheit 28a in den Außenbereich 26a ab.
- Das Gebläserad 16a ist in einer Einbaulage im vorliegenden Ausführungsbeispiel in der Vertikalrichtung 22a teilweise unterhalb einer Abzugsausnehmung 38a der Kochfeldplatte 36a angeordnet. Die Kochfeldplatte 36a weist die Abzugsausnehmung 38a auf. Die Abzugsausnehmung 38a ist zu einem Durchtritt der in dem Betriebszustand entstehenden Dämpfe vorgesehen. Bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Koch-

feldplatte 36a ist das Gebläserad 16a teilweise überlappend mit der Abzugsausnehmung 38a angeordnet. Die Abzugsausnehmung 38a erstreckt sich in einer Einbaulage im Wesentlichen parallel zu der Tiefenrichtung 58a.

- 5 In einem Bereich der Abzugsausnehmung 38 ist eine Fettfiltereinheit 42a angeordnet. Die Abzugseinheit 14a weist die Fettfiltereinheit 42a auf. Das Gebläserad 16a saugt in einem Betriebszustand die in dem Betriebszustand entstehenden Dämpfe durch die Fettfiltereinheit 42a aus dem Kochbereich 18a ab. Die Fettfiltereinheit 42a weist im vorliegenden Ausführungsbeispiel in einer Einbaulage einen minimalen Abstand 44a von einer Oberkante der Kochfeldplatte 36a von im Wesentlichen 5 mm auf.
- 10 In Fig. 3 und 4 ist ein weiteres Ausführungsbeispiel der Erfindung gezeigt. Die nachfolgenden Beschreibungen beschränken sich im Wesentlichen auf die Unterschiede zwischen den Ausführungsbeispielen, wobei bezüglich gleich bleibender Bauteile, Merkmale und Funktionen auf die Beschreibung des Ausführungsbeispiels der Fig. 1 bis 2 verwiesen werden kann. Zur Unterscheidung der Ausführungsbeispiele ist der Buchstabe a in den Bezugszeichen des
- 15 Ausführungsbeispiels in den Fig. 1 bis 2 durch den Buchstaben b in den Bezugszeichen des Ausführungsbeispiels der Fig. 3 und 4 ersetzt. Bezüglich gleich bezeichneter Bauteile, insbesondere in Bezug auf Bauteile mit gleichen Bezugszeichen, kann grundsätzlich auch auf die Zeichnungen und/oder die Beschreibung des Ausführungsbeispiels der Fig. 1 bis 2 verwiesen werden.
- 20 Fig. 3 zeigt ein alternatives Kochfeld 46b mit einer alternativen Kochfeldvorrichtung 10b, welche acht Heizelemente 12b, von welchen jedoch im Folgenden lediglich eines beschrieben wird, und eine Abzugseinheit 14b aufweist. Die Abzugseinheit 14b weist ein Gebläserad 16b und ein weiteres Gebläserad 40b auf. In einem Betriebszustand saugen das Gebläserad 16b und das weitere Gebläserad 40b in dem Betriebszustand entstehende Dämpfe aus einem
- 25 Kochbereich 18b teilweise ab.
- In einer Einbaulage sind das Gebläserad 16b und das weitere Gebläserad 40b in einer Vertikalrichtung 22b zwischen einer Elektronikeinheit 20b und dem Heizelement 12b angeordnet. In einer Horizontalrichtung 56b sind das Gebläserad 16b und das weitere Gebläserad 40b bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Hauptstreckungsebene einer Kochfeldplatte
- 30 36b auf einander gegenüberliegenden Seiten einer Abzugsausnehmung 38b der Kochfeldplatte 36b angeordnet.
- Die Abzugseinheit 14b weist eine Luftleiteinheit 24b auf. In einem montierten Zustand umgibt die Luftleiteinheit 24b das Gebläserad 16b und das weitere Gebläserad 40b bezüglich eines Mittelpunkts und/oder Schwerpunkts des Gebläserads 16b und/oder des weiteren Gebläser-

ads 40b in einer Ebene betrachtet, welche insbesondere parallel zu einer Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte 36b ausgerichtet ist, im Wesentlichen vollständig.

5 Eine Abluftausnehmung 60b der Luftleiteinheit 24b ist in einer Horizontalrichtung 56b im Wesentlichen mittig, insbesondere bezüglich einer Erstreckung der Kochfeldplatte 36b in der Horizontalrichtung 56b, angeordnet. Bei einer Betrachtung in einer parallel zu einer Tiefenrichtung 58b ausgerichteten Blickrichtung sind die Abluftausnehmung 60b der Luftleiteinheit 24b und eine Abluftausnehmung 62b der Außengehäuseeinheit 28b teilweise überlappend miteinander angeordnet.

WO 2019/048976

16

PCT/IB2018/056439

**Bezugszeichen**

10	Kochfeldvorrichtung
12	Heizelement
14	Abzugseinheit
16	Gebläserad
18	Kochbereich
20	Elektronikeinheit
22	Vertikalrichtung
24	Luftleiteinheit
26	Außenbereich
28	Außengehäuseeinheit
30	Bodengehäuseteil
32	Abstand
34	Abstand
36	Kochfeldplatte
38	Abzugsausnehmung
40	Weiteres Gebläserad
42	Fettfiltereinheit
44	Abstand
46	Kochfeld
48	Bedienerschnittstelle
50	Steuereinheit
52	Lagerraum
54	Raumteilerelement
56	Horizontalrichtung
58	Tiefenrichtung
60	Abluftausnehmung
62	Abluftausnehmung

## ANSPRÜCHE

1. Kochfeldvorrichtung, insbesondere Induktionskochfeldvorrichtung, mit zumindest einem Heizelement (12a-b), mit zumindest einer Abzugseinheit (14a-b), welche zu-  
mindest ein Gebläserad (16a-b) aufweist und welche dazu vorgesehen ist, mittels  
5 des Gebläserads (16a-b) in wenigstens einem Betriebszustand entstehende Dämpfe aus zumindest einem Kochbereich (18a-b) wenigstens teilweise abzusaugen, und mit zumindest einer Elektroneinheit (20a-b), **dadurch gekennzeichnet, dass** das Gebläserad (16a-b) in einer Einbaulage in einer Vertikalrichtung (22a-b) zwischen der Elektroneinheit (20a-b) und dem Heizelement (12a-b) angeordnet ist.
- 10 2. Kochfeldvorrichtung nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Gebläserad (16a-b) bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Elektroneinheit (20a-b) wenigstens teilweise überlappend mit der Elektroneinheit (20a-b) angeordnet ist.
- 15 3. Kochfeldvorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Abzugseinheit (14a-b) zumindest eine Luftleiteinheit (24a-b) aufweist, welche dazu vorgesehen ist, zumindest die Dämpfe von der Elektroneinheit (20a-b) fernzuhalten.
- 20 4. Kochfeldvorrichtung nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Luftleiteinheit (24a-b) dazu vorgesehen ist, die Dämpfe in zumindest einen Außenbereich (26a-b) abzuleiten.
5. Kochfeldvorrichtung nach Anspruch 4, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Außenbereich (26a-b) ein in einer Einbaulage rückseitiger Bereich ist.
- 25 6. Kochfeldvorrichtung nach einem der Ansprüche 3 bis 5, **gekennzeichnet durch** zumindest eine Außengehäuseeinheit (28a-b), welche die Luftleiteinheit (24a-b) wenigstens zu einem Großteil umgibt.
7. Kochfeldvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** zumindest eine Außengehäuseeinheit (28a-b), welche zumindest ein Bodengehäuseteil (30a-b) aufweist, von dem die Elektroneinheit (20a-b) getragen ist.

WO 2019/048976

18

PCT/IB2018/056439

8. Kochfeldvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** in einer Einbaulage ein Abstand (32a-b) zwischen dem Gebläserad (16a-b) und dem Heizelement (12a-b) in der Vertikalrichtung (22a-b) maximal 70 mm beträgt.
- 5 9. Kochfeldvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** in einer Einbaulage ein Abstand (34a-b) zwischen der Elektroeinheit (20a-b) und dem Heizelement (12a-b) in der Vertikalrichtung (22a-b) mindestens 70 mm beträgt.
- 10 10. Kochfeldvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **gekennzeichnet durch** zumindest eine Kochfeldplatte (36a-b), welche zumindest eine Abzugsausnehmung (38a-b) aufweist, die zu einem Durchtritt der Dämpfe vorgesehen ist.
- 15 11. Kochfeldvorrichtung nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Gebläserad (16a) bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte (36a) wenigstens teilweise überlappend mit der Abzugsausnehmung (38a) angeordnet ist.
- 20 12. Kochfeldvorrichtung nach einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Abzugseinheit (14b) zumindest ein weiteres Gebläserad (40b) aufweist, welches dazu vorgesehen ist, in wenigstens einem Betriebszustand entstehende Dämpfe aus dem Kochbereich (18b) wenigstens teilweise abzusaugen und welches in einer Einbaulage in der Vertikalrichtung (22b) zwischen der Elektroeinheit (20b) und dem Heizelement (12b) angeordnet ist.
- 25 13. Kochfeldvorrichtung zumindest nach den Ansprüchen 10 und 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Gebläserad (16b) und das weitere Gebläserad (40b) bei einer senkrechten Betrachtung auf eine Haupterstreckungsebene der Kochfeldplatte (36b) auf einander gegenüberliegenden Seiten der Abzugsausnehmung (38b) angeordnet sind.
- 30 14. Kochfeldvorrichtung zumindest nach Anspruch 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Abzugseinheit (14a-b) zumindest eine Fettfiltereinheit (42a-b) aufweist, welche einen minimalen Abstand (44a-b) von einer Oberkante der Kochfeldplatte (36a-b) von maximal 70 mm aufweist.

**WO 2019/048976**

19

**PCT/IB2018/056439**

15. Kochfeld, insbesondere Induktionskochfeld, mit zumindest einer Kochfeldvorrichtung (10a-b) nach einem der vorhergehenden Ansprüche.

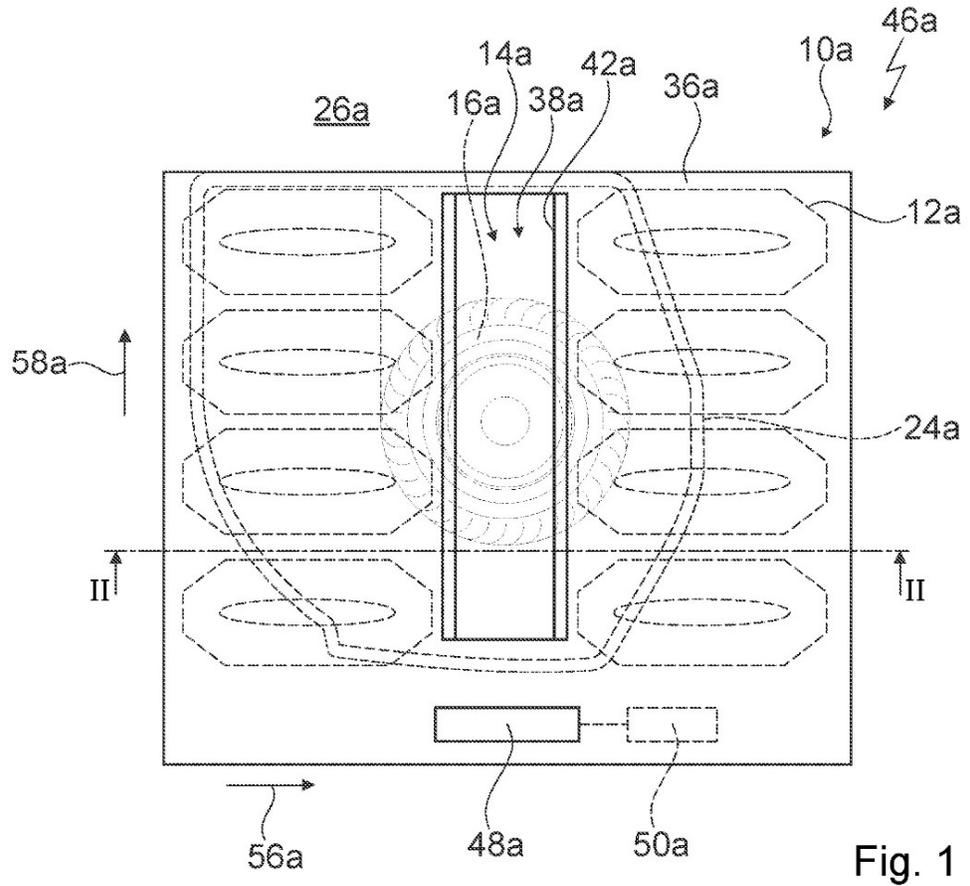


Fig. 1

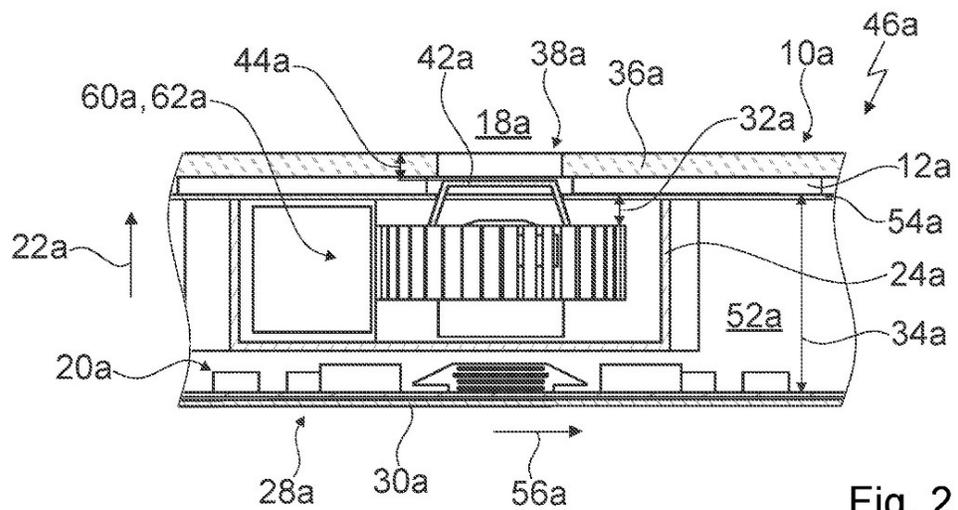


Fig. 2

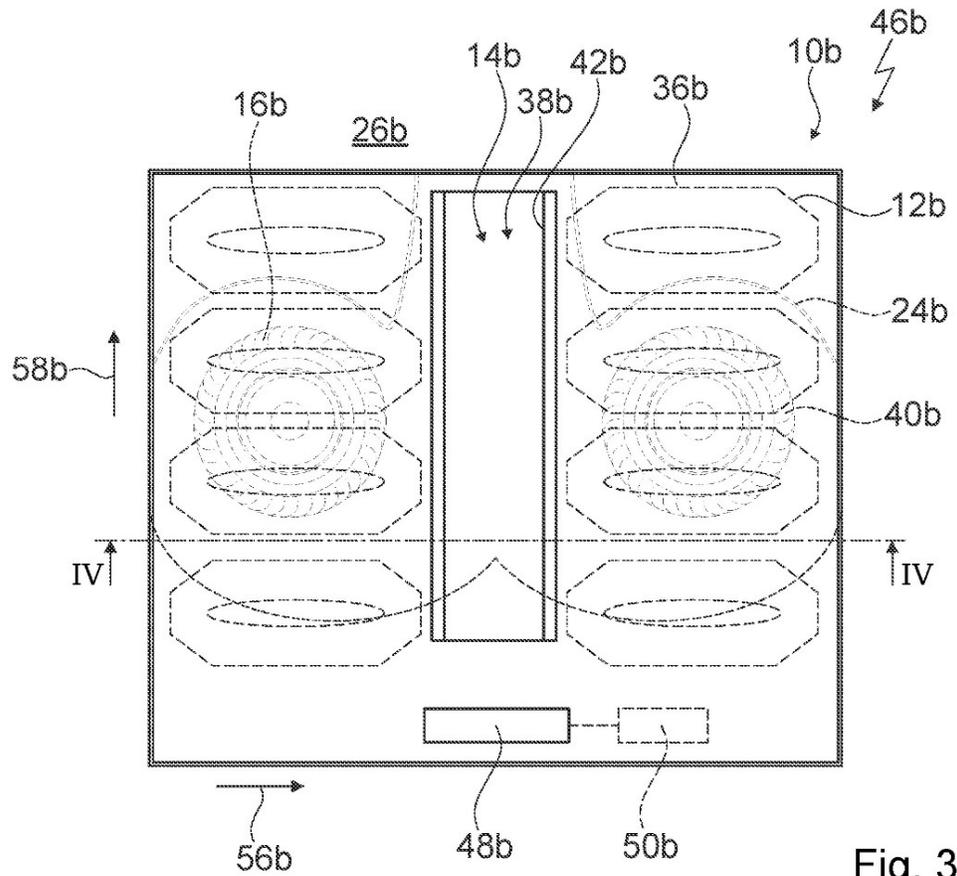


Fig. 3

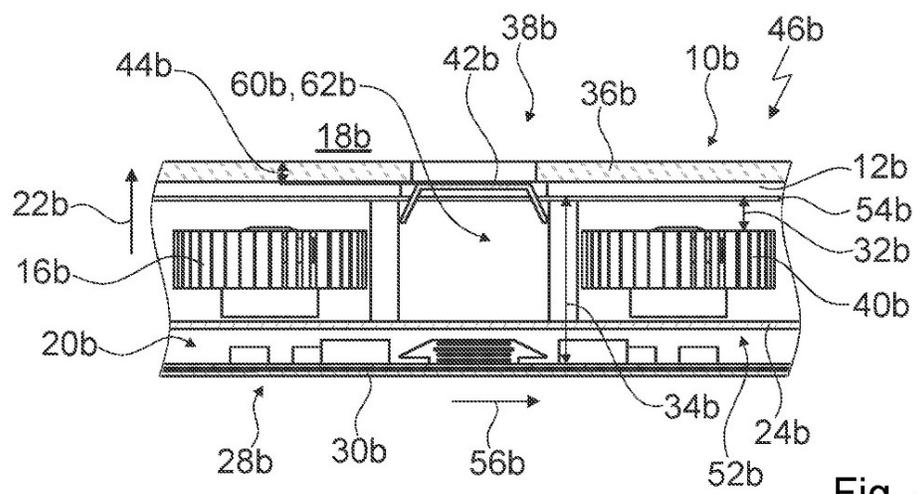


Fig. 4

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/IB2018/056439

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b> <i>F24C 15/20</i> (2006.01) According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b> Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H05B; F24C Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used) EPO-Internal, WPI Data		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2017029128 A1 (BSH HAUSGERÄTE GMBH [DE]) 23 February 2017 (2017-02-23) page 3, lines 20-29 page 7, lines 5-9, 19-25; figure 4	1-15
A	DE 102015103030 A1 (MIELE & CIE [DE]) 08 September 2016 (2016-09-08) figure 1	1-15
A	WO 2017103708 A1 (ELICA SPA [IT]) 22 June 2017 (2017-06-22) figure 3	1-15
A	AU 448292 B2 (JENN-AIR CORPORATION) 29 April 1974 (1974-04-29) figures 1-2	1-15
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "I" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed		"J" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family
Date of the actual completion of the international search <b>28 November 2018</b>		Date of mailing of the international search report <b>06 December 2018</b>
Name and mailing address of the ISA/EP <b>European Patent Office</b> <b>p.b. 5818, Patentlaan 2, 2280 HV Rijswijk</b> <b>Netherlands</b> Telephone No. (+31-70)340-2040 Facsimile No. (+31-70)340-3016		Authorized officer <b>Pierron, Christophe</b> Telephone No.

Form PCT/ISA/210 (second sheet) (January 2015)

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.  
**PCT/IB2018/056439**

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
WO	2017029128	A1	23 February 2017	CN	107923630	A	17 April 2018
				EP	3338028	A1	27 June 2018
				US	2018209662	A1	26 July 2018
				WO	2017029128	A1	23 February 2017
DE	102015103030	A1	08 September 2016	NONE			
WO	2017103708	A1	22 June 2017	EP	3390918	A1	24 October 2018
				WO	2017103708	A1	22 June 2017
AU	448292	B2	29 April 1974	NONE			

Form PCT/ISA/210 (patent family annex) (January 2015)

## INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/IB2018/056439

A. KLASSIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES INV. F24C15/20 ADD.		
Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPC		
B. RECHERCHIERTE GEBIETE Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationsymbole) H05B F24C		
Recherchierte, aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen		
Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe) EPO-Internal, WPI Data		
C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	WO 2017/029128 A1 (BSH HAUSGERÄTE GMBH [DE]) 23. Februar 2017 (2017-02-23) Seite 3, Zeilen 20-29 Seite 7, Zeilen 5-9, 19-25; Abbildung 4 -----	1-15
A	DE 10 2015 103030 A1 (MIELE & CIE [DE]) 8. September 2016 (2016-09-08) Abbildung 1 -----	1-15
A	WO 2017/103708 A1 (ELICA SPA [IT]) 22. Juni 2017 (2017-06-22) Abbildung 3 -----	1-15
A	AU 448 292 B2 (JENN-AIR CORPORATION) 29. April 1974 (1974-04-29) Abbildungen 1-2 -----	1-15
<input type="checkbox"/> Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen		<input checked="" type="checkbox"/> Siehe Anhang Patentfamilie
* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :		** Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist
"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist		"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung, die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden
"E" frühere Anmeldung oder Patent, die bzw. das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist		"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung, die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderscher Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist
"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)		**& Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist
"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht		
"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist		
Datum des Abschlusses der internationalen Recherche	Absenddatum des internationalen Recherchenberichts	
28. November 2018	06/12/2018	
Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde Europäisches Patentamt, P. B. 5818 Patentlaan 2 NL - 2280 HV Rijswijk Tel. (+31-70) 340-2040 Fax: (+31-70) 340-3016	Bevollmächtigter Bediensteter  Pierron, Christophe	

Formblatt PCT/ISA/210 (Blatt 2) (April 2005)

**INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT**

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/IB2018/056439

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung
WO 2017029128 A1	23-02-2017	CN 107923630 A EP 3338028 A1 US 2018209662 A1 WO 2017029128 A1	17-04-2018 27-06-2018 26-07-2018 23-02-2017
DE 102015103030 A1	08-09-2016	KEINE	
WO 2017103708 A1	22-06-2017	EP 3390918 A1 WO 2017103708 A1	24-10-2018 22-06-2017
AU 448292	B2 29-04-1974	KEINE	

Formblatt PCT/ISA/210 (Anhang Patentfamilie) (April 2005)