

Identificación y clasificación de residuos plásticos generados en el desensamble de vehículos en el Centro Nacional de Salvamentos SURA

María José Céspedes Pérez^a, Margarita Maria Hernández Naranjo^a

Luis Fernando Tirado Gallego^b

^a Estudiante de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín Colombia

^b Profesor, Asesor del Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería de Procesos, Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Resumen

El sector automotriz ha ido transformando el tipo de materiales de fabricación de los automóviles a lo largo de los años, actualmente se ha incrementado el uso de polímeros y materiales compuestos; los cuales aportan al automóvil características de bajo peso, resistencia mecánica y reducción de consumo energético. La implementación de estos materiales y la alta comercialización de automóviles, han aumentado la cantidad de residuos plásticos que se generan al final de su vida útil, y a su vez la búsqueda de nuevas alternativas para la disposición final, reutilización, reciclado o valorización de las piezas.

En Colombia, el Centro Nacional de Salvamentos SURA (CNS) se ha convertido en un referente latinoamericano por la disposición final de los residuos generados en el desensamble de los vehículos siniestrados, y busca alcanzar un 97% de reutilización del total de los residuos. Los residuos plásticos por su parte, se han convertido en un tema de investigación debido a que no se cuenta con una caracterización práctica que permita identificar los tipos de residuos plásticos y limitan la posibilidad de darles un aprovechamiento óptimo. Por dicha razón, el propósito de este proyecto fue identificar los tipos de polímeros presentes en los residuos plásticos generados en el CNS, a través de la densidad del residuo y de la espectroscopia en el infrarrojo medio (MIR), y así crear una metodología práctica para la identificación y clasificación de los residuos plásticos en el proceso de desensamble.

Dentro de las 51 muestras tomadas y analizadas se lograron identificar el 86% de estas, con una composición de: CPE (39,22%), PP (13,73%), PC (7,84%), SAN (7,84%), PMMA (7,84%), Nylon 6/9 (5,88%), Polietileno Clorosulfonado (3,92%), Copolímero de 96% de Estireno + 4% divinilo (3,92%), Nylon 6 (3,92%), PEHD (1,96%), Nylon 6/6 (1,96%) y POM (1,96%) y se elaboraron metodologías prácticas de identificación de los polímeros que fueron consignadas en el Manual para la Identificación de los Plásticos en el CNS.

1. Introducción

Los materiales para la fabricación de automóviles han sufrido transformaciones gracias al desarrollo de nuevas tecnologías que han mejorado su eficiencia, propiedades y características, aportando un bajo peso y un incremento en la resistencia de sus partes. Inicialmente, los materiales para la fabricación de los automóviles se componían por aleaciones, que por su alta densidad incrementaban el consumo de combustible, surgiendo la necesidad de buscar nuevos materiales que cumplieran con las exigencias del mercado, funcionalidad, bajo peso, seguridad y eficiencia energética. Los materiales poliméricos y compuestos de matriz polimérica, termoplásticos, termoestables y elastómeros, se convirtieron en la solución para la industria, teniendo la ventaja

de satisfacer las necesidades con propiedades que por sí solo el material no tendría; su particularidad radica en que son el resultado de una perfecta combinación entre una matriz y un refuerzo [1]. El uso de plásticos en el diseño de los automóviles continúa aumentando, y para el 2020 se pronostica que el 18% del vehículo sea de estos materiales, ver Ilustración 1.

Estos polímeros están distribuidos en diferentes partes o accesorios y pueden encontrarse hasta 60 tipos de plásticos, ver Tabla 1.

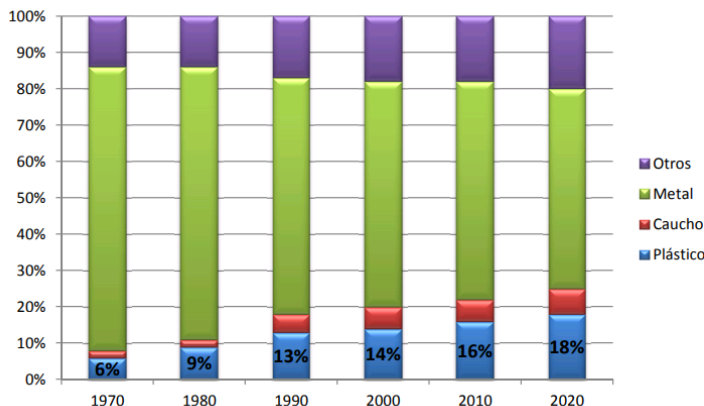


Ilustración 1. Materiales empleados en la fabricación de automóviles estimada por la firma A.T. Kearney. Tomada de [2].

Tabla 1. Composición de plásticos en un automóvil típico. Tomada de [3].

Componente	Mayor porcentaje de plásticos	Peso promedio (Kg)
Parachoques (Bumper)	PS, ABS, PC/PBT	10,00
Asientos	PUR, PP, PVC, ABS, PA	13,00
Tablero	PP, ABS, SMA, PPE, PC	7,00
Sistema de Combustible	HDPE, POM, PA, PP, PBT	6,00
Cuerpo	PP, PPE, UP	6,00
Debajo del capó	PA, PP, PBT	9,00
Equipamiento Interior	PP, ABS, PET, POM, PVC	20,00
Componentes Eléctricos	PP, PE, PBT, PA, PVC	7,00
Equipamiento Exterior	ABS, PA, PBT, POM, ASA, PP	4,00
Iluminación	PC, PBT, ABS, PMMA, UP	5,00
Tapicería	PVC, PUR, PP, PE	8,00
Reservas de líquidos	PP, PE, PA	1,00
Total		105,00

Con el empleo de estos materiales en la industria automotriz se han generado ventajas económicas y de diseño, sin embargo, también se originaron dificultades para la identificación, separación y correcto aprovechamiento de la variedad de plásticos presentes al final del ciclo de vida de los autos, además porque pueden estar recubiertos con pinturas, son co-polímeros o poseen recubrimientos [2], [4].

En el año 1997 la Comisión Europea inició la reglamentación para que el proceso de desensamble, reúso, recuperación y reciclaje de los vehículos al terminar su vida útil fuera ambientalmente amigable y estableció que, para el 1ero de enero de 2015, se aumentaría la reutilización y la valorización hasta un 95% del peso medio por vehículo al año, y la reutilización y reciclado hasta un 85 % del peso medio por vehículo al año [5]. En el 2015 Alemania y España cumplieron con la meta propuesta, el primero con 474,379 toneladas y el segundo con 724,807 toneladas recuperadas, recicladas o reusadas de vehículos, logrando el 95% de reutilización [6].

En Colombia el tratamiento ambiental de los vehículos al final de su vida útil es una preocupación relativamente nueva. En el 2015 el Ministerio de Ambiente desarrolló una guía ambiental basada en la Resolución 1606 de 2015, que se concentró en garantizar que todas las piezas, equipos y demás elementos de los vehículos de servicio público de transporte y particular de carga, fueran inhabilitados de forma definitiva e irreversible, con el fin de asegurar la gestión adecuada de los residuos peligrosos, maximizar la recuperación de los residuos, clasificar los materiales y disminuir al máximo el volumen de residuo no aprovechable [7].

Por su parte, fabricantes de automóviles como Mazda, Ford, Renault y Seat han incrementado el porcentaje de plástico en sus producciones, a su vez también se comprometieron en la reincorporación de materiales plásticos reciclados en su proceso y en la producción de partes monomateriales, con el fin de facilitar su recuperación y aprovechamiento [2].

Esta problemática en Colombia comienza a verse reflejada por factores como la compra de automóviles, la alta accidentalidad y el poco desarrollo de las alternativas de identificación de materiales plásticos. En el 2017 se adquirieron 238.238 unidades [8], [9], evidenciando el potencial económico y de generación de residuos que tiene el sector automotriz por su alta comercialización, situación que ha incrementado dentro del mercado la compra y adquisición de seguros para los vehículos. Seguros SURA es una empresa que, entre sus principales actividades, se dedicada al aseguramiento de automotores, en el 2017 contó con 656.000 automóviles asegurados; y el CNS es el lugar donde llegan los automóviles asegurados a nivel nacional que han sido declarados en pérdida total por siniestro o hurto, en este mismo año contó con 24.406 vehículos siniestrados [7], [10]–[12].

El Centro Nacional de Salvamentos SURA (CNS) realizó en promedio 24 desensambles de vehículos al mes en el 2017 [12], durante este proceso se obtienen piezas de diferentes materiales que se comercializan como repuestos, o por su estado son aprovechadas en otros procesos productivos [11]. El CNS cuenta con diferentes alternativas para el correcto aprovechamiento y desecho de los residuos, sin embargo, la variedad y cantidad de plásticos presentes dentro de los materiales a desechar han sido un reto en la etapa de clasificación y, por lo tanto, en el proceso de localización de rutas para su aprovechamiento.

En la actualidad existen diferentes técnicas comunes de separación aplicadas en las plantas de aprovechamiento de plástico: Flotación (Técnica basada en la densidad), Clasificación en aire (Técnica basada en peso másico), Separación electrostática, Separación por densidad magnética, Detección por rayos-X, Separación termo-mecánica, Separación óptica y Separación manual, estas técnicas de separación son empleadas según la capacidad o el volumen de reciclaje de las plantas de aprovechamiento [3] y estas están basadas en los principios básicos del método empírico, consignado en el Manual para la Identificación de Plásticos [13].

Por su parte en Colombia la norma GTC53-2 [14] describe las técnicas de identificación y separación de los plásticos enumeradas en la Tabla 2. La espectroscopia del infrarrojo medio (MIR) se encuentra contemplada como una de las técnicas de identificación apropiada y confiable, al poder determinar diferentes clases de polímeros. Por otro lado, determinar las propiedades de los polímeros y realizar una comparación con la literatura, permite la comprobación del tipo de polímero inicialmente identificado mediante espectroscopia en el MIR. La densidad del polímero es una propiedad que se determina mediante la balanza analítica, procedimiento que se encuentra descrito en la norma NTC 3577 [15], en la que se enumeran diferentes técnicas para determinar la densidad de los polímeros y está basada en los estándares ASTM D 792 [16] y ASTM D 1505 [17].

Tabla 2. Técnicas de identificación y separación de los plásticos. Elaboración propia tomada de la norma GTC53-2 [14].

Procedimiento	Principio	Evaluación de la eficiencia
Separación por flotación - hundimiento.	En un medio acuoso se separan resinas plásticas aprovechando la diferencia de densidades.	Sólo es eficaz la separación de dos o tres plásticos; bajo efecto de separación; algunos aditivos como los rellenos perturban el proceso.
Separación por centrifugación.	Separación por gravedad específica.	Pureza entre 95% y 99.9%.
Separación por flotación mediante reactivos selectivos.	Cuatro plásticos: PVC, PC, POM, y PPE, pueden separarse de sus mezclas sintéticas por medio de agentes humectantes comunes, como el sulfonato sódico de lignina, el ácido tánico, el aerosol OT y la saponina.	Pureza entre 87% y 90%.
Electroseparación.	Uso de carga electrostática en campos eléctricos para separar el PVC y el PE de cables y alambres.	Pureza superior al 90%, los contaminantes perturban el proceso, revestimiento de la superficie.
Espectroscopia del infrarrojo medio.	Pueden distinguirse once clases de plásticos: PE, PP, PVC, ABS, PC, PA, PBT, PPE, y EPDM. Espectroscopia de reflexión de 2,5m a 50m, estimulación de oscilaciones de grupo.	Buena identificación de plásticos técnicos, amplia preparación de la muestra, no puede automatizarse y es muy lento (tiempo estimado 20s/análisis).
Espectroscopia del infrarrojo cercano.	Separación de PET, PVC, PP, PE, y PS (espectroscopia de reflexión de 800 a 2500 nm, estimulación de oscilaciones armónicas y oscilaciones combinadas).	Buena identificación de envases plásticos, los rellenos (hollín) perturban el proceso, revestimientos de superficies, geometría de las muestras. Imposible identificar polímeros de color negro y aditivos.
Espectrofotometría por rayos UV del espectro visible infrarrojo.	Espectrofotometría de reflexión de 200nm a 400nm, estimulación de vibraciones y electrones.	Identificación mínima de los polímeros, gran influencia de los aditivos (tintes), difícil de automatizar.
Espectrofotometría fotoelectrónica láser.	Separación de PET, PVC, PP, PE, y PS. Espectrofotometría de emisión láser-plasma-átomo / respuesta de impulso térmico / termografía por rayos infrarrojos.	Identificación mínima de polímeros, identificación de ingredientes heteroatómicas; en principio automatizable.
Espectrofotometría de masas.	Detección de productos pirolíticos mediante espectrofotometría de masas.	Demasiado tiempo (1min), poco efecto de separación, difícil de automatizar.

Los plásticos representan el 9,4 % en peso del total de un automóvil y actualmente en el Centro Nacional de Ciencia y Tecnología (CNS) todos los tipos de polímeros son vendidos a empresas responsables de un posterior aprovechamiento, sin realizarse una previa separación y diferenciación. No contar con esto, limita las posibilidades que se pueden tener para la disposición y aprovechamiento del polímero, generando posibles pérdidas económicas y un inadecuado aprovechamiento de los materiales.

Este proyecto buscó identificar los tipos de plásticos que componen los automóviles que llegan al CNS aplicando la técnica instrumental Espectroscopia en el MIR y la medición de la densidad a través de la balanza analítica para los residuos plásticos, establecer patrones replicables y prácticos de identificación y separación en el CNS y determinar las mejores alternativas de disposición y reúso de los residuos poliméricos identificados.

2. Materiales y métodos

2.1. Identificar los tipos de residuos plásticos generados a partir del desensamble de los automóviles siniestrados por parte del personal del CNS.

2.1.1. Recolección de muestras de los residuos plásticos generados en el CNS

El procedimiento inició con la recolección de las muestras representativas de los residuos plásticos generados durante el desensamble de los vehículos y de aquellas almacenadas en el depósito del CNS. Durante la recolección se obtuvieron 51 muestras representativas de los vehículos, 8,2 kg de residuos plásticos, provenientes del parachoques (Bumper), tablero, sistema de combustible, cuerpo, equipamiento interior, componentes eléctricos, equipamiento exterior, iluminación, y reservas de líquidos, partes previamente seleccionadas, ver Tabla 1. Cada una de las muestras fue recolectada y marcada para conocer claramente su proveniencia durante la ejecución del proyecto.

2.1.2. Reducción de tamaño en la sierra sin fin

Se sometió a un proceso de reducción de tamaño cada una de las muestras recolectadas en una sierra sin fin, con el fin de facilitar su posterior trituración y realización de la espectroscopia el MIR. En la Ilustración 2 e Ilustración 3 se observa la reducción de tamaño a la que fueron sometidas



Ilustración 2. Muestra recolectada en el CNS.



Ilustración 3. Reducción de tamaño inicial de la muestra en la sierra sin fin.

2.1.3. Trituración de cada muestra en el molino de cuchillas

Luego de la reducción de tamaño en la sierra sin fin se sometió a una última reducción las muestras recolectadas, procedimiento que se realizó en el molino de cuchillas, el cual trituró la muestra hasta un tamaño de partícula capaz de pasar la malla de 5, es decir, de aproximadamente 4 mm, ver Ilustración 4.

Durante el proceso de molienda se tuvo especial cuidado con la limpieza del molino por la gran similitud en el color y textura de algunas muestras, para evitar la contaminación de los polímeros que dificultaran la

identificación posterior. El proceso se ejecutó de la siguiente manera: limpieza inicial del molino, ubicación de la malla 5 y del recipiente de captura del material triturado, encendido del molino, molienda del material durante 5 minutos, apagado de la máquina, almacenamiento de la muestra triturada en su respectiva bolsa y limpieza final del molino. La limpieza del molino, tanto inicial como final, constó de la apertura del compartimento de las cuchillas y de la malla para la eliminación de los residuos del polímero previamente molido, con el uso de aire comprimido, el cual facilitó la extracción de todo el material retenido entre las cuchillas.



Ilustración 4. Muestra del residuo plástico luego de la molienda en el molino de cuchillas.

2.1.4. Determinación de la densidad en la balanza analítica Metter Toledo

Cuando las 51 muestras se encontraron trituradas, se comenzó la identificación de cada una con el ensayo de densidad. Este ensayo se realizó en la balanza analítica, en la cual se aplica el principio de Arquímedes, el cual indica que “todo cuerpo sumergido dentro de un fluido experimenta una fuerza ascendente llamada empuje, equivalente al peso del fluido desalojado por el cuerpo” [18] y permite determinar a través de la Ecuación 1 la densidad correspondiente del polímero estudiado.

Ecuación 1. Ecuación principio de Arquímedes [18].

$$\rho = \frac{\rho_{\text{fluido}} * W_{\text{aire}}}{W_{\text{aire}} - W_{\text{sumergido}}}$$

El montaje de la balanza analítica para la medición del peso del polímero en el aire y sumergido en el fluido, consta de adecuar la balanza con el soporte, un beaker con el fluido etanol, con pureza del 99,99% y densidad de 0,789 g/cm³ [19], y la plataforma para ubicar las partículas de la muestra polimérica, ver Ilustración 5. Luego de tener el montaje listo, se pesan dos partículas, en dos ocasiones diferentes, agregándolas en la plataforma que se encuentra en el aire para determinar el peso de estas, ver Ilustración 6, y en la plataforma que está sumergida en etanol para obtener el peso desalojado por las partículas, ver Ilustración 7, por último, se aplica la Ecuación 1 para determinar la densidad del polímero en cada uno de los dos ensayos para la misma muestra.

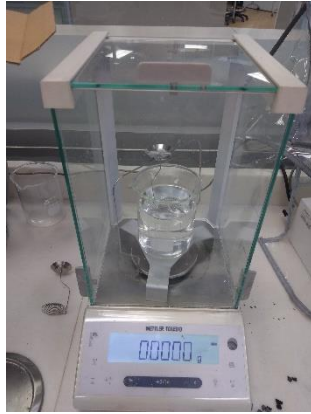


Ilustración 5. Montaje balanza analítica Mettler Toledo para la determinación de la densidad a través del principio de Arquímedes.



Ilustración 6. Medición del peso en el aire de la muestra polimérica.



Ilustración 7. Medición del peso sumergido de la muestra polimérica.

2.1.5. Determinación del tipo de polímero a través de la espectroscopia en el MIR

La espectroscopia en el MIR es una de las técnicas instrumentales más utilizadas y con mejor cobertura para identificar los polímeros según la GTC 53-2 [14], técnica que se empleó para identificar el tipo de polímero de cada muestra recolectada.

La identificación se efectuó en el Espectrofotómetro FT-IR UATR Two, ver Ilustración 8, en el lente se ubicó la partícula del polímero estudiado en cada caso, esta fue sometida a una limpieza inicial con etanol para eliminar la suciedad y a una fuerza externa ejercida por el brazo de presión, el cual permite que durante la medición no genere interferencia o señales de ruido en el espectro por un haz de luz del medio y facilita el adecuado contacto de la superficie de la muestra con el lente. Simultáneamente el equipo está identificando el tipo de polímero a través de la reflectividad, con la cual se analiza la fracción de la radiación del rayo incidente que puede reflejar la superficie estudiada, generando así el respectivo espectro del MIR, este fue comparado con el espectro de mayor similitud en las librerías especializadas de polímeros Polyatr y FLUKA contenidas en el software del espectrofotómetro. Este procedimiento se realizó para dos partículas de cada muestra y así se corroboró que el tipo de polímero identificado en ambos ensayos era semejante. Luego de realizar todas las mediciones correspondientes, se obtuvo un informe de cada muestra estudiada, en el cual se evidencia el espectro de la muestra, la comparación de esta con el espectro del polímero identificado y su respectiva puntuación de similitud.



Ilustración 8. Espectrofotómetro FT-IR UATR Two.

2.1.6. Consulta de la densidad de los polímeros en la base de datos Ces Edupack

Para la comparación de la densidad obtenida en la balanza analítica y posterior comprobación del tipo de polímero identificado a través de la espectroscopia del MIR, se consultaron inicialmente las propiedades de los polímeros más usados para la fabricación de las diferentes partes de los automóviles según la literatura [3], ver Tabla 3. Sin embargo, durante la espectroscopia en el MIR se identificaron otros tipos de polímeros, a los cuales también se les consultó en la misma base de datos sus propiedades, ver Tabla 4.

La consulta dentro de la base de datos Ces Edupack en el módulo MaterialUniverse, está segregada en 3 niveles, los cuales contienen la misma cantidad de propiedades de los polímeros consultados, pero su diferencia radica en la cantidad de polímeros y variaciones que cada nivel contiene dentro de sus datos. Por esto, la consulta se realizó en los niveles 2 y 3, ya que contienen más cantidad de polímeros y es posible consultar las variaciones y combinaciones de estos con otros materiales o sustancias. Adicional a las propiedades de los polímeros, la base de datos contiene información sobre los usos más comunes, biodegradabilidad, nombres comerciales, fabricantes, entre otros. Por lo anterior, se corrobora de manera segura con esta herramienta, la densidad y la presencia de los polímeros en la industria automotriz.

Tabla 3. Polímeros iniciales consultados en la base de datos Ces Edupack.

Polímeros
Poliestireno
Co-polímero de Acrilonitrilo-Butadieno-Estireno
Policarbonato
Poliuretano elástico
Polipropileno
Cloruro de polivinilo
Poliamida
Poliestireno-anhídrido maléico
Polifenilén éter
Polietileno de alta densidad
Polioximetileno/Poliacetal
Tereftalato de polibutileno
Laminados fibra de vidrio
Polientilentereftalano
Polietileno
Acrilato de acrilonitrilo estireno
Polimetilmetacrilato

Tabla 4. Polímeros adicionales consultados en la base de datos Ces Edupack luego de la espectroscopia en el MIR.

Polímeros
Nylon 6/6
Polietileno clorado
Polipropileno isotactico
Nylon 6
Copolimero de estireno / acrilonitrilo 20% acrilonitrile
Nylon 6/9
Copolimero de 96% estireno + 4% divinilo
Polietileno clorosulfonado

2.1.7. Consolidación de los resultados y determinación del tipo de polímero presente en el residuo plástico estudiado

Finalmente, para la correcta identificación de los tipos de polímeros presentes en los vehículos desensamblados del CNS, se llevó a cabo la consolidación de los resultados obtenidos para la determinación del tipo de polímero. Los datos consolidados fueron densidad experimental, promedio de la densidad experimental, densidad teórica, tipo de polímero identificado en el MIR y su respectiva puntuación. La combinación de estos dos métodos analíticos permitió garantizar la correcta identificación del polímero.

2.2. Proponer patrones replicables de identificación y separación de los residuos plásticos aprovechables obtenidos del proceso de desensamble por parte del personal del CNS.

2.2.1. Elaboración de patrones replicables de identificación y separación de los residuos plásticos del CNS

Luego de consolidar la información e identificar cada uno de los polímeros, fue extraída y debidamente marcada una muestra de cada material, posteriormente fueron clasificadas y agrupadas según los polímeros identificados.



Ilustración 9. Grupo de muestra identificados como SAN.

Teniendo los grupos de polímeros identificados y clasificados se inició el establecimiento de similitudes de forma, proveniencia, textura, dureza, color, brillo, sonido al impacto y flotabilidad; características que fueron consignadas en el Manual para la Identificación de los Plásticos en el CNS, manual que a su vez se entregó a los directivos y que fue socializado con el personal de planta del CNS, ver Tabla 6.

Según el Directorio Colombiano de Reciclaje, en Colombia se reciclan los siguientes polímeros: PET (Resina Polietileno Tereftalato), PEAD (Resina Polietileno de Alta Densidad), PVC (Resina Policloruro de Vinilo), PEBD (Resina Polietileno de Baja Densidad), PP (Resina Polipropileno), PS (Resina Poliestireno) y otros, como: PC (Policarbonato), ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno), PA (Poliamida Nylon), SAN (Estireno Acrilonitrilo), Acetato y Acrílico [20]. Los 12 polímeros identificados fueron clasificados según la posibilidad de ser reciclados en el país o no, esto con el fin de que una vez sean separados en el CNS se tenga clara una alternativa de disposición, la necesidad o no de separar e identificar todos los polímeros y la posibilidad de comercializar juntos algunos de estos polímeros.

2.2.2. Elaboración de Manual para la identificación de los plásticos en el CNS, entrega de resultados a Directivos y capacitación del personal de planta del CNS

Los patrones de identificación elaborados fueron consignados en el manual creado para la identificación de los plásticos en el CNS, ver anexo en la Tabla 6, los resultados, conclusiones y sugerencias obtenidos en este proyecto fueron puestos en común con los Directivos del CNS, Juan Sebastián Cortes y equipo de trabajo, además fue capacitado el personal de la planta sobre la identificación y clasificación de los plásticos presentes en los automóviles que son desensamblados allí, empleando como materiales de apoyo información recolectada y obtenida durante la ejecución del proyecto, los grupos de muestras identificadas por polímero y el manual diseñado, que fue entregado como ayuda y memoria a cada uno de los participantes.

3. Resultados y análisis

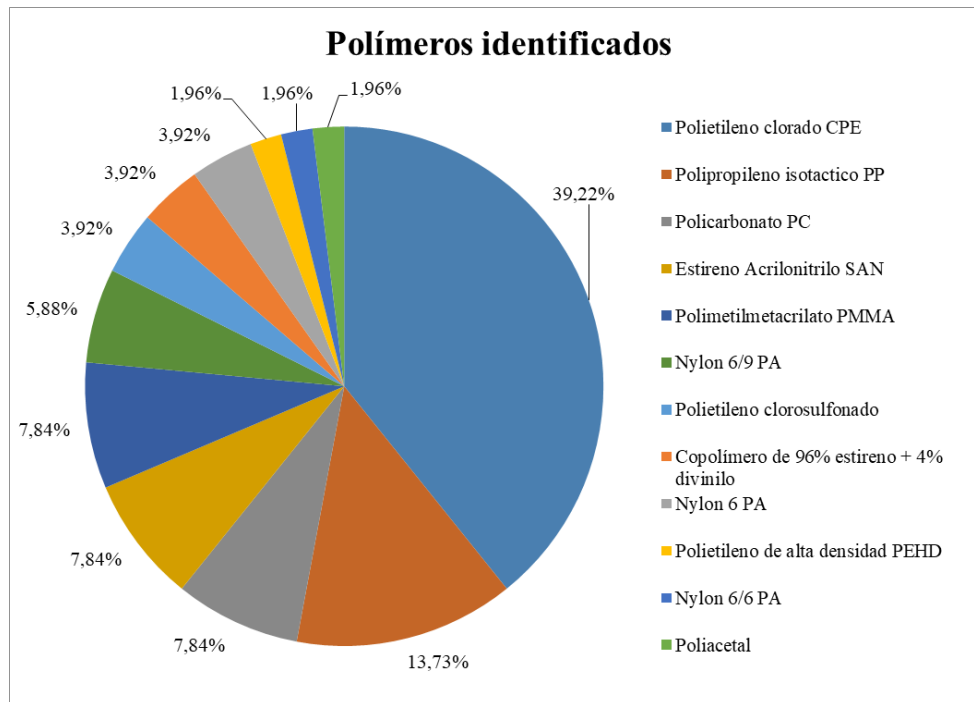
A partir de las pruebas de densidad y espectroscopia en el MIR, y de la consolidación de los datos obtenidos para las 51 muestras de polímeros, provenientes de diferentes componentes del automóvil, se determinaron e identificaron los tipos de polímeros presentes en el CNS luego del proceso de desensamble, ver Tabla 5, este grupo de polímeros, tienen similitud con los enumerados en la Tabla 3, de los cuales 7 fueron identificados como puros y los restantes se encontraron con diferentes compuestos o variaciones, debido a la presencia de aditivos y/o coberturas en las muestras estudiadas, por lo que estos polímeros cuentan con una alteración en su estructura, encontrando así diferencias importantes respecto a los polímeros vírgenes.

En la Tabla 5 y en la Gráfica 1 se enumeran los 12 polímeros identificados y las proporciones en las que se encontraron luego de la realización de las dos técnicas experimentales, densidad y espectroscopia en el MIR, entre los cuales se encuentran variaciones de Poliamida, Polietileno, Polipropileno y Poliéstireno como el Nylon 6, Nylon 6/6, Polietileno clorado, Polipropileno isostático, Estireno Acrilonitrilo, entre otros.

Dentro de las muestras identificadas el polietileno clorado (CPE) es el polímero que se encuentra en mayor proporción (39,22%), está conformado por cadenas de polietileno con átomos de cloro intercalado [21] , el Polipropileno Isostático (PP) es el segundo en proporción (13,73%), es normalmente conocido como Polipropileno y es ampliamente utilizado en piezas para automóviles, ver Tabla 1. Por el contrario, los polímeros que se encontraron en menor proporción fueron el Nylon 6/6 PA (1,96%), Poliacetal (1,96%) y el PEHD (1,96%). Finalmente, con base en la información de la base de datos Ces Edupack, todos los polímeros identificados hacen parte de los usados para la fabricación de diferentes partes de los automóviles dentro de la industria automotriz.

Tabla 5. Polímeros identificados presentes en las muestras de residuos plásticos desensamblados en el CNS.

Polímeros identificados
Estireno Acrilonitrilo SAN
Nylon 6/6 PA
Nylon 6 PA
Nylon 6/9 PA
Poliacetal POM
Policarbonato PC
Polietileno Clorado
Polietileno clorosulfonado CSM
Polietileno de alta densidad PEHD
Polimetilmetacrilato PMMA
Polipropileno Isotactico PP
Copolímero de 96% estireno + 4% divinilo



Gráfica 1. Porcentaje de los polímeros identificados en los componentes desensamblados en el CNS.

En la prueba de densidad se obtuvieron resultados que demuestran que la densidad de un material, en este caso polimérico, no dependen de la masa del sistema por ser una propiedad intensiva. En los resultados también se evidencia como el peso de las partículas en el aire es mayor en comparación con el peso que desalojan las partículas al sumergirse en etanol, también, se comprobó que, a pesar de tener diferente peso en cada ensayo de una misma muestra, los dos resultados de la densidad calculada tienen una baja dispersión, alcanzando en los 102 ensayos una máxima desviación estándar de 0,0762, mínima de 0,00011, y 0,1002 de desviación estándar promedio. Las densidades obtenidas para las 51 muestras se encuentran en un rango entre 1,3873 g/cm³ y 0,87274 g/cm³, datos agrupados y comparados con la información específica de cada polímero de la base de datos Ces Edupack.

Los resultados de la espectroscopia en el MIR permitieron determinar el tipo de polímero presente en cada muestra, aplicando y analizando la reflectividad que poseía. Durante el ensayo, la partícula se posicionaba en el lente y se le aplicaba una fuerza con el brazo para que el espectrofotómetro, ver Ilustración 8, comenzara a realizar el barrido espectral correspondiente. A lo largo de los ensayos realizados, se determinaron factores que generaban señales de ruido en la obtención del espectro, siendo estos la suciedad de la muestra y las películas de aditivos. Al generar el ruido en el espectro, no permitían un buen análisis por parte del software del espectrofotómetro, dificultando la comparación y disminuyendo la puntuación de esta. Cuando se presentó esta situación luego de realizar el espectro a diez muestras, las cuales presentaban diferencias en la puntuación de ambos espectros, el ensayo se repitió con estas mismas muestras, pero se les realizó un proceso de limpieza con etanol para eliminar la suciedad como factor de error, este procedimiento de limpieza se realizó para el resto de muestras. A diferencia de la suciedad de la muestra, la presencia de películas de aditivos u otros compuestos no es un factor que se puede eliminar fácilmente, por lo que se obtuvieron 6 grupos de polímeros vírgenes y 6 que contaban con la presencia de aditivos u otros compuestos. Al mismo tiempo, la fuerza ejercida a la muestra en la espectroscopia fue un factor importante para un buen barrido espectral, ya que a medida que la fuerza iba aumentando, hasta el límite máximo de 100, el espectro obtenido de la muestra se iba definiendo de forma más clara y se eliminaban algunas señales de ruido, logrando resultados más concretos para la comparación en las librerías del software.

La puntuación de los espectros obtenidos a partir de su comparación con los de las librerías, se encontró en un rango entre 0,9623 y 0,6331, y con un promedio de 0,7951 en similitud, puntuación que se encontraba en un rango entre 0 y 1. El criterio de aceptación del espectro estuvo determinado por la puntuación obtenida, no debía ser menor de 0,6, con la que se buscaba garantizar que el polímero identificado en la muestra tuviera una buena afinidad con el polímero comparado. Las puntuaciones de las muestras presentan una desviación estándar máxima de 0,1767, mínima de 0,0001 y promedio de 0,0171, lo cual permite determinar que el método de identificación a través de la espectroscopia en el MIR fue confiable.

Estas pruebas, permitieron determinar los tipos de polímeros presentes en las partes desensambladas de los vehículos del CNS. Por su parte la prueba de densidad corroboró los resultados obtenidos en la espectroscopia en el MIR, definiendo que el 86,27% de las muestras analizadas, es decir 44, poseen la densidad dentro del rango consultado para el tipo de polímero identificado en la espectroscopia en el MIR, los cuales tienen una puntuación promedio de 0,8157. Por otra parte, el 13,73% de las muestras, no cumplieron con el rango de densidad determinado, las cuales cuentan con la característica de tener la puntuación más baja de las 51 muestras, entre 0,6872 y 0,6331. A pesar de ello, la densidad obtenida estuvo en promedio a 0,11 unidades de entrar al rango de cada polímero, lo que permite concluir que la suciedad y la presencia de películas de aditivos generan variaciones en los resultados para la comprobación y dificultan en cierta medida la identificación exacta del tipo de polímero presente en la parte del automóvil.

A partir de los resultados obtenidos, fue creado el Manual para la Identificación de los Plásticos presentes en el CNS, allí fue incluido el material, dónde se encuentra este en un automóvil y cómo el personal del CNS los puede identificar según características físicas. También fueron clasificados por posibilidad o no de reciclaje en el país, de los 9 grupos de polímeros identificados, 6 se reciclan en Colombia, siendo estos el PP, PC, PEHD, SAN, Poliamida o Nylon (Nylon 6/6, Nylon 6 y Nylon 6/9) y el Copolímero de 96% Estireno + 4 % divinilo.

A pesar de que durante la ejecución del proyecto se identificaron tres tipos de Nylon, es decir, Nylon 6/6, Nylon 6 y Nylon 6/9, estos fueron caracterizados en el manual como un solo tipo de polímero, puesto que en Colombia son reciclados juntos o no se les hace ninguna diferenciación durante el proceso de reciclaje [20], [22].

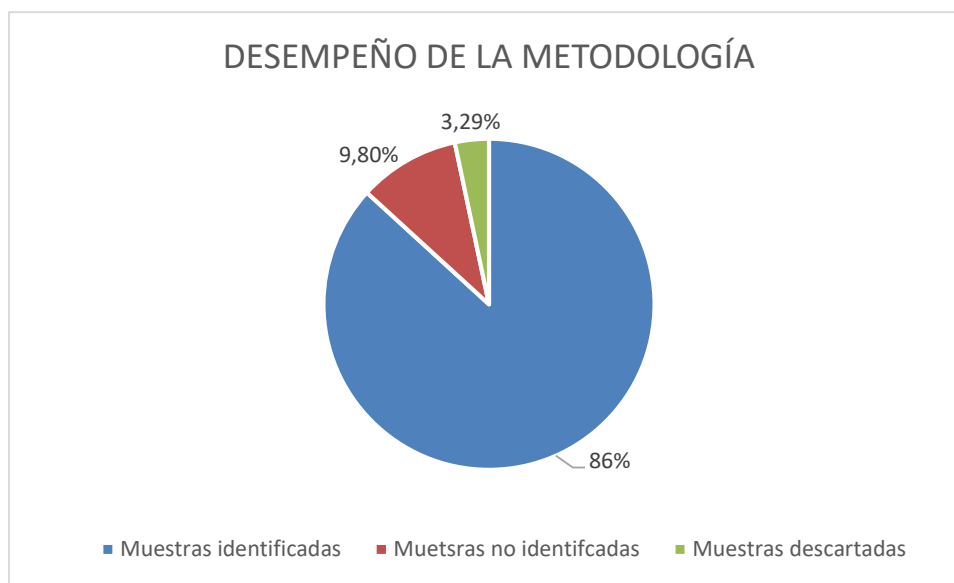
El CPE fue el polímero con mayor presencia entre los materiales identificados, se caracteriza por ser el material de fabricación de diferentes accesorios como: swiches, manijas, ceniceros, rejillas y tapas; este polímero no se recicla según el Directorio de Reciclaje con las tecnologías disponibles en Colombia actualmente conocidas actualmente, sin embargo, es posible que en otros países del mundo si se cuente con ellas y se estén usando. Por esto, se propone la búsqueda de un posible aprovechamiento como Polietileno por estar conformado por cadenas de Polietileno, el desarrollo o implementación de procesos que permitan su aprovechamiento en el país o el remplazo de este material en la fabricación de accesorios para automóviles por uno de similares o mejores características pero que permita su aprovechamiento al final de su vida útil. [21].

El copolímero de 96% estireno + 4% de divinilo no aparece estrictamente entre los polímeros reciclados según el Directorio de Reciclaje, pero conserva una estructura química y apariencia similar a la del ABS, mayormente compuesto por estireno, por lo que fue considerado como una de sus variaciones y se propone su reciclaje como tal.

Los polímeros identificados y caracterizados como PMMA y POM no se reciclan en el país, por lo que se deben desarrollar tecnologías para su aprovechamiento, hoy en día podrían ser aprovechados por su poder calorífico para generar energía o disponerse en el relleno sanitario.

Por su parte, el Polietileno Clorosulfonado fue uno de los polímeros que presentó mayor dificultad durante su identificación mediante la espectroscopia en el MIR, esto por la baja obtención de puntaje o calificación al ser comparado con la librería de polímeros, por lo que se considera que este polímero o estas muestras deben ser analizadas mediante otras metodologías, mencionadas en la Tabla 2. Por lo anterior dos muestras fueron descartadas y no fueron identificadas mediante la metodología planteada.

Al evaluar el desempeño de la metodología se encuentra que, de las 51 muestras analizadas, dos fueron descartadas, 44 fueron identificadas y las restantes no fueron identificadas con la metodología empleada, ver Gráfica 2. Lo que permite concluir que la metodología planteada y ejecutada en este proyecto permite una identificación de la mayoría de los plásticos presentes en los automóviles que llegan al CNS.



Gráfica 2. Desempeño de la metodología propuesta para la identificación de los plásticos presentes en el CNS.

El 11% de las muestras no identificadas se atribuye a factores generadores de ruido como la suciedad y las películas con las que están recubiertas las muestras o a que para su identificación deben realizarse otro tipo de pruebas más específicas, estas no se ejecutaron porque era necesaria mayor inversión. Por último, es importante mencionar que realizar procesos de identificación y separación de plásticos en el CNS y en el mundo se dificulta cuando los tipos y las variedades de polímeros presentes en los autos se incrementan, por lo que, aunque grandes compañías han direccionado sus esfuerzos en la unificación de los materiales y variedades plásticas, se necesita un mayor esfuerzo para así disminuir este tipo de desperdicio al final de la cadena de suministro y facilitar dichos procesos.

4. Conclusiones

La espectroscopia en el MIR y la comprobación de la densidad como propiedad intensiva, permiten identificar de forma analítica y acertada la mayoría de los polímeros presentes en el CNS con un desempeño del 86,27%. Sin embargo, el 13,37% de los polímeros no fueron identificados y es necesaria la implementación de métodos analíticos de identificación más específicos los cuales requieren inversión de capital. Los tipos de polímeros identificados son: Policarbonato PC, Polipropileno isotactico PP, Polietileno clorado CPE, Estireno Acrilonitrilo SAN, Polimetilmetacrilato PMMA, Nylon 6/9 PA, Polietileno Clorosulfonado, Nylon 6 PA, Copolímero de 96% estireno + 4% divinilo, Polietileno de alta densidad PEHD, Nylon 6/6 PA y Poliactal POM, de los cuales 6 son polímeros vírgenes y el resto tienen variaciones en su composición con aditivos. Por lo tanto, para realizar una correcta identificación y disposición de los residuos plásticos dentro de la industria automotriz podría disminuirse la variedad de polímeros con la presencia de químicos adicionales empleados para la producción de automóviles, los cuales dificultan su disposición al final de la vida útil.

Para proponer patrones prácticos de identificación y caracterización de los residuos plásticos desensamblados en el CNS fueron evaluadas propiedades como forma, proveniencia, textura, dureza, color, brillo, flotabilidad en agua y sonido al impacto. Además, se evaluó la posibilidad de reciclaje en Colombia y de los polímeros identificados, el 66,6 % se reciclan en el país, siendo estos; Policarbonato PC, Polipropileno isostático PP, Estireno Acrilonitrilo SAN, Nylon 6/9 PA, Nylon 6 PA, Copolímero de 96% estireno + 4% divinilo, Polietileno

de alta densidad PEHD y Nylon 6/6 PA, el porcentaje restante corresponde a Polimetilmetacrilato PMMA, Poliactal POM, Polietileno clorado CPE y Polietileno Clorosulfonado, polímeros que en Colombia con las tecnologías actuales no es posible reciclar. La información anterior fue consignada en el Manual para la Identificación de los Plásticos en el CNS en conjunto con las propiedades identificadas para cada uno de los polímeros.

5. Tabla de Anexos o Apéndices

Tabla 6. Documentos adicionales incluidos con el proyecto de grado.

Nombre	Desarrollo (propio/terceros)	Tipo de Archivo	Enlace google drive (https://goo.gl/)
Manual para la Identificación de los Plásticos en el CNS	Propia	.pdf	https://drive.google.com/drive/folders/1uTrIVSNEbrauxoWoCZ2IxsVGcfriNyDy?usp=sharing
Resultados	Propia	.xlsx	https://drive.google.com/drive/folders/1uTrIVSNEbrauxoWoCZ2IxsVGcfriNyDy?usp=sharing

Referencias

- [1] F. M. Cabrera, «Utilización de composites de matriz polimérica en la fabricación de automóviles», *Técnica Ind.*, vol. 254, pp. 42-47, 2014.
- [2] L. G. Alonso, «Reciclado de los plásticos en la industria de la automoción», 2018.
- [3] K. Ragaert, L. Delva, y K. Van Geem, «Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste», *Waste Manag.*, vol. 69, pp. 24-58, 2017.
- [4] V. M. R. Vasquez, «Análisis Exploratorio: Vehículos al Final de su Vida útil en México-Edición Única», 2003.
- [5] «End of life vehicles (ELVs) - Eurostat». [En línea]. Disponible en: <http://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/key-waste-streams/elvs>. [Accedido: 25-jul-2018].
- [6] SIGRAUTO, «¿Cuánto se recupera de los vehículos fuera de uso?», 2015. [En línea]. Disponible en: <http://www.sigrauto.com/cuarec.htm>. [Accedido: 06-ago-2018].
- [7] Federación de Aseguradores Colombianos, «Fasecolda: Estadísticas del ramo», 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.fasecolda.com/index.php/ramos/automoviles/estadisticas-del-ramo/>. [Accedido: 25-jul-2018].
- [8] Andemos, «Sector Automotor Informe Vehículos Octubre Visión general del sector», 2017, pp. 1-21.
- [9] Revista Dinero, «Venta de carros en el año 2017 en Colombia», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.dinero.com/pais/articulo/venta-de-carros-en-el-ano-2017-en-colombia/253774>. [Accedido: 25-jul-2018].
- [10] ANDI, «Camaras Sectoriales», 2017. [En línea]. Disponible en: <http://www.andi.com.co/Home/Camara/4-automotriz>. [Accedido: 25-jul-2018].
- [11] Juan Carlos Rodríguez Ospina, «Conoce el Centro de Salvamento SURA», 2013. [En línea]. Disponible en: <https://www.sura.com/blogs/corporativo/centro-salvamento-sura.aspx>. [Accedido: 25-jul-2018].
- [12] S. SURA, «Inventario Nacional diciembre de 2017», 2017.
- [13] M. P. Ortiz, Conde, «Manual para identificación de plásticos». p. 66, 1992.
- [14] ICONTEC, «GTC 53-2 Gestión Ambiental. Residuos Sólidos. Guía para el Aprovechamiento de los Residuos Plásticos», 2004. [En línea]. Disponible en: http://ezproxy.eafit.edu.co:2238/icontec_enormas_mobile/visor/HTML5.asp. [Accedido: 08-sep-2018].
- [15] ICONTEC, «NTC 3577 Determinación de la Densidad de Plásticos por la Técnica del Gradiente de Densidad», 2000. [En línea]. Disponible en: http://ezproxy.eafit.edu.co:2238/icontec_enormas_mobile/visor/HTML5.asp. [Accedido: 08-sep-2018].
- [16] A. International, «Standard Test Method for Density of Polyethylene by the Density-Gradiente

- Technique», vol. 08, n.º September, pp. 1-3, 1999.
- [17] A. International, «Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics», vol. 14, n.º C, pp. 8-13, 2009.
- [18] Leonardo Vite Terán, «Principio de Arquímedes», 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/m4.html>. [Accedido: 01-oct-2018].
- [19] Y. A. Cengel y M. A. Boles, *Termodinámica*, vol. 6. 2014.
- [20] N. M. Lizarralde, T. F. Rivadeneira, M. C. Ortega Pérez, y J. P. Bohórquez Beltraán, «Directorio colombiano de reciclaje de residuos plásticos», 2016.
- [21] Cosmos, «Información técnica del Polietileno clorado-cpe», 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.cosmos.com.mx/wiki/polietileno-clorado-cpe-crvd.html>. [Accedido: 22-oct-2018].
- [22] Plastic Solutions, «PA Polyamide Nylon - TECAMID | Ensinger», 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/engineering-plastics/pa-polyamide>. [Accedido: 22-oct-2018].