



Trabajo Fin de Máster

Eficiencia en el uso de recursos materiales empleados en componentes electrónicos de automóviles. Caso de estudio del cuadro de instrumentos del SEAT León II

Resource efficiency of those materials used in electronic car components. Case study of the SEAT León II combi instrument

Autor/es

Samuel Alcoceba Pascual

Director/es

Dra. Alicia Valero Delgado y Dr. Abel Ortego Bielsa

Máster Universitario en Energías Renovables y Eficiencia Energética

Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza
2023

Agradecimientos:

En primer lugar, me gustaría agradecer a los doctores Alicia Valero Delgado y Abel Ortego Bielsa la oportunidad de realizar este trabajo, así como la confianza que han tenido en mí. A Javier Felipe Andréu, Martín Lallana Santos, Jorge Torrubia Torralba y a todo el personal del Grupo de Ecología Industrial del Instituto Mixto Universitario Circe de la Universidad de Zaragoza por toda la ayuda, interés, dedicación y apoyo que me han brindado en todo momento. Y por último quiero agradecer tanto a mi familia como a mis amigos/as y compañeros/as el apoyo y el ánimo que me han dado a lo largo de todos estos años de aprendizaje académico y crecimiento personal.

Finalmente, este trabajo de investigación se ha realizado en el marco de los siguientes proyectos:

- Análisis exergético y termoeconómico de la capacidad nacional de recuperación de materias (RESET) financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con nº PID2020-116851RB-I00.
- Supporting the transition of the automotive sector towards circular economy (TREASURE) financiado por la Comisión Europea a través del programa Horizonte 2020 con nº de GA 101003587.

Resumen:

Un vehículo convencional requiere más de 50 elementos en su fabricación, muchos de ellos críticos desde el punto de vista del riesgo de suministro, disponibilidad geológica o dependencia económica. Sin embargo, sólo la masa de 3 de ellos (Fe, Al y Cu) es superior al 1% del peso metálico total del automóvil. Los procesos de reciclado actuales se basan principalmente en tecnologías de fragmentación, que son eficaces para el reciclado de chatarra férrica (acero), el aluminio y el cobre, pero ineficaces para la recuperación de metales menores pero críticos. La mayoría de estos metales se utilizan para fabricar componentes electrónicos como el cuadro de instrumentos, pantallas, sensores o iluminación LED. Sin embargo, a pesar de la criticidad de los metales utilizados, no existen procesos de reciclaje específicos para ninguno de ellos. Ante esta situación, urge cambiar el modelo de fabricación y reciclaje de los vehículos para garantizar un uso eficiente de todos los materiales.

Este trabajo presenta una metodología que combina la evaluación del capital mineral de las piezas de automóvil mediante el concepto de Rareza Termodinámica con las compatibilidades metalúrgicas asociadas a los diferentes procesos de reciclado. Como resultado, se evalúa la eficiencia de los recursos en diferentes escenarios de reciclado.

Los escenarios propuestos consideran los siguientes casos: (1) Una pieza de automóvil valiosa se fragmenta junto con todo el vehículo; (2) Esta pieza se desmonta del vehículo y se recicla en un proceso metalúrgico diseñado específicamente para la recuperación de cobre y otros metales no férricos; y (3) Además de desmontarse del automóvil, la pieza se subdesensambla para obtener una fracción férrica y otra no férrica, que se reciclan separadamente mediante procesos metalúrgicos diseñados para recuperar acero y cobre respectivamente. Como caso de estudio, se han analizado el cuadro de instrumentos y el sistema de infoentretenimiento de un SEAT León II, ya que ambas piezas se encuentran entre las más críticas de un coche convencional debido a los metales que utilizan y a su bajo reciclaje funcional.

Entre los resultados obtenidos, destaca que la recuperación de capital mineral en el caso del cuadro de instrumentos es del 59 % sólo con ser desmontado y dirigido a una ruta de reciclaje metalúrgico orientada a la recuperación de cobre. En el caso del subdesensamblaje, sólo ha resultado eficaz para el sistema de infoentretenimiento, aunque la mejora ha sido de sólo un 2 % respecto al escenario anterior.

En ambas partes, la pérdida de capital mineral, a pesar de aplicar los casos 2 y 3, se debe a que los procesos metalúrgicos aplicados son incompatibles con la recuperación del tántalo. Además, la composición de los datos no permite identificar qué subcomponentes contienen tántalo para ser subdesensamblados del resto. También es destacable que, a pesar de que los procesos de desmontaje y subdesensamblaje son manuales, el valor de mercado de los metales recuperados puede ser hasta cinco veces superior al coste de la mano de obra.

Índice

| | |
|--|----|
| Glosario | 1 |
| 1. Introducción y objetivos | 2 |
| 2. Fundamentos y Metodología | 4 |
| 2.1 Evaluación del capital mineral - Rareza Termodinámica | 4 |
| 2.2 Procesos metalúrgicos para el reciclaje | 6 |
| 2.2.1 Fundamentos de las compatibilidades metalúrgicas de los procesos de reciclaje..... | 6 |
| 2.2.2 Ruta metalúrgica para la recuperación del cobre | 8 |
| 2.2.3 Ruta metalúrgica para la recuperación del acero | 8 |
| 2.3 Descripción del Método | 8 |
| 3. Descripción del caso de estudio | 12 |
| 3.1 Cuadro de instrumentos | 13 |
| 3.2 Sistema de infoentretenimiento | 14 |
| 4. Resultados | 15 |
| 4.1 Rareza termodinámica metales..... | 16 |
| 4.1.1 Cuadro de instrumentos SEAT León II..... | 16 |
| 4.1.2 Sistema de infoentretenimiento SEAT León II | 17 |
| 4.2 Reciclabilidad de las piezas | 20 |
| 4.2.1 Cuadro de instrumentos SEAT León II..... | 20 |
| 4.2.2 Sistema de infoentretenimiento SEAT León II | 23 |
| 4.3 Evaluación de la pérdida de capital mineral por metal | 25 |
| 4.4 Análisis económico de la desensamblabilidad y subdesensamblabilidad | 28 |
| 4.4.1 Cuadro de instrumentos SEAT León II..... | 29 |
| 4.4.2 Sistema de infoentretenimiento SEAT León II | 30 |
| 5. Conclusiones | 31 |
| 6. Futuras líneas de investigación | 33 |
| 7. Bibliografía | 34 |
| 8. Anexos..... | 38 |
| Anexo A. Cálculo Rareza Termodinámica..... | 38 |
| Anexo A. 1 Rareza termodinámica de los metales..... | 38 |
| Anexo A.2 Contribución metales medida en Rareza termodinámica..... | 39 |
| Anexo B. Diagramas de flujo de los procesos metalúrgicos seleccionados | 41 |
| Anexo B.1 Ruta del cobre | 41 |
| Anexo B.2 Ruta del acero..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Anexo C. Subpartes de las piezas de estudio | 43 |
| Anexo C.1 Cuadro de instrumentos-SEAT León II | 43 |
| Anexo C.2 Sistema de infoentretenimiento-SEAT León II | 44 |

Glosario

1. Isasmelt: Es un proceso de fundición energéticamente eficiente. La tecnología Isasmelt se ha aplicado a la fundición de plomo, cobre y níquel. Un horno Isasmelt es un recipiente de acero de forma cilíndrica revestido con ladrillos refractarios. Hay un baño fundido de escoria en el fondo del horno. Una lanza de acero se introduce en el baño a través de un orificio en el techo del horno para la inyección de aire u oxígeno y provocar así agitación en el baño. Los materiales para reciclar se dejan caer en el baño a través de otro orificio en el techo del horno o, en algunos casos, se inyectan por la lanza. Estos materiales de alimentación reaccionan con el oxígeno del gas inyectado, dando como resultado una gran reacción en un volumen pequeño (*GLENCORE TECHNOLOGY*, 2023).

2. Reactor Top Submerged Lance (TSL): La tecnología de hornos de lanza sumergida superior (TSL) proporciona una tecnología que cumple el cierre del ciclo de materiales para metales no ferrosos procedentes de alimentaciones diversas y variadas. Sirve para procesar minerales, reciclar materiales postconsumo, procesar productos intermedios, residuos industriales y recuperar energía. Para ello, requiere una sofisticada mezcla de pasos neutros, oxidativos y reductivos en una secuencia definida de diferentes etapas dentro de un único reactor TSL. El uso de cobre/plomo como disolventes para los elementos valiosos durante las distintas etapas facilita la recuperación de los metales. Esto es posible gracias al buen control metalúrgico que permite dividir los metales de los residuos electrónicos en las fases necesarias o en energía/vapor (Matusewicz & Reuter, 2008).

3. Reactor tipo TBRC (Top Blown Rotary Convertor): Es un equipo de fundición avanzado para el tratamiento de limo anódico, RAEE, escoria de fundición de metales no ferrosos recuperar oro, plata y otros metales preciosos. También puede tratar concentrado de cobre y material secundario como chatarra de cobre, plomo, etc. El horno se caracteriza por un proceso corto, una alta tasa de recuperación, una alta adaptabilidad a la materia prima, una reacción química completa y una combinación de oxidación y reducción en un solo horno (Metalcess, 2023).

1. Introducción y objetivos

Desde el año 2020 se han producido una serie de interrupciones en las cadenas de suministro que han provocado paradas de producción y retrasos en innumerables procesos industriales (Ponis & Ntalla, 2016).

Desde la perspectiva del sector de la fabricación de vehículos, estas interrupciones han afectado prácticamente a todos los fabricantes, especialmente por la escasez de microchips (Jaenichen et al., 2022). Los vehículos actuales son ordenadores con ruedas ya que los componentes electrónicos suponen el 40 % del valor del vehículo (Mohammad et al., 2022a). Por tanto, la escasez de microchips necesarios para la fabricación de gran cantidad de componentes ha hecho que muchos fabricantes tuvieran stocks de vehículos sin terminar o los vendieran con menor equipamiento del anunciado (Liener, 2021). El impacto de estas interrupciones en las cadenas de suministro del sector de la automoción se estima que ha ascendido a más de 107.000 M€ (Ramaní et al., 2022).

El desabastecimiento de microchips ha evidenciado la elevada vulnerabilidad del sector debido a la excesiva concentración geográfica de las empresas suministradoras (Mohammad et al., 2022) ya que Taiwán, Corea del Sur y China acaparan el 87 % del mercado mundial de microchips (Pablo Gallén, 2022).

Con la transición energética, se espera que para el año 2050, el 72 % del parque automovilístico europeo sea eléctrico. De los cuales, un 53 % de los vehículos serán PHEV (vehículo híbrido eléctrico enchufable) y un 19 % serán BEV (vehículo eléctrico de batería); es decir, eléctricos puros. Esto implica que los componentes electrónicos contenidos en los diferentes dispositivos, motores y baterías aumentarán sustancialmente respecto de los actuales y éstos, necesitarán una cantidad cada vez mayor de metales críticos. Las ventas de PHEV y BEV podrían superar a las de ICEV (vehículos con motor de combustión interna) en los años 2032 y 2044 respectivamente (Ortego et al., 2020).

Esta situación implica la necesidad de cambiar el actual modelo en el uso de los recursos materiales tanto en la fabricación como en el reciclaje de automóviles, donde una pieza de menos de 10 gramos se convierte en un componente crítico para la fabricación de un producto de más de una tonelada de peso, aunque no sea igualmente valorada al final de la vida útil del coche.

Más allá de la situación con los semiconductores, la industria automotriz es una gran consumidora de materias primas a nivel global, que representa alrededor del 16 % del acero, el 30 % del aluminio y el 5 % de plásticos (Wells, 2013). Además, su demanda está creciendo no solamente en cantidad sino en variedad de materias primas, siendo gran parte de ellas críticas por factores de disponibilidad geológica, riesgo de suministro o dependencia del sector (Achzet & Helbig, 2013; Alonso et al., 2007; European Commission, 2014, 2017). Este hecho se verá agravado aún más con la interrupción del vehículo eléctrico por su mayor contenido en electrónica y la batería, especialmente intensiva en el uso de materias primas críticas.

Los materiales empleados en la fabricación de vehículos son tratados al finalizar la vida de estos en centros autorizados de tratamiento (CAT) y plantas fragmentadoras, donde se aplican procesos para descontaminar los vehículos, reusar componentes y reciclar principalmente las chatarras férricas y no férricas. Estos procesos están lejos de recuperar los componentes y metales críticos siendo ellos subciclados en la fabricación de aleaciones de acero o aluminio (Ohno et al., 2015).

Para tener una visión sobre la cantidad de vehículos que se procesan cada año, basta analizar los datos de España, dónde anualmente se procesan alrededor de 700.000 (Ana Xenia Valencia Chávez, 2006).

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el tratamiento de estos se lleva a cabo mediante la aplicación de procesos de fragmentación, siendo estos altamente entrópicos. Como consecuencia de las mezclas que se provocan se puede afirmar que el 25 % del capital mineral de los vehículos se pierde a consecuencia del subciclaje que se genera (Ortego et al., 2017).

Ante estos datos se evidencia la necesidad de medidas que promuevan un uso más eficiente de los recursos materiales. Con este propósito la Comisión Europea adoptó un Plan de Acción sobre la Economía Circular que incluye una serie de medidas implementadas para analizar todo el ciclo de vida de los productos, desde su diseño hasta su fin de vida (Panarello & Gatto, 2023). Este plan además tiene como objetivo centrar esfuerzos en los sectores más demandantes de recursos, entre los que se incluye la fabricación de vehículos. Un ejemplo de cómo los fabricantes se están tomando con especial preocupación esta situación de escasez de recursos es la creación de fábricas de reciclaje o reacondicionamiento de vehículos que algunos ya están poniendo en funcionamiento (Ellen MacArthur Foundation, 2022).

Una de las medidas para mejorar la circularidad en el sector del automóvil, es la automatización de su desensamblaje para separar aquellas piezas que tienen metales críticos antes de ser fragmentadas. Actualmente, hay varios grupos de investigación trabajando en automatizar el desensamblaje de productos complejos (electrodomésticos, móviles, ordenadores y vehículos) como la Wayne State University, el CMI (Critical Materials Institute) y el Oak Ridge National Laboratory (Prioli et al., 2022; Prioli & Rickli, 2020).

Desde la perspectiva del desensamblaje de los componentes más críticos de los automóviles (batería y electrónica) la Universidad Leibniz de Hannover, la Universidad de Nueva Gales del Sur, el Instituto WBK de Ciencias de la Producción y el Instituto de Tecnología de Karlsruhe en Alemania, están investigando como automatizar el proceso para hacerlo rápido y por tanto viable económicamente (Blankemeyer et al., 2021; Gerlitz et al., 2020; Mangold et al., 2022). En este sentido se están analizando los sistemas de unión y sellado de las diferentes baterías empleadas en coches eléctricos y desarrollando métodos de desensamblaje empleando tecnología de industria 4.0 tales como los cobots (Hjorth & Chrysostomou, 2022), (Poschmann et al., 2021), (Huang et al., 2021), (Chen et al., 2021).

No obstante automatizar el desensamblaje es un reto que requiere de otro mayor, la logística inversa necesaria para implementar la circularidad en el sector reintroduciendo de nuevo materiales y componentes procedentes de vehículos fin de vida. En este sentido La Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica Nacional de Atenas y el Departamento de Diseño, Fabricación y Gestión de Ingeniería de la Universidad de Strathclyde plantean la optimización de la cadena de suministro inversa con especial atención en los componentes reutilizables de los vehículos servitizados (Rentzelas & Triviza, 2022).

Es también destacable el trabajo realizado por el Grupo de Ecología Industrial del Instituto Mixto Universitario CIRCE – Universidad de Zaragoza desde donde se están definiendo medidas orientadas a identificar los componentes más críticos de los automóviles y a ecodiseñarlos desde la perspectiva del uso de los recursos materiales a través del segundo principio de la termodinámica (Ortego, 2019). La identificación de los componentes más críticos no es un tema menor, ya que dada la gran cantidad de componentes y materiales que emplea un vehículo es necesario conocer claramente cuáles son los más críticos y que metales los causantes de esa criticidad antes de definir recomendaciones (Ortego, Valero, Valero, & Iglesias, 2018).

Para desarrollar una cuantificación objetiva y universal de los recursos se puede emplear el segundo principio de la termodinámica aplicado en el indicador Rareza Termodinámica (Valero & Valero, 2015). La Rareza Termodinámica es la cantidad de Exergía necesaria para obtener un metal desde un estado de mínima concentración de ese metal, hasta un estado en el cual se tiene el metal puro para ser empleado en una aplicación industrial, usando la mejor tecnología

disponible (Valero & Valero, 2014). Este enfoque ya ha sido aplicado con éxito al sector del automóvil con anterioridad (Iglesias-Émbil et al., 2020; Ortego, Valero, Valero, & Restrepo, 2018) y en la actualidad está siendo empleado para ecodiseñar futuros vehículos eléctricos (SEAT S.A., 2021).

Finalmente, y desde la perspectiva del reciclaje basado en procesos orientados a la recuperación de metales críticos, es destacable la investigación sobre los procesos metalúrgicos técnica e industrialmente disponibles, así como las incompatibilidades de reciclaje existentes dependiendo de los compuestos químicos en los cuales se presentan los elementos metálicos (Antoinette Van Schaik & Markus Reuter, 2014; Reuter & van Schaik, 2016; van Schaik & Reuter, 2007, 2012)

Ante esta situación desafiante en el sector del automóvil donde hay que garantizar el uso eficiente de los recursos y en donde hay diferentes líneas de investigación abiertas (identificación de componentes críticos, desensamblaje automático, reciclaje basado en metalurgia) se propone el siguiente Trabajo Fin de Máster.

El objetivo principal de este TFM es definir mejoras en el uso de las materias primas críticas en el sector del automóvil. Para conseguir tal propósito se estudiarán, por primera vez en un trabajo de investigación, diferentes escenarios de desensamblaje, subdesensamblaje y reciclaje basado en metalurgia de los componentes más críticos. Para presentar la metodología se emplea como caso de estudio el cuadro de instrumentos y el sistema de infoentretenimiento de un SEAT León generación II.

2. Fundamentos y Metodología

Para desarrollar este trabajo se ha elaborado una metodología que a partir de la evaluación del capital mineral de una pieza empleando el concepto de Rareza Termodinámica y de las compatibilidades metalúrgicas existentes en los procesos de reciclaje, evalúa la reciclabilidad de esa pieza ante diferentes escenarios de reciclaje.

Antes de explicar la metodología propia desarrollada, se van a presentar dos conceptos fundamentales que han sido utilizados: (1) La evaluación del capital mineral a partir de la Rareza Termodinámica y (2) Las compatibilidades metalúrgicas existentes en los procesos de reciclaje.

2.1 Evaluación del capital mineral - Rareza Termodinámica

Para evaluar la eficiencia en el uso de los recursos materiales, así como de los metales con mayor nivel de criticidad se ha empleado un parámetro físico denominado Rareza Termodinámica. Este indicador cuantifica de forma objetiva y mediante el segundo principio de la termodinámica, el valor de todos los metales. En su aplicación se tiene en consideración tanto la concentración de los metales en los yacimientos geológicos como la eficiencia de las tecnologías empleadas para su extracción en forma mineral y posterior procesado hasta ser empleados en las industrias manufactureras en forma de metales.

Uno de los desafíos del modelo es definir el estado de referencia de nula exergía a partir del cual cualquier otro estado tiene mayor exergía y por tanto capital mineral. Ese estado de referencia se denomina Thanatia (Valero & Valero, 2014) y desde el punto de vista de la composición de la corteza terrestre Thanatia, según sus autores (Valero & Valero, 2021) “*es una roca común, es decir, lo que vulgarmente denominamos piedra. O, dicho de otro modo, una roca con la composición mineralógica media de la corteza terrestre. Esta composición media consta de alrededor 300 minerales, los más abundantes a los que se asigna una determinada composición química y concentración*”.

Para la definición de Thanatia se empleó la composición mineral propuesta por Grigor'ev (Grigor'ev, 2000) y las composiciones químicas de los elementos desarrolladas por Rudnick y Gao (Rudnick & Gao, 2003). Con Thanatia como estado de referencia se puede calcular la exergía de cualquier mineral a partir de su exergía de concentración (b_{ci}) tal y como aparece en la ecuación 1 (Ec. 1) (Faber & Proops, 1991).

$$b_{ci} = -\bar{R}T^0 \left[\ln x_i + \frac{(1-x_i)}{x_i} \ln(1-x_i) \right] \quad \text{Ec. 1}$$

Donde R es la constante universal de los gases ideales (8,314 kJ/mol), T_0 es la temperatura del ambiente de referencia (298,15 K) y x_i es la concentración del material i . La diferencia entre la Exergía de concentración obtenida con x_i (siendo la concentración de una determinada mina) y con x_c (siendo la concentración de Thanatia) es lo que se denomina “Exergía de Reposición”.

La Exergía de Reposición representa la mínima Exergía necesaria para la formación de un mineral desde la corteza terrestre (x_c) hasta una mina (x_m). De esta manera la Exergía de las diferentes sustancias ha sido calculada a partir las concentraciones medias de las minas (x_m) propuestas por Cox y Singer (Cox, D.P; Singer, 1992).

Previamente a la aparición de las grandes actividades de extracción minera, los Costes Exergéticos de Reposición eran elevados debido a que la naturaleza daba un gran “Bonus” (los grandes yacimientos mineros estaban sin explotar y tenían altas concentraciones), por lo tanto, se necesitaba muy poca Exergía para la extracción y procesado de recursos minerales.

El Coste Exergético de Reposición es una parte importante del valor físico de una substancia, pero no el único. Una mina de la que se obtienen minerales puede considerarse valiosa desde el punto de vista físico cuando: (1) dispone de minerales escasos en la naturaleza y/o (2) para extraer y utilizar esos minerales se requiere poca cantidad de energía (son sencillos de obtener porque tienen un alto Coste Exergético de reposición). La segunda parte de este término se refiere a la exergía necesaria para extraer, concentrar y refinrar el mineral para obtener un metal útil. Este segundo término es lo que denominamos Exergía incorporada. La Exergía incorporada es la cantidad de Exergía necesaria para extraer un mineral desde la mina, aplicar todos los procesos de extracción, beneficiado y refinado hasta obtener el metal puro, con un grado de concentración adecuado para ser empleado por la industria.

En la Figura 1, se muestra un ejemplo de la relación entre la Rareza Termodinámica, el Coste Exergético de Reposición, la Exergía Incorporada y la concentración de una mina (x).

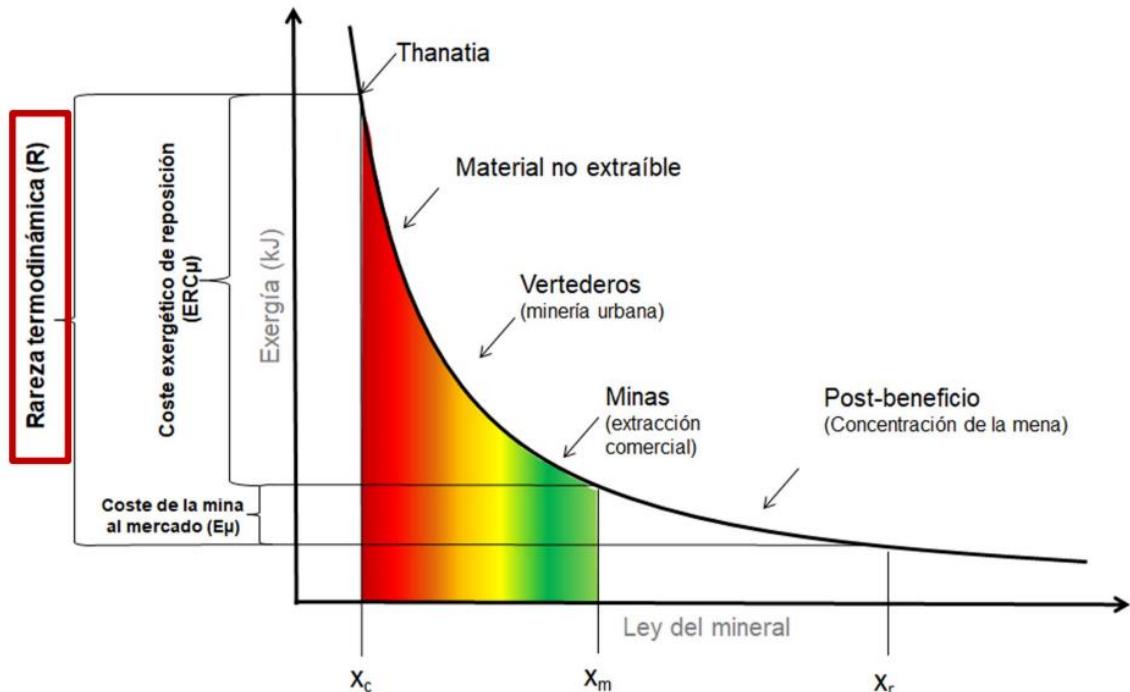


Figura 1. Rareza Termodinámica y Concentración de una mina. X_c (concentración de Thanatia), X_m (concentración de una mina), X_r (metal refinado) (Valero, 2018)

En la Tabla 1, se puede observar, a modo de ejemplo la Rareza Termodinámica de algunos metales empleados en este TFM. Se puede comprobar como los órdenes de magnitud de algunos elementos son totalmente diferentes, pasando de 661 kJ/g en el caso del Al hasta 482.828 kJ/g para el Ta. En la Tabla a. 1 del Anexo A.1, se muestran los valores de Rareza Termodinámica de todos los elementos empleados en este TFM.

Tabla 1. Rareza Termodinámica (kJ) de una muestra de metales seleccionados calculada como la suma del Coste Exergético de Reposición y la Exergía Incorporada (Valero et al., 2017)

| Metal | Exergía incorporada | Unidades | Coste de sustitución de Exergía | Unidades | Rareza Termodinámica | Unidades |
|-------|---------------------|----------|---------------------------------|----------|----------------------|----------|
| Ag | 1.566 | kJ/g | 7.371 | kJ/g | 8.937 | kJ/g |
| Al | 34 | kJ/g | 627 | kJ/g | 661 | kJ/g |
| Ta | 3.083 | kJ/g | 482.828 | kJ/g | 485.911 | kJ/g |

2.2 Procesos metalúrgicos para el reciclaje

2.2.1 Fundamentos de las compatibilidades metalúrgicas de los procesos de reciclaje

De igual forma que se ha partido de un modelo desarrollado para la cuantificación del capital mineral, también se ha partido de un modelo que analiza las compatibilidades metalúrgicas de los procesos de reciclaje.

En la Figura 2, se muestran las compatibilidades metalúrgicas existentes en función de las rutas de reciclaje que se toman a nivel industrial. Esta representación muestra el destino final y, por lo tanto, la recuperación o pérdida de los diferentes materiales en un producto/componente para diferentes procesos metalúrgicos interrelacionados (Schaik & van Reuter, 2013).

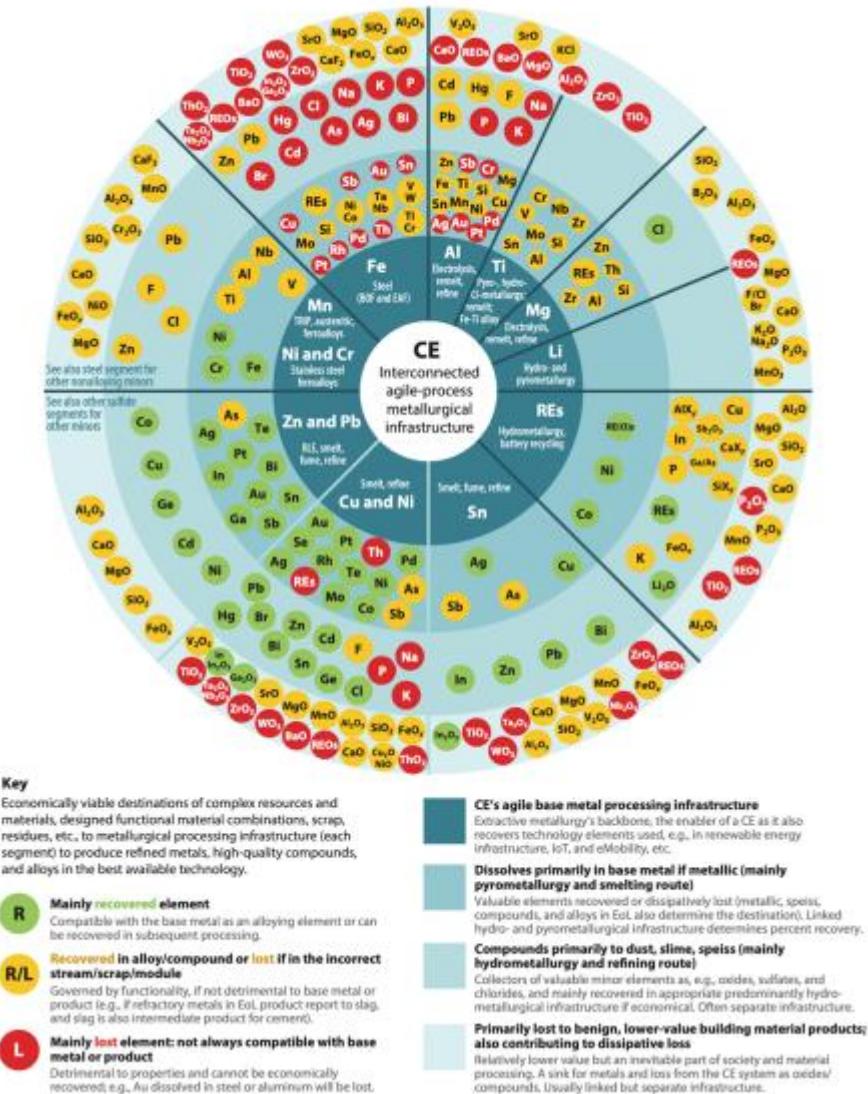


Figura 2. Rueda de Metal para el reciclaje de elementos según los diferentes procesos metalúrgicos (Schaik & van Reuter, 2013)

Para comprender la información de la figura anterior se describe uno de los caminos o sectores. En total aparecen 10 rutas diferentes, cada una de ellas representa un camino o ruta de reciclaje cuyos procesos industriales ya existen. Si tomamos un camino de ellos, por ejemplo, la ruta del Cu y Ni aparecen determinados elementos en verde y que por tanto tendrán una alta tasa de recuperación. En naranja aparecen otros que serán principalmente subciclados y en rojo están aquellos que se perderán. Volviendo al caso del camino del Cu y el Ni se puede afirmar que una pieza que sea reciclada por esa ruta recuperará el Co, los PGMs, metales nobles como el Au y la Ag, pero perderá otros como las tierras raras u otros no nobles como el Fe o el Al.

Es preciso indicar que el grado de reciclabilidad o recuperación de cada metal dependerá del compuesto químico en el cual se encuentre. Por ello para analizar la reciclabilidad de los metales no solamente es necesario conocer la cantidad de metales que tiene una pieza sino también los compuestos químicos en los cuales se encuentran dichos metales.

En el presente trabajo y como consecuencia de las composiciones de las piezas se han empleado las rutas del acero y el cobre para la recuperación de metales férricos y no férricos respectivamente. En ambas rutas, los distintos metales que componen las piezas de estudio han

sido analizados mediante el uso de modelos de simulación termoquímica HSC Sim 10.0, realizados por el socio MARAS del proyecto TREASURE, ubicado en los Países Bajos. A partir de dicho software, se han calculado las tasas de reciclaje de cada uno de los metales que componen las piezas del automóvil en función de la ruta seleccionada para cada una de las fracciones teniendo en cuenta una total circularidad; es decir, que la calidad de los materiales sea lo suficientemente alta como para que estos se puedan aplicar en el mismo producto (bucle cerrado CE). A continuación se explican los procesos metalúrgicos que tienen lugar en cada una de ellas.

2.2.2 Ruta metalúrgica para la recuperación del cobre

En la ruta de procesamiento de cobre, se han llevado a cabo los siguientes procesos metalúrgicos (Glosario): Fundición oxidativa (Cu Isasmelt¹), reducción de lingotes de plomo (fundición reduc-tora de Pb Isasmelt) y refinación de cobre. El reactor Isasmelt (un reactor Top Submerged Lance (TSL)² también puede ser un sustituto de un reactor tipo TBRC³ (Top Blown Rotary Convertor), en donde la metalurgia está determinada por la presión parcial de oxígeno y la temperatura en el reactor. También tiene lugar la lixiviación oxidativa del cobre crudo y, por lo tanto, la electro obtención del cobre. En la Figura b. 1 del Anexo B.1 se puede observar el diagrama de flujo detallado de los procesos requeridos para la recuperación de todos los elementos representados en la ruta del cobre con la tecnología disponible.

2.2.3 Ruta metalúrgica para la recuperación del acero

En la ruta de procesamiento de acero, se ha realizado la fundición de chatarra de acero para crear una aleación sucia rica en hierro a partir de la pieza (Figura b. 2 del Anexo B.2). Los PGM (rutenio (Ru), rodio (Rh), paladio (Pd), osmio (Os), iridio (Ir) y platino (Pt)) podrían hacer que el procesamiento de la aleación sea rentable, pero crea residuos significativos durante el procesamiento hidrometalúrgico.

2.3 Descripción del Método

Una vez definidos los conceptos de Rareza Termodinámica y compatibilidad metalúrgica, se ha procedido a la confección de la metodología utilizada para la realización del presente proyecto. Dicho método, se ha estructurado en siete pasos como se puede observar en la Figura 3.

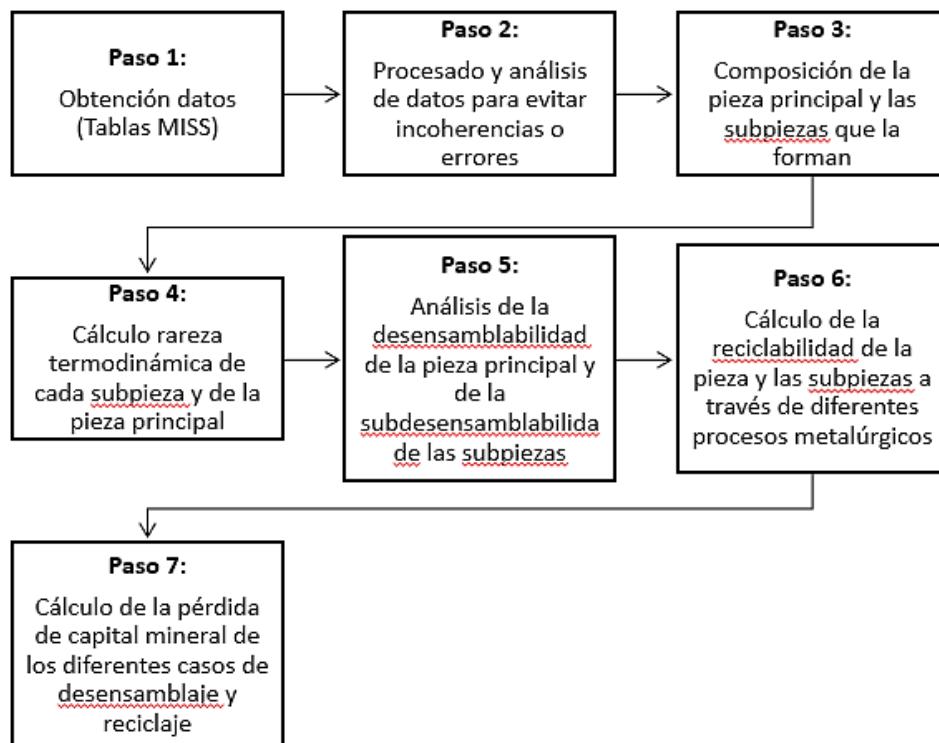


Figura 3. Diagrama de los pasos a seguir en la metodología utilizada en el proyecto

En primer lugar, se parte de la composición material de las piezas. Esta información procede de un sistema interno de SEAT denominado MISS (Material Information System). En la Tabla 2, se muestra un ejemplo de la información procedente de dicha herramienta. Se puede comprobar como la composición de la pieza está desagregada por niveles en los que aparecen una serie de subcomponentes, materiales, elementos y compuestos en los que se dividen las piezas del vehículo. Es preciso indicar que solamente se muestra parte de la información de dicha pieza porque el número de filas totales que tenía dicho archivo era superior a 600.

Tabla 2. Base de datos MISS del cuadro de instrumentos – SEAT León modelo II

MDB-Bericht Inhaltsstoffe in Bauteilen und Werkstoffen

Stoffe, die einem gesetzlichen Anwendungsverbot unterliegen, dürfen nicht enthalten sein!

Es müssen auch Gefahrstoffe angegeben werden, die bei Gebrauch entstehen können oder freigesetzt werden.

Beachte: VDA-Liste für deklarationspflichtige Stoffe.

| | | | |
|------------------------------|---------------------------------|---|---|
| Teil- / Sachnummer: Name: | 1P0.920.850.H Kombinstrument | Musterberichts-Nr.: IMDS-ID / Version: MISS-ID / Version: | KW44/10 143754966 / 1.0 2142370 / 1.0 |
|------------------------------|---------------------------------|---|---|

Teilecharakterisierung

| Baum-Ebene | Typ | Name | Teilnummer/ Sachnummer/ Werkstoffnumme r/ CAS-Nummer | Menge | Gewicht [g] | Mengenanteil [%] | Mengenanteil [%] (von - bis) | VDA- Kategorie/ Reinstoff- Eigenschaften | Polymer- Kennzeichnung/ Rezyklat (Prod.- Abfall/Altmetall)/ Anwendung | SCIP-Informationen |
|------------|-----|---|--|-------|----------------|---------------------|------------------------------------|---|--|--------------------|
| 1 | ■ | Kombinstrument | 1P0.920.850.H | 1 | 834,00 | | | | | |
| —2 | ■ | Frontrahmen BG | - | | 238,50 | | | | | |
| —3 | ■ | Deckglas | - | | 81,50 | | | | Keine gesetzliche Kennzeichnungspflicht. | |
| —4 | ○ | PMMA clear | - | | 81,50 | | 5.1.b | | Rezyklat enthalten: Nein | |
| —5 | ▲ | Polymethylmethacrylat | 9011-14-7 | | | 98,00 | | | | |
| —5 | ▲ | Weitere Additive, nicht zu deklarieren | system | | | 2,00 | | | | |
| —3 | ■ | Frontrahmen BK | - | | 157,00 | | | | Gekennzeichnet laut gesetzlicher Vorschrift. | |
| —4 | ○ | ABS | - | | 156,00 | | 5.1.b | | Rezyklat enthalten: Nein | |
| —5 | ▲ | ABS | - | | | 96,00 | | | | |

A continuación, se realiza un análisis y procesado de los datos para comprobar sus valores y evitar incoherencias o errores que en ocasiones sucedían (Paso 2). Para ello, se llevó a cabo la comprobación de la suma de las masas de los distintos subcomponentes, de manera que dicho valor coincidiera con el de las piezas originales. Una vez identificado cada nivel, se estableció un código de colores (Tabla 3) para facilitar el análisis de las tablas MISS del paso anterior.

Tabla 3. Código de colores y niveles de la tabla MISS del cuadro de instrumentos– SEAT León modelo II

| Teil-/Sachnummer: | | 1P0.920.850.H | | | | Musterberichts-Nr.: | | | | KW44/10 | | | |
|------------------------|---|--|---------------|----------|-------------|---------------------|--------------|----------|---------------------|---|-----------|-----------|-----------|
| Name: | Kombiinstrument <th data-cs="4" data-kind="parent"></th> <th data-kind="ghost"></th> <th data-kind="ghost"></th> <th data-kind="ghost"></th> <th data-cs="4" data-kind="parent">IMDS-ID /Version:</th> <th data-kind="ghost"></th> <th data-kind="ghost"></th> <th data-kind="ghost"></th> <td data-cs="4" data-kind="parent">143754966 /1.0</td> <td data-kind="ghost"></td> <td data-kind="ghost"></td> <td data-kind="ghost"></td> | | | | | IMDS-ID /Version: | | | | 143754966 /1.0 | | | |
| | | | | | | MISS-ID /Version: | | | | 2142370 /1.0 | | | |
| Teilecharakterisierung | | | | | | | | | | | | | |
| Columna1 | Columna2 | Columna3 | Columna4 | Columna5 | Columna6 | Columna7 | Columna8 | Columna9 | Columna10 | Columna11 | Columna12 | Columna13 | Columna14 |
| ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ | ▼ |
| Baum-Ebene | Typ | Name | Teilnummer/ | Menge | Gewicht [g] | Mengenanteil | Mengenanteil | VDA- | Polymer- | SCIP- | | | |
| 1 | ■ | Kombiinstrument | 1P0.920.850.H | 1 | 834,00 | | | | | | | | |
| I-2 | ■ | Frontrahmen | - | 1 | 238,50 | | | | | | | | |
| I-3 | ■ | Deckglas | - | 1 | 81,50 | | | | | Keine gesetzliche Kennzeichnungspflicht | | | |
| I-4 | ○ | PMMA clear | - | | 81,50 | | | 5,1b | Rezyklat enthalten: | | | | |
| I-5 | ▲ | Poly(methylmethacrylate) | 9011-14-7 | | | 98,00 | | | | | | | |
| I-5 | ▲ | Weitere Additive, nicht zu deklarieren | system | | | 2,00 | | | | | | | |
| I-3 | ■ | Frontrahmen BK | - | 1 | 157,00 | | | | | Gekennzeichnet laut gesetzlicher Maßordnung | | | |
| I-4 | ○ | ABS | - | | 156,00 | | | 5,1b | Rezyklat enthalten: | | | | |
| I-5 | ▲ | ABS | - | | | 96,00 | | | | | | | |
| I-5 | ▲ | Weitere Additive, nicht zu deklarieren | system | | | 2,00 | | | | | | | |
| I-5 | ▲ | RuB | 1333-86-4 | | | 2,00 | | | | | | | |
| I-4 | ○ | Hydropaint | - | | 1,00 | | | 6,1 | Rezyklat nicht: | | | | |
| I-5 | ▲ | Polyacrylat | - | | | 59,70 | | | | | | | |

Seguidamente, en el Paso 3, se procedió a identificar las subpiezas que eran fácilmente desensamblables, en este caso las pertenecientes a los niveles 2 (Tabla 4), donde cinco de ellas resultaron ser piezas metálicas y las otras quince plásticas.

Tabla 4. Subpiezas que eran fácilmente desensamblables pertenecientes a los niveles 2 del cuadro de instrumentos– SEAT León modelo II

| Columna1 | Columna2 | Columna3 | Columna4 | Columna5 | Columna6 | Columna7 | Columna8 | Columna9 | Columna10 | Columna11 | Columna12 | Columna13 | Columna14 | Weight L2 | Check L3;2 | Difference (g) |
|----------|----------|--|------------|----------|----------|----------|----------|----------|---|---|-----------|-----------|-----------|-------------|--------------|----------------|
| I-2 | ■ | Stepper motor | 91265 013 | 4 | 44,00 | | | | | | | | | 11,00 | 10,99 | 0,01 |
| I-3 | | Cover | - | 1 | 142 | | | | | Keine gesetzliche Kennzeichnungspflicht | | | | Weight L3;1 | Check L4;3;1 | |
| I-4 | ○ | PBT MD17 | - | | 1418 | | | 5,1a | Rezyklat enthalten: | | | | | 1,418 | 1,418 | 0,00 |
| I-5 | ▲ | PBT | - | | 1,14858 | | 81,00 | | | | | | | Weight L3;2 | Check L4;3;2 | |
| I-5 | ▲ | Tinoxid | 13463-67-7 | | 0,24106 | | 17,00 | | | | | | | 2,155 | 2,150 | 0,005 |
| I-5 | ▲ | Weitere Additive, nicht zu deklarieren | system | | | 0,02836 | | | | | | | | Weight L3;3 | Check L4;3;3 | |
| I-3 | ■ | Support plate assy | - | 1 | 2,155 | | | | | | | | | 0,58 | 0,58 | 0,00 |
| I-4 | | Support plate | - | 1 | 147 | | | | Keine gesetzliche Kennzeichnungspflicht | | | | | Weight L3;4 | Check L4;3;4 | |
| I-5 | ○ | PBT MD17 | - | | 1,47 | | | 5,1a | Rezyklat enthalten: | | | | | 1,68 | 1,68 | 0,00 |
| I-6 | ▲ | PBT | - | | 1,1907 | | 81,00 | | | | | | | Weight L3;5 | Check L4;3;5 | |
| I-6 | ▲ | Tinoxid | 13463-67-7 | | 0,2499 | | 17,00 | | | | | | | 4,99 | 4,99 | 0,00 |
| I-6 | ▲ | Weitere Additive, nicht zu deklarieren | system | | | 0,0294 | | | | | | | | Weight L3;6 | Check L4;3;6 | |
| I-4 | ■ | Ball | - | 1 | 0,68 | | | | Keine gesetzliche Kennzeichnungspflicht | | | | | 0,173 | 0,173 | 0,00 |

Una vez conocidas las masas de los elementos para cada pieza, se realizó el cálculo de la Rareza Termodinámica por pieza (Paso 4) sumando los productos de multiplicar la masa (m) de cada

uno de los elementos (*i*) por su valor de Rareza Termodinámica (Rarity) para todos los metales que forman una pieza, tal y como aparece en la ecuación 2 (Ec. 2).

$$Rarity (A) = \sum_{i=1}^n m(i) \cdot Rarity (i) \quad \text{Ec. 2}$$

El Paso 5, consistió en la caracterización material de las tablas MISS con los subcomponentes desensamblados, dicho de otra forma, no solamente en conocer la composición de la pieza sino de cada una de las subpiezas que la componen. Este paso permite clasificar los subcomponentes de cada pieza, que en función de su composición deberán de ir a la ruta del Cu o del acero.

En este punto además de analizar la composición por subpieza se estudió su desensamblabilidad a nivel físico mediante piezas procedentes de un vehículo fin de vida. A modo de ejemplo, en la Figura 4. Ejemplo del análisis de desensamblabilidad realizado para el cuadro de instrumentos– SEAT León modelo II se pueden ver diferentes subcomponentes de un cuadro de instrumentos y el grupo o fracción de reciclaje a la que se dirigiría.

| | | |
|--|--|--|
|  |  |  |
| Carcasas plásticas | Electrónica → Ruta del cobre | Tornillería → Ruta del acero |

Figura 4. Ejemplo del análisis de desensamblabilidad realizado para el cuadro de instrumentos– SEAT León modelo II

Seguidamente se analiza la reciclabilidad de cada pieza empleando los siguientes casos:

- Caso 1 (fragmentación). La pieza es fragmentada junto con el vehículo y solo se recupera de ella la parte de acero a través de los procesos magnéticos aplicados en la postfragmentación.
- Caso 2 (desmontaje del coche). En este caso la pieza se desmonta del vehículo y se lleva a un único proceso metalúrgico dependiendo de la composición de esta. En nuestro caso y dada las composiciones de las piezas analizadas este único proceso metalúrgico fue la ruta del cobre.
- Caso 3 (desensamblaje). En este caso la pieza se desensambla para tener una fracción de subcomponentes que sean reciclados por la ruta del Cu y otra por la ruta del acero.

En los dos últimos casos, se registran el uso de herramientas (estándar/no estándar), el nivel de dificultad (Bajo/Medio/Alto) y el tiempo de desensamblaje para hacer una evaluación económica posterior.

Finalmente se cuantifica la perdida de capital mineral para cada caso de la siguiente forma:

- Caso 1: Se considera que se recupera únicamente la parte férrica de la pieza y por tanto el capital mineral recuperado es de la fracción férrica con relación a la Rareza Termodinámica total de dicha pieza.
- Casos 2 y 3: Se calcula la Rareza Termodinámica que se ha recuperado tras la aplicación de los procesos metalúrgicos y se compara con el valor inicial.

En la Figura 5, se resume dicho procedimiento.

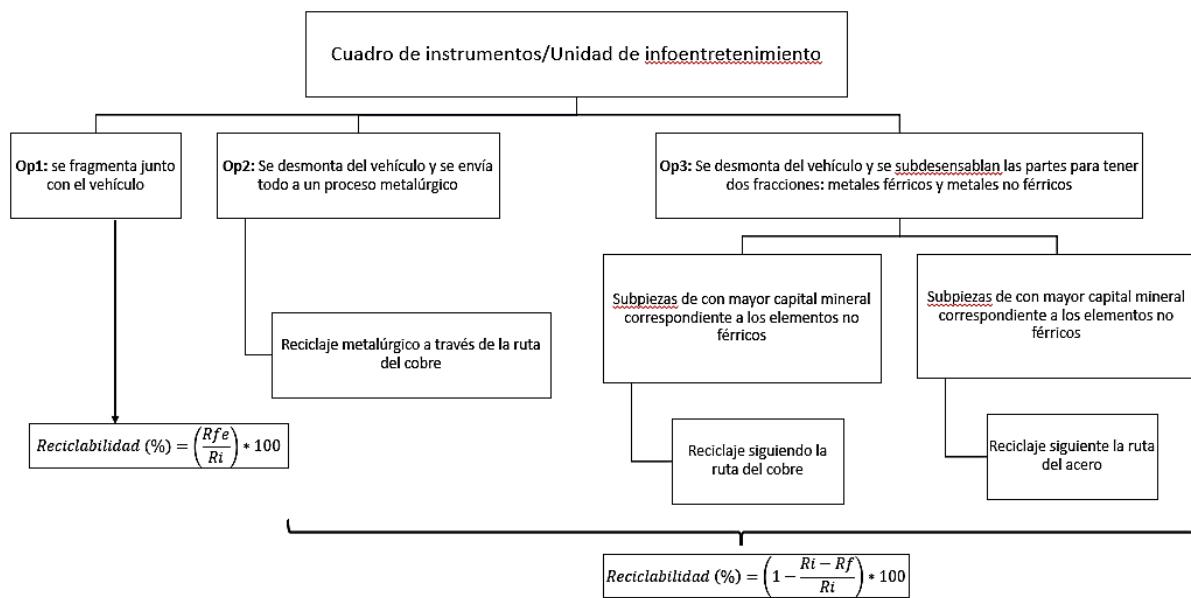


Figura 5. Diagrama resumen de los escenarios contemplados en la realización del proyecto

3. Descripción del caso de estudio

En esta sección se van a describir las principales características de los componentes sobre los cuales se ha aplicado la metodología: El cuadro de instrumentos y el sistema de infoentretenimiento de un SEAT León II.

El motivo de la elección de ambas piezas se debe a que, de una investigación previa sobre caracterización de las piezas más críticas de ese mismo modelo, se identificaron ambas dos - cuadro de instrumentos y sistema de infoentretenimiento - como componentes críticos desde el punto de vista de los materiales que emplean (Ortego, 2019).

En la Tabla 5, se muestran las principales características en ambos casos, desde el punto de vista de los materiales que emplean.

Tabla 5. Características del cuadro de instrumentos y del sistema de infoentretenimiento– SEAT León modelo II (Ortego, 2019)

| | Peso (g) | Rareza termodinámica (kJ) | Metales más críticos por su contribución a la Rareza Termodinámica de pieza | | | | | |
|--------------------------------|----------|---------------------------|---|--------|-------|-------|-------|-------|
| | | | Au | Ta | Pt | Cu | Ag | In |
| Cuadro de instrumentos | 829 | 683.023 | 53,5 % | 36,2 % | 6,2 % | 1,4 % | 1,1 % | 0,6 % |
| | | | Ta | Pd | Au | Cu | Ag | Ru |
| Sistema de infoentretenimiento | 1.973 | 582.581 | 57,1 % | 26,2 % | 7,1 % | 5,2 % | 1,5 % | 0,9 % |

3.1 Cuadro de instrumentos

El cuadro de instrumentos es el conjunto de indicadores que proporcionan información esencial sobre el funcionamiento y el estado del vehículo. Está constituido por el indicador de velocidad del coche, el tacómetro o cuentarrevoluciones, el indicador de temperatura del refrigerante y el nivel del combustible restante en forma de relojes analógicos en este caso (Figura 6) aunque también podrían ser digitales o una combinación de ambos.



Figura 6. Cuadro de instrumentos– SEAT León modelo II (EUROFRANCE, 2023)

El cuadro de instrumentos del SEAT León generación II tiene una masa de 829,42 gramos, de los cuales sólo 213 gramos (25,70 %) pertenecen a piezas metálicas siendo el resto plásticos. Desde el punto de vista de la información, el archivo procedente del sistema MISS de esta pieza consta de 672 filas, las cuales se dividen en diferentes niveles donde aparecen una serie de subcomponentes, materiales, elementos y compuestos. Este cuadro de instrumentos consta de veinte subpiezas (quince de plástico y cinco metálicas). En la Tabla c.1. 1, Tabla c.1. 2 y Tabla c.1. 3 del Anexo C.1, se muestran cada una de ellas.

En la Figura 7, se muestra el proceso de desmontaje del cuadro de instrumentos. A la izquierda se observa la ubicación del cuadro de instrumentos dentro del vehículo. En la imagen central se pueden ver la ubicación de los tornillos una vez que se ha retirado la carcasa de plástico que cubre el cuadro de instrumentos. Finalmente, a la derecha se ve el cuadro de instrumentos fuera del coche.

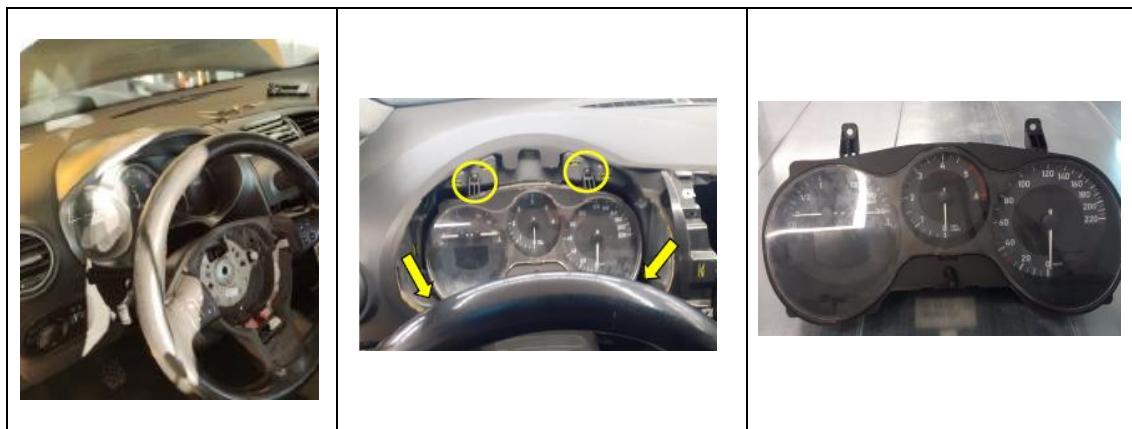


Figura 7. Ubicación del cuadro de instrumentos – SEAT León modelo II (A.Ortego et al., 2022)

Con relación al proceso de desmontaje del cuadro de instrumentos, este se realiza empleando herramientas estándar (llave tipo torx y destornillador plano) y en un tiempo de 9 minutos. Desde el punto de vista del subdesensamblaje de los componentes del cuadro, se pudieron desmontar empleando herramientas estándar (llave tipo torx y destornillador plano) y en un tiempo de 14 minutos. En la Figura 8, se puede ver el cuadro de instrumentos subdesensamblado.



Figura 8. Cuadro de instrumentos – SEAT León modelo II desensamblado (A.Ortego et al., 2022)

3.2 Sistema de infoentretenimiento

Los sistemas de infoentretenimiento están muy extendidos en todos los modelos de automóviles presentes hoy en día en el mercado. Desde pequeños compactos urbanos hasta los grandes SUV (vehículo utilitario deportivo). Esta pieza, consiste en un conjunto de sistemas de hardware y software que incluyen diversas prestaciones como conexión a Internet, monitoreo del tráfico, retransmisión de música y contenido audiovisual, navegación GPS, gestión del correo electrónico y llamadas a través de los manos libres, dependiendo del modelo. Estos permiten una serie de funcionalidades a través del uso de botones físicos, panel de instrumentos, comandos vocales y gestuales, así como pantallas táctiles (Cochehoy.com, 2023).

El sistema de infoentretenimiento del SEAT León generación II tiene una masa de 1.973 gramos, de los cuales 1.587 gramos (80,44%) pertenecen a piezas metálicas, el resto son plásticos. Desde el punto de vista de la información, el archivo procedente del sistema MISS de esta pieza consta de 2.269 filas, las cuales se dividen en siete subpiezas (una de plástico y seis metálicas). En la Tabla c.2. 1, Tabla c.2. 2 y Tabla c.2. 3 del Anexo C.2, se muestran cada una de ellas.

En la Figura 9, se muestra el proceso de desmontaje. A la izquierda se ve la ubicación dentro del vehículo y los sistemas de extracción necesarios para desmontarlo. A la derecha se ve el sistema de infoentretenimiento fuera del coche.



Figura 9. Ubicación del sistema de infoentretenimiento–SEAT León modelo II (A.Ortego et al., 2022)

Con relación al proceso de desmontaje, este se realiza empleando unos extractores que liberan los clips de unión y en un tiempo de 10 minutos. Desde el punto de vista del subdesensamblaje de los componentes del cuadro, se pudieron desmontar empleando herramientas estándar (llave tipo torx y destornillador plano) y en un tiempo de 20 minutos.

En la Figura 10, se muestra el sistema de infoentretenimiento del estudio separado en las diferentes fracciones de material. En la primera imagen de la izquierda de dicha figura aparece la fracción plástica, en la siguiente imagen están los metales no ferrosos a excepción del aluminio, en la tercera imagen se muestra una mezcla de fracciones férricas-no férricas y, por último, en la imagen de más a la derecha, aparece una muestra de las subpiezas que componen la fracción férrica.

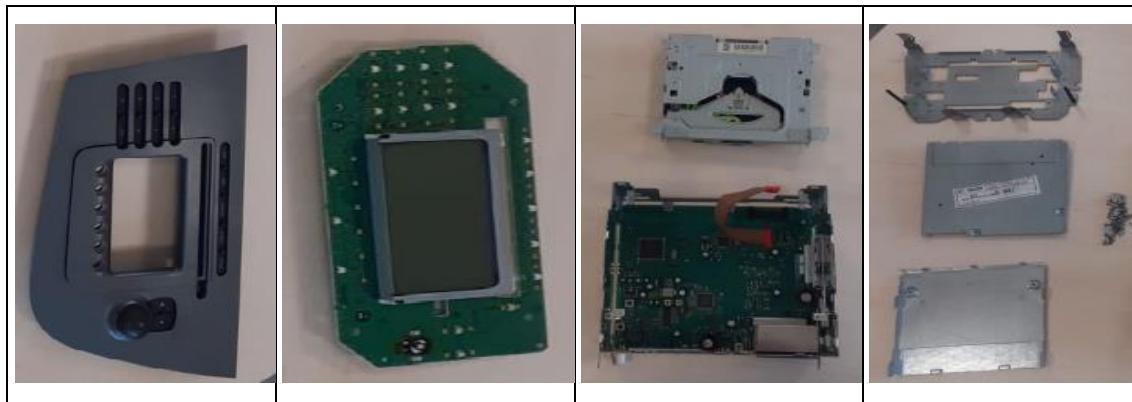


Figura 10. Fracciones de material del sistema de infoentretenimiento –SEAT León modelo II (A.Ortego et al., 2022)

4. Resultados

Una vez descritas las piezas sobre las cuales se ha aplicado la metodología (cuadro de instrumentos y sistema de infoentretenimiento del SEAT León generación II) se presentan los resultados relativos a: (1) Rareza Termodinámica de las piezas y subcomponentes; (2) Reciclabilidad de

las piezas y (3) Evaluación de la pérdida de capital mineral para cada escenario de reciclaje propuesto.

4.1 Rareza termodinámica metales

4.1.1 Cuadro de instrumentos SEAT León II

En primer lugar, se han identificado los metales contenidos en el cuadro de instrumentos del SEAT León II y para cada una de las subpartes los metales más críticos según su Rareza Termodinámica. En el Anexo A.2. 1, se muestran todos los valores de las contribuciones de los metales en las diferentes subpartes del cuadro de instrumentos, medidas en términos de Rareza Termodinámica (kJ). A continuación, se presentan aquellos 3 metales que contribuyen en mayor medida al cuadro de instrumentos en su totalidad, así como a cada subparte.

En el cuadro de instrumentos (Tabla 6), los tres metales de mayor valor en términos de Rareza Termodinámica son: Au, Ta y Pt. Se puede observar que más de la mitad del valor termodinámico de la pieza pertenece al oro. La Rareza Termodinámica total del cuadro de instrumentos del SEAT León generación II es de 688.732,23 kJ.

Tabla 6. Rareza termodinámica de los metales contenidos en el cuadro de instrumentos–SEAT León modelo II

| Cuadro de instrumentos | | |
|------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica pieza |
| Au | 365.844,74 | 53,12 |
| Ta | 247.903,00 | 35,99 |
| Pt | 42.490,79 | 6,17 |

En los cuatro motores paso a paso (Tabla 7), los tres metales de mayor valor en términos de Rareza Termodinámica son: Cu, Nd y Ti. Se puede observar que más de la mitad del valor termodinámico de esta subpieza pertenece al Cu. La Rareza Termodinámica de los motores es de 927,00 kJ; es decir, un 0,13 % respecto a la del cuadro de instrumentos.

Tabla 7. Rareza Termodinámica de los metales del motor paso a paso del cuadro de instrumentos – SEAT León modelo II

| Motor paso a paso | | |
|-------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica subparte |
| Cu | 497,61 | 53,68 |
| Nd | 158,45 | 17,09 |
| Ti | 119,54 | 12,89 |

En los tornillos (Tabla 8), los tres metales de mayor valor en términos de rareza termodinámica son: Fe, Ni y Mo. Se puede observar que el hierro tiene más Rareza Termodinámica que el doble de la suma de los otros dos elementos. La Rareza Termodinámica de los tornillos es de 32,19 kJ; es decir, un 0,005 % respecto a la del cuadro de instrumentos.

Tabla 8. Rareza Termodinámica de los metales de los tornillos del cuadro de instrumentos– SEAT León modelo II

| Tornillos | | |
|------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica subparte |
| Fe | 21,58 | 67,05 |
| Ni | 4,51 | 14,01 |
| Mo | 2,96 | 9,18 |

En la pantalla adicional (Tabla 9), los tres metales de mayor valor en términos de Rareza Termodinámica son: In, Au y Al. Se puede observar que más de la mitad del valor termodinámico de esta subpieza pertenece al indio. La Rareza Termodinámica de la pantalla adicional es de 5.572,49 kJ; es decir, un 0,81 % respecto a la del cuadro de instrumentos.

Tabla 9. Rareza Termodinámica de los metales de la pantalla adicional del cuadro de instrumentos– SEAT León modelo II

| Pantalla adicional | | |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica subparte |
| In | 3.114,20 | 55,89 |
| Au | 1.430,48 | 25,67 |
| Al | 914,30 | 16,41 |

En el circuito impreso (Tabla 10), los tres metales de mayor valor en términos de Rareza Termodinámica son: Au, Ta y Pt. Se puede observar que más de la mitad del valor termodinámico de esta subpieza pertenece al Au. La Rareza Termodinámica del circuito impreso adicional es de 681.523,19 kJ; es decir, un 98,95 % respecto a la del cuadro de instrumentos.

Tabla 10. Rareza Termodinámica de los metales del circuito impreso adicional del cuadro de instrumentos– SEAT León modelo II

| Circuito impreso adicional | | |
|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica subparte |
| Au | 364.409,34 | 53,47 |
| Ta | 247.903,00 | 36,37 |
| Pt | 42.490,79 | 6,23 |

En el altavoz (Tabla 11), los tres metales de mayor valor en términos de Rareza Termodinámica son: Nd, Fe y Cu. Se puede observar que el neodimio tiene más Rareza Termodinámica que el doble de la suma de los otros dos elementos. La Rareza Termodinámica del altavoz es de 677,36 kJ; es decir, un 0,10 % respecto a la del cuadro de instrumentos.

Tabla 11. Rareza termodinámica de los metales del altavoz del cuadro de instrumentos– SEAT León modelo II

| Altavoz | | |
|----------------|---------------------------|---------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica subparte |
| Nd | 401,00 | 59,20 |
| Fe | 104,26 | 15,39 |
| Cu | 78,10 | 11,53 |

4.1.2 Sistema de infoentretenimiento SEAT León II

Análogamente al caso del cuadro de instrumentos del SEAT León II, se han identificado los metales contenidos en el sistema de infoentretenimiento del SEAT León II. En el Anexo A.2. 2, se muestran los valores de las contribuciones de los metales en las diferentes subpartes del sistema

de infoentretenimiento, medidas en unidades de Rareza Termodinámica (kJ). A continuación, se muestran los tres metales que mayor contribuyen a la rareza termodinámica tanto de la pieza en su totalidad como de cada una de las subpartes.

En el sistema de infoentretenimiento (Tabla 12), los tres metales de mayor valor en términos de Rareza Termodinámica son: Ta, Au y Pd. Se puede observar que el tantalio es el metal con mayor valor termodinámico de la pieza. La Rareza Termodinámica total del cuadro de instrumentos del SEAT León generación II es de 868.907,31 kJ.

Tabla 12. Rareza Termodinámica de los metales del sistema de infoentretenimiento – SEAT León modelo II

| Sistema de infoentretenimiento | | |
|--------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica pieza |
| Ta | 332.891,59 | 38,31 |
| Au | 241.151,99 | 27,75 |
| Pd | 152.106,29 | 17,51 |

En el controlador (Tabla 13), los tres metales de mayor valor en términos de Rareza Termodinámica son: Au, Cu y Fe. Se puede observar que el oro tiene más de cinco veces la Rareza Termodinámica que la suma de los otros dos elementos. La Rareza Termodinámica del controlador es de 257.237,60 kJ; es decir, un 29,60 % respecto a la del sistema de infoentretenimiento.

Tabla 13. Rareza Termodinámica de los metales del controlador del sistema de infoentretenimiento – SEAT León modelo II

| Controlador | | |
|-------------|---------------------------|---------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica subparte |
| Au | 206.166,46 | 80,15 |
| Cu | 18.993,43 | 7,38 |
| Fe | 17.353,34 | 6,75 |

En las carcasas (Tabla 14), los tres metales de mayor valor en términos de Rareza Termodinámica son: Fe, Zn y Mn. Se puede observar que prácticamente, toda la Rareza Termodinámica de la subpieza está constituida por el hierro, debida en gran parte a la elevada masa de este metal en la pieza 829,38 gramos de Fe sobre 836,12 gramos que pesan las carcasas). La Rareza Termodinámica de las carcasas es de 27.787,52 kJ; es decir, un 3,20 % respecto a la del sistema de infoentretenimiento.

Tabla 14. Rareza Termodinámica de los metales de las carcasas del sistema de infoentretenimiento – SEAT León modelo II

| Carcasas | | |
|----------|---------------------------|---------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica subparte |
| Fe | 26.540,13 | 95,51 |
| Zn | 625,65 | 2,25 |
| Mn | 184,44 | 0,66 |

En el circuito impreso (Tabla 15), los tres metales de mayor valor en términos de Rareza Termodinámica son: Ta, Pd y Au. Se puede observar que más de la mitad del valor termodinámico de la pieza pertenece al tantalio. La Rareza Termodinámica del circuito impreso es de 372.749,81 kJ; es decir, un 42,90 % respecto a la del sistema de infoentretenimiento.

Tabla 15. Rareza Termodinámica de los metales del circuito impreso del sistema de infoentretenimiento – SEAT León modelo II

| Circuito impreso | | |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica subparte |
| Ta | 229.519,72 | 61,57 |
| Pd | 101.673,65 | 27,27 |
| Au | 23.192,93 | 6,22 |

El disipador de calor (Tabla 16), está compuesto únicamente por dos metales: Al y Zn. El que presenta un mayor valor en términos de Rareza Termodinámica es el aluminio, puesto que este elemento constituye prácticamente en su totalidad a esta subpieza. La Rareza Termodinámica del disipador de calor es de 28.952,38 kJ; es decir, un 3,33 % respecto a la del sistema de infoentretenimiento.

Tabla 16. Rareza Termodinámica de los metales del disipador de calor del sistema de infoentretenimiento – SEAT León modelo II

| Disipador de calor | | |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica subparte |
| Al | 28.943,67 | 99,97 |
| Zn | 8,71 | 0,03 |
| - | - | - |

En el marco de la pantalla LCD (Tabla 17), los tres metales de mayor valor en términos de Rareza Termodinámica son: Fe, Sn y Mn. Se puede observar que prácticamente, toda la Rareza Termodinámica de la subpieza está constituida por el hierro, debido en gran parte a la elevada masa de este metal en la misma (25,13 gramos de Fe con relación a 25,37 gramos que pesa el marco de la pantalla LCD). La Rareza Termodinámica de esta subpieza es de 884,53 kJ; es decir, un 0,10 % respecto a la del sistema de infoentretenimiento.

Tabla 17. Rareza Termodinámica de los metales del marco de la pantalla LCD del sistema de infoentretenimiento – SEAT León modelo II

| Marco de la pantalla LCD | | |
|---------------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica subparte |
| Fe | 804,25 | 90,92 |
| Sn | 74,73 | 8,45 |
| Mn | 5,53 | 0,62 |

En el panel de control (Tabla 18), los tres metales de mayor valor en términos de Rareza Termodinámica son: Ta, Pd y Au. Se puede observar que más de la mitad del valor termodinámico de la pieza pertenece al tántalo. La Rareza Termodinámica del panel de control es de 177.204,79 kJ; es decir, un 20,39 % respecto a la del sistema de infoentretenimiento.

Tabla 18. Rareza Termodinámica de los metales del panel de control del sistema de infoentretenimiento – SEAT León modelo II

| Panel de control | | |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica subparte |
| Ta | 103.371,88 | 58,33 |
| Pd | 45.792,13 | 25,84 |
| Au | 10.445,71 | 5,89 |

La pantalla LCD (Tabla 19), los tres metales de mayor valor en términos de Rareza Termodinámica son: Au, Ni y Fe. Se puede observar que el oro tiene más Rareza Termodinámica que el

doble de la suma de los otros dos elementos. La Rareza Termodinámica de la pantalla LCD es de 2.266,814 kJ; es decir, un 0,26 % respecto a la del cuadro de instrumentos.

Tabla 19. Rareza Termodinámica de los metales de la pantalla LCD del sistema de infoentretenimiento–SEAT León modelo II

| Pantalla LCD | | |
|--------------|---------------------------|---------------------------------|
| Metal | Rareza Termodinámica (kJ) | % Rareza Termodinámica subparte |
| Au | 1.346,89 | 59,42 |
| Ni | 469,70 | 20,72 |
| Fe | 192,85 | 8,51 |

4.2 Reciclabilidad de las piezas

Para los diferentes escenarios (Caso 1, Caso 2 y Caso 3), se muestra, en la ecuación 3 (Ec. 3) el cálculo de la reciclabilidad que se ha llevado a cabo en las dos piezas del estudio.

$$\text{Reciclabilidad} (\%) = \left(\frac{R_f}{R_i} \right) * 100 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde Ri es las Rareza Termodinámica de los metales contenidos en la pieza a analizar y Rf es la de los metales recuperados tras el proceso de reciclaje. Para evaluar la pérdida de capital, en la ecuación anterior, habría que sustituir el cociente (Rf/Ri) por (1-(Rf/Ri)).

4.2.1 Cuadro de instrumentos SEAT León II

A continuación, se presentan las tasas de reciclaje obtenidas de los procesos de simulación metalúrgica con el software HSC, realizados por la empresa MARAS. En la Figura 11, se representa el Caso 2 (desmontaje del coche) del cuadro de instrumentos del SEAT León generación II. En ella aparecen los porcentajes de recuperación de cada uno de los metales seleccionados para el reciclaje de la pieza comentada mediante la ruta de procesamiento del cobre. El color rojo oscuro indica que la reciclabilidad de las piezas es nula, el verde oscuro muestra que los metales son reciclados con total circularidad (Au, Co, Cu, In, Ni, Pd, Pt, Sn) y los colores intermedios hacen referencia a una recuperación parcial de los materiales.

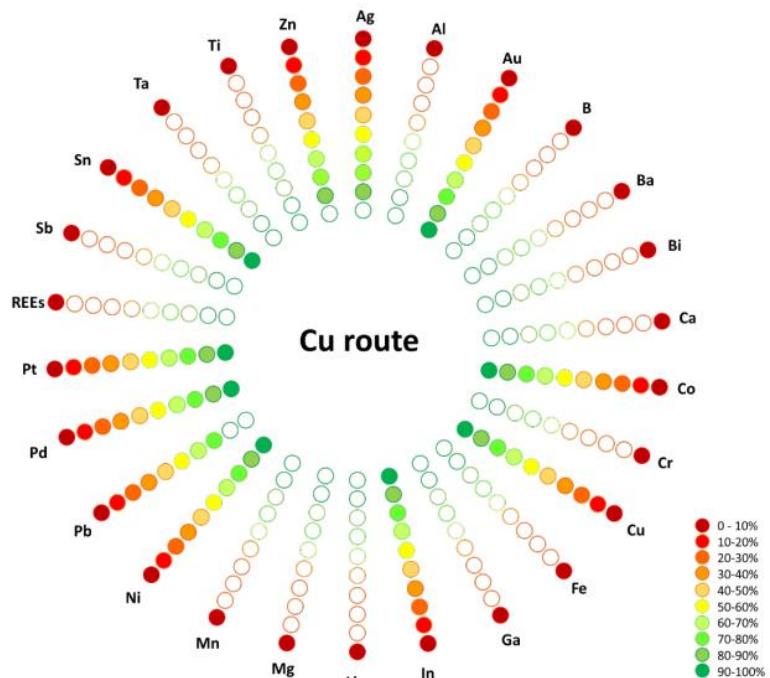


Figura 11. Tasas de reciclaje de una serie de elementos seleccionados para el reciclaje del cuadro de instrumentos—SEAT León modelo II en la ruta de procesamiento de Cu (Caso 2) (Antoinette van Schaik & Markus A. Reuter, 2022)

A continuación, se representa el Caso 3 (desensamblaje) del cuadro de instrumentos del SEAT León generación II. En la Figura 12, aparecen los porcentajes de recuperación de cada uno de los metales seleccionados para el reciclaje de dicha pieza mediante la ruta de procesamiento del cobre. Los metales reciclados con total circularidad en este caso son: Au, Co, Cu, Ni, Pb, Pd, Pt.

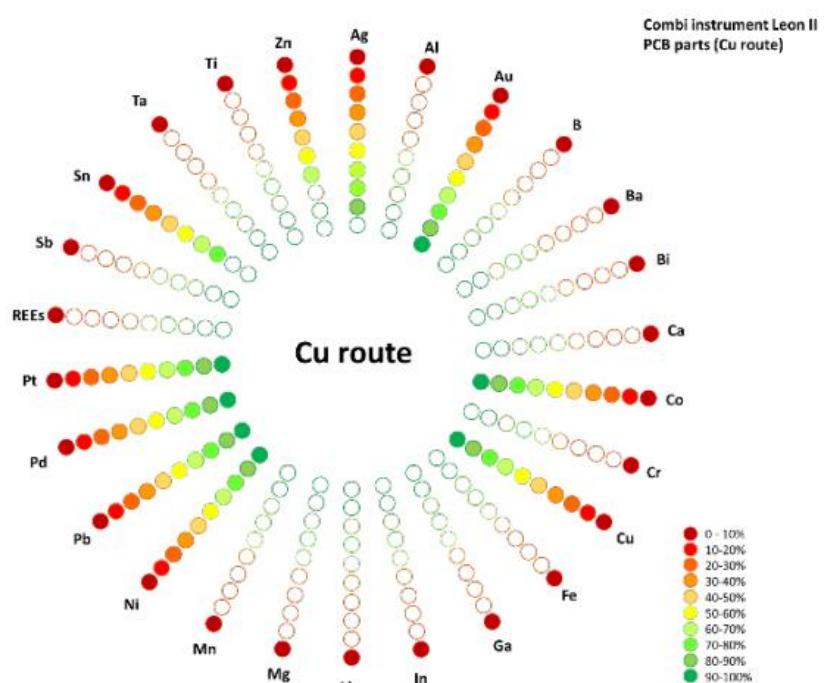


Figura 12. Tasas de reciclaje de una serie de elementos seleccionados para el reciclaje del cuadro de instrumentos—SEAT León modelo II en la ruta de procesamiento de Cu (Caso 3) (Antoinette van Schaik & Markus A. Reuter, 2022)

Por otro lado, en la Figura 13, aparecen los porcentajes de recuperación de cada uno de los metales seleccionados para el reciclaje de dicha pieza mediante la ruta de procesamiento del acero. Los metales reciclados con total circularidad en este caso son: Co, Cu y Fe.

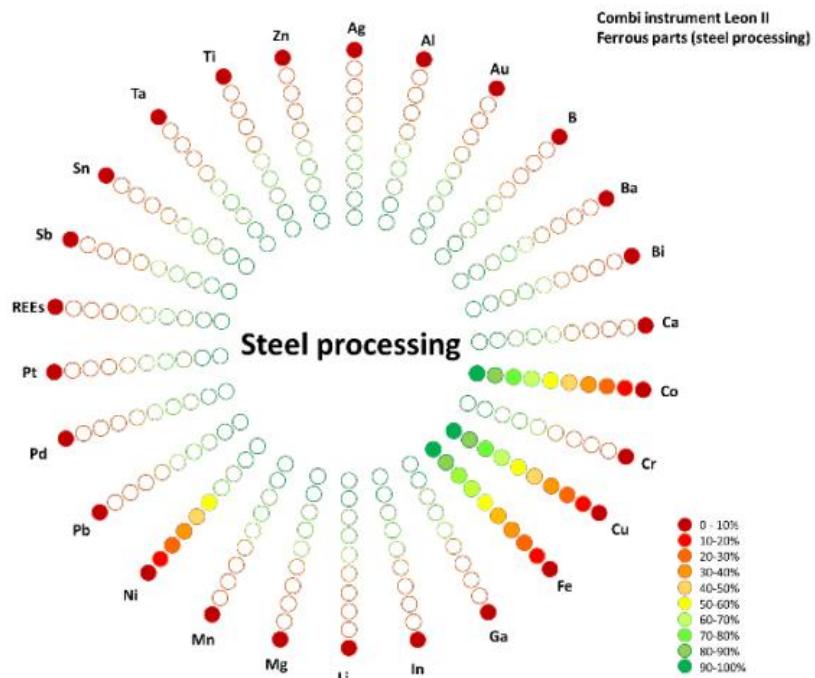


Figura 13. Tasas de reciclaje de una serie de elementos seleccionados para el reciclaje del cuadro de instrumentos—SEAT León modelo II en la ruta de procesamiento de acero (Caso 3) (Antoinette van Schaik & Markus A. Reuter, 2022)

La reciclabilidad obtenida para el cuadro de instrumentos, considerando la Rareza Termodinámica de cada uno de los elementos es la siguiente (Figura 14):

- Caso 1 (fragmentación): 0,033 %
- Caso 2 (desmontaje del coche): 59,09 %
- Caso 3: (desensamblaje): 58,44 %

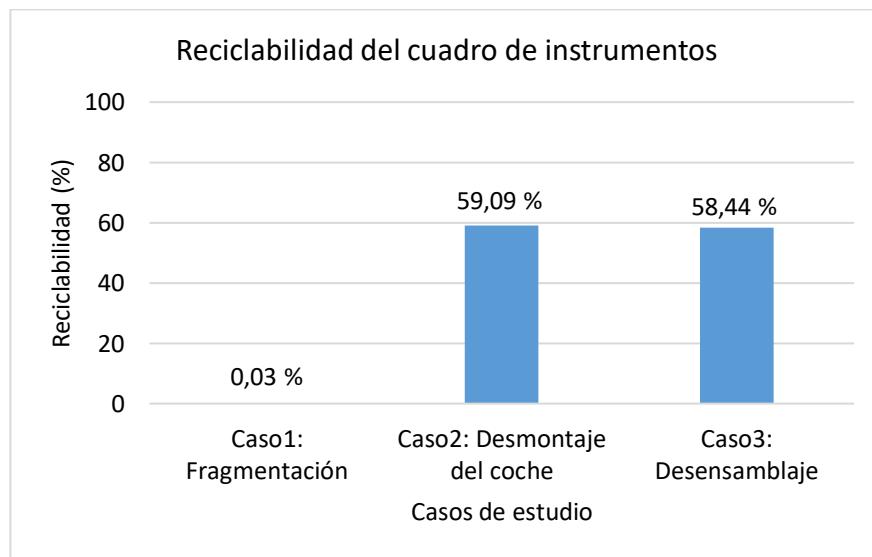


Figura 14. Reciclabilidad del cuadro de instrumentos—SEAT León modelo II para los tres casos de estudio

4.2.2 Sistema de infoentretenimiento SEAT León II

Análogamente al caso del cuadro de instrumentos del SEAT León II, en la Figura 15, se representa el Caso 2 (desmontaje del coche) del sistema de infoentretenimiento del SEAT León generación II. En ella aparecen los porcentajes de recuperación de cada uno de los metales seleccionados para el reciclaje de la pieza comentada mediante la ruta de procesamiento del cobre. Los metales reciclados con total circularidad en este caso son: Au, Co, Cu, In, Ni, Pd, Pt y Sn.

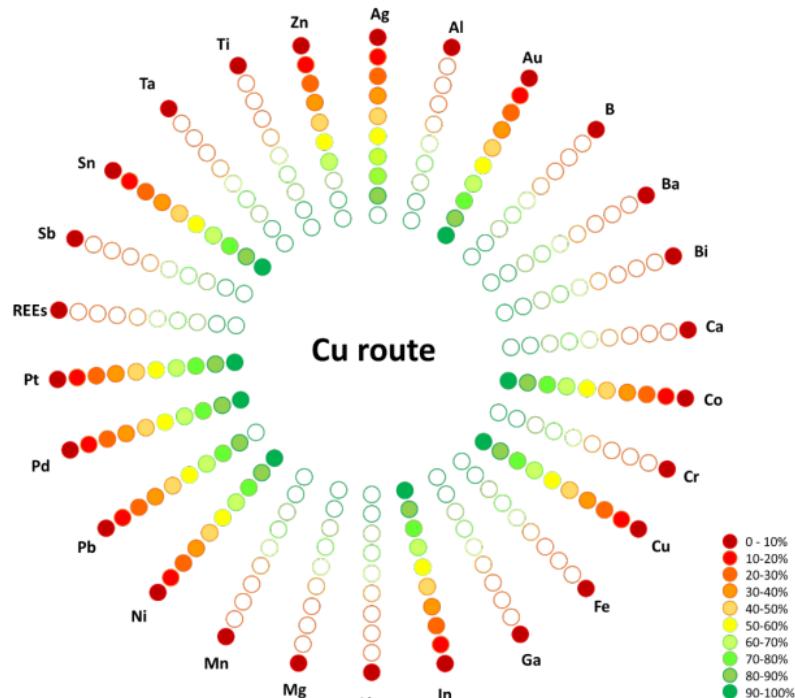


Figura 15. Tasas de reciclaje de una serie de elementos seleccionados para el reciclaje del sistema de infoentretenimiento– SEAT León modelo II en la ruta de procesamiento de Cu (Caso 2) (Antoinette van Schaik & Markus A. Reuter, 2022)

En las figuras 16 y 17, se representa el Caso 3 (desensamblaje) del sistema de infoentretenimiento del SEAT León generación II. En la Figura 16, aparecen los porcentajes de recuperación de cada uno de los metales seleccionados para el reciclaje de dicha pieza mediante la ruta de procesamiento del cobre. Los metales reciclados con total circularidad en este caso son: Au, Co, Cu, Ni, Pb, Pd, Pt.

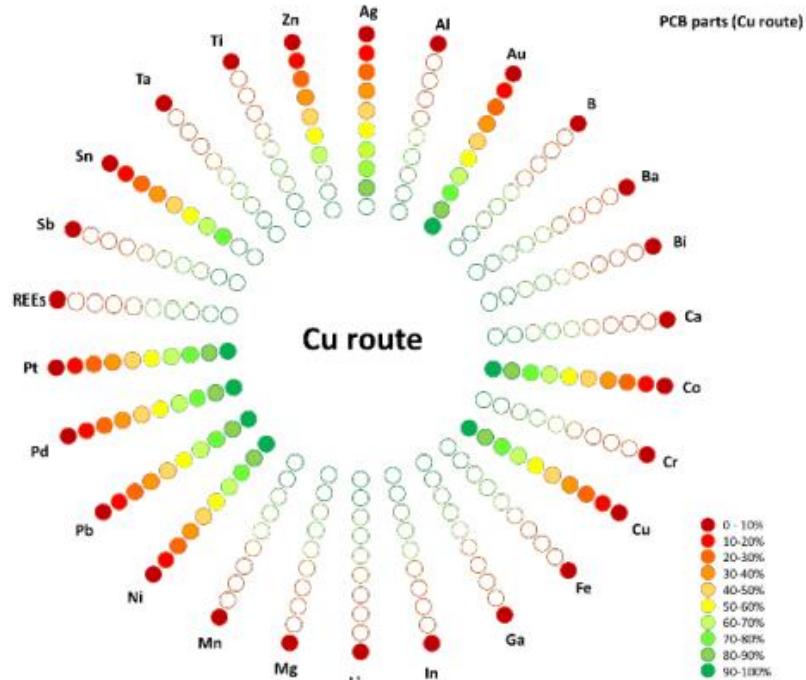


Figura 16. Tasas de reciclaje de una serie de elementos seleccionados para el reciclaje del sistema de infoentretenimiento–SEAT León modelo II en la ruta de procesamiento de Cu (Caso 3) (Antoinette van Schaik & Markus A. Reuter, 2022)

Por otro lado, en la Figura 17, aparecen los porcentajes de recuperación de cada uno de los metales seleccionados para el reciclaje de dicha pieza mediante la ruta de procesamiento del acero. Los metales reciclados con total circularidad en este caso son: Co, Cu y Fe.

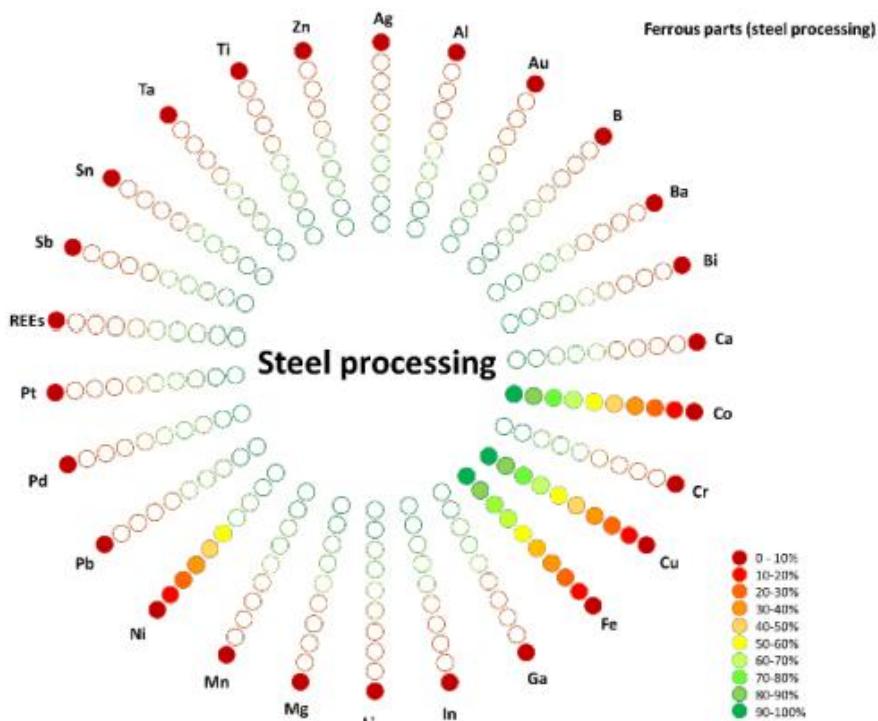


Figura 17. Tasas de reciclaje de una serie de elementos seleccionados para el reciclaje del sistema de infoentretenimiento–SEAT León modelo II en la ruta de procesamiento de acero (Caso 3) (Antoinette van Schaik & Markus A. Reuter, 2022)

La reciclabilidad obtenida para el sistema de infoentretenimiento, considerando la Rareza Termo-dinámica de cada metal, es la siguiente (Figura 18):

- Caso 1 (fragmentación): 5,21 %
- Caso 2 (Desmontaje del coche): 48,76 %
- Caso 3: (Desensamblaje): 50,92 %

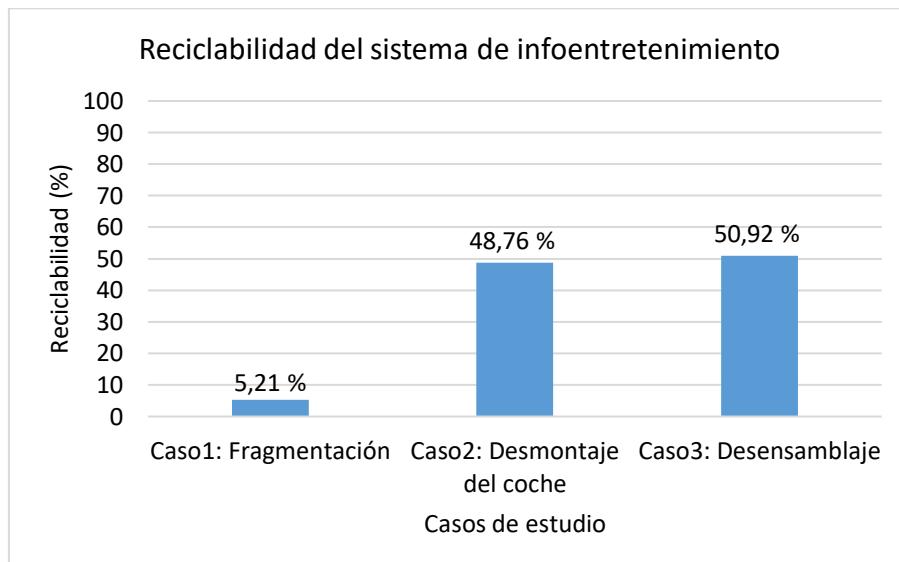


Figura 18. Reciclabilidad del sistema de infoentretenimiento– SEAT León modelo II para los tres casos de estudio

4.3 Evaluación de la pérdida de capital mineral por metal

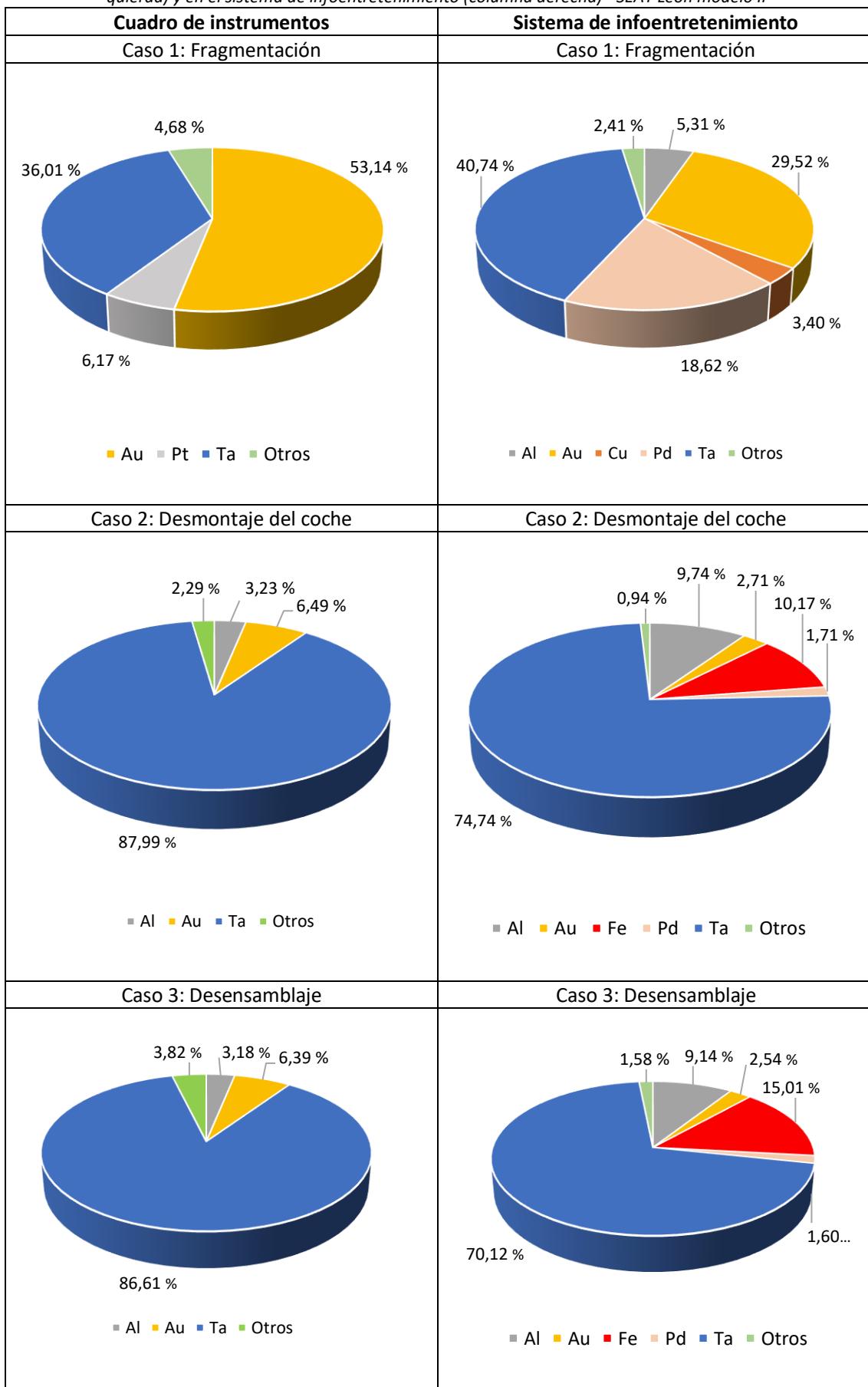
A continuación, en la Tabla 20, se presentan la pérdida del capital mineral para cada escenario y componente analizado, indicando la contribución de cada metal a dicha pérdida. De esta forma se identifican qué metales son los más importantes que no se recuperan en cada caso.

En la columna de la izquierda de la siguiente tabla, aparecen representados los tres escenarios contemplados para el cuadro de instrumentos del SEAT León generación II. En el Caso 1 (Fragmentación) donde el único metal recuperado sería el hierro, se puede observar como el oro constituye más de la mitad de la pérdida de capital mineral de la pieza, seguido del tantalio y del platino fundamentalmente. Al desmontar la pieza del coche (Caso 2), se puede ver como aumenta 2,5 veces la pérdida de tantalio respecto al caso anterior. Al mismo tiempo que, el oro disminuye en 8 veces su pérdida de capital mineral y el platino la reduce a la mitad. En el desensamblaje de la pieza (Caso 3), observamos valores similares de los metales respecto al Caso 2, de manera que, tanto para el tantalio como el oro y platino, su pérdida de capital mineral se ve reducida ligeramente, sin embargo, la del resto de metales se ve aumentada levemente.

Análogamente al caso del cuadro de instrumentos, en lo que respecta al sistema de infoentretenimiento–SEAT León generación II, en la columna de la derecha de la siguiente tabla, aparecen representados los tres escenarios contemplados para dicha pieza. En el Caso 1 (Fragmentación) donde el único metal recuperado sería el hierro, se puede observar como el tantalio constituye más del 40 % de la pérdida de capital mineral total de la pieza, seguido del oro, paladio, aluminio y del cobre fundamentalmente. Al desmontar la pieza del coche (Caso 2), se puede ver como

prácticamente se duplica la pérdida de tántalo respecto el caso anterior. Al mismo tiempo que, el oro disminuye en 11 veces su pérdida de capital mineral, el paladio, al igual que el oro, también se ve reducido en 11 veces y el cobre se recupera en su totalidad. Por otro lado, se observa cómo la pérdida del aluminio se duplica y cómo el hierro constituye la décima parte de la pérdida de capital mineral de la pieza en el desensamblaje de la pieza (Caso 3), observamos valores similares de los metales respecto al Caso 2, de manera que, tanto para el tántalo como el aluminio, oro y paladio, su pérdida de capital mineral se ve reducida ligeramente, sin embargo, la del hierro aumenta 1,5 veces respecto al desmontaje y la del resto de metales también se ve aumentada levemente.

Tabla 20. Representación de la pérdida de capital mineral por metal en el cuadro de instrumentos (columna izquierda) y en el sistema de infoentretenimiento (columna derecha)– SEAT León modelo II



Tras analizar los gráficos anteriores, se puede deducir que, en ambas piezas, la pérdida de capital mineral, a pesar de aplicar los casos 2 y 3, se debe principalmente, a la incompatibilidad entre la recuperación de tántalo y los procesos metalúrgicos aplicados orientados a la recuperación de cobre y acero.

También se puede concluir que los metales más valiosos en términos de Rareza Termodinámica en el cuadro de instrumentos son: el oro, el tántalo y el platino; y en el caso del sistema de infoentretenimiento son: el tántalo, el oro, el paladio, el aluminio y el cobre.

Por último, cabe destacar, que la pérdida de capital mineral de hierro contenido en el sistema de infoentretenimiento en el Caso 3, se debe principalmente a la elevada masa de este elemento contenida en la pieza (1.416 g de Fe sobre los 1.624, 77 g de la masa total). Esto es debido a que con el fin de mejorar la reciclabilidad del sistema de infoentretenimiento, una de las subpiezas que más hierro contiene (el controlador, con 542, 29 g de Fe) ha sido dirigida la ruta de procesamiento metalúrgico orientada a la recuperación del cobre en vez de a la del acero.

4.4 Análisis económico de la desensamblabilidad y subdesensamblabilidad

Para hacer un breve análisis económico que compare el valor de los materiales recuperados frente al coste asociado a su recuperación se necesita partir del valor de mercado de los metales. En este trabajo, previamente se ha recopilado información del coste medio de desensamblaje en España (40,67 €/h) (*LAUSAN*, 2023) y del precio de cotización de cada uno de los metales. Para ello, en la Tabla 21, se muestran las fuentes de donde se ha obtenido dicho precio:

Tabla 21. Precio de cotización de cada uno de los metales contenidos en el cuadro de instrumentos (columna izquierda) y en el sistema de infoentretenimiento (columna derecha) – SEAT León modelo II

| Metal/es | Fuente | Metal/es | Fuente | Metal/es | Fuente |
|--|---------------------------|-------------|----------------------------|----------|--------------------------------|
| Al, Ag, Au, Co, Cu, Dy, Fe, Ga, In, Li, Mg, Mn, Mo, Nd, Ni, Sn, Pb, Pd, Pt, Ti, V y Zn | (TRADING ECONOMICS, 2023) | Ba | (Arad Branding, 2023) | Sr | (BUNTING, 2023) |
| | | Bi, Si y Zr | (INDEXBOX, 2023) | Ta | (FIRERING, 2023) |
| As | (ISE, 2023) | K | (YCHARTS, 2023) | V | (Vanadium Price, 2023) |
| B y Ca | (Business Analytiq, 2023) | Ru | (Daily Metal Prices, 2023) | W | (Group 6 Metals Limited, 2023) |

Hay que tener en cuenta que los precios de los metales son muy volátiles. Los precios de estos materiales, al igual que los precios de cualquier producto, están determinados principalmente por la oferta y la demanda, aunque también influyen otros factores tales como situaciones de inestabilidad geopolítica, coste de los recursos energéticos necesarios para su extracción y procesado, así como factores subjetivos tales como las expectativas de futura demanda o dependencia. A modo de ejemplo, se pueden analizar los siguientes casos.

El oro es un metal precioso cuyo valor en los últimos 10 años ha variado marcando mínimos de 35 USD/g hasta máximos de 65 USD/g siendo siempre considerado un metal “refugio” en el cual la situación económica y el valor de las monedas influye mucho en su cotización.

Otro ejemplo es caso del cobalto, cuya demanda se reactivó por la dependencia de los sistemas de almacenamiento de iones de litio (NMC) y las altas expectativas de futura demanda dada que provocara la movilidad eléctrica. En el año 2017 su precio osciló desde los 30.000 USD/t hasta los 85.000 USD/t.

Finalmente destaca por su cercanía el caso del níquel, cuya cotización tuvo que suspenderse el pasado 8 de marzo ya que en tan solo una jornada su precio subió un 90 % como consecuencia del ataque de Rusia sobre Ucrania, ya que Rusia produce el 17 % de la demanda de níquel y dicho conflicto influye en la cadena de suministro.

4.4.1 Cuadro de instrumentos SEAT León II

El precio de mercado que presentan los metales del cuadro de instrumentos del SEAT León modelo II recuperados en el reciclaje para los tres casos de estudio se muestra en la Figura 19. Para hallar dicho precio en las dos piezas objeto de estudio, previamente, se ha calculado el coste de la mano de obra en base a los minutos de desensamblaje y el coste hora para cada uno de los casos (Ec. 4)

$$P = Cmh \cdot t \quad \text{Ec. 4}$$

Donde P es el valor económico adicional máximo (en euros) que se podría obtener por la recuperación adicional de determinados metales que se pierden si se fragmenta el coche, Cmh es el coste de mano de obra comentado anteriormente (40,67 €/h, aunque este valor puede variar) y t es el tiempo de desensamblaje de la pieza, medido en horas. En los casos 2 y 3 del cuadro de instrumentos, dichos tiempos son 0,15 h y 0,23 h respectivamente. Para el sistema de infoentretenimiento, los tiempos de desensamblaje son 0,17 h (Caso 2) y 0,33 h (Caso 3). Cabe destacar, que el tiempo de desensamblaje de ambas piezas en el Caso 1 es nulo.

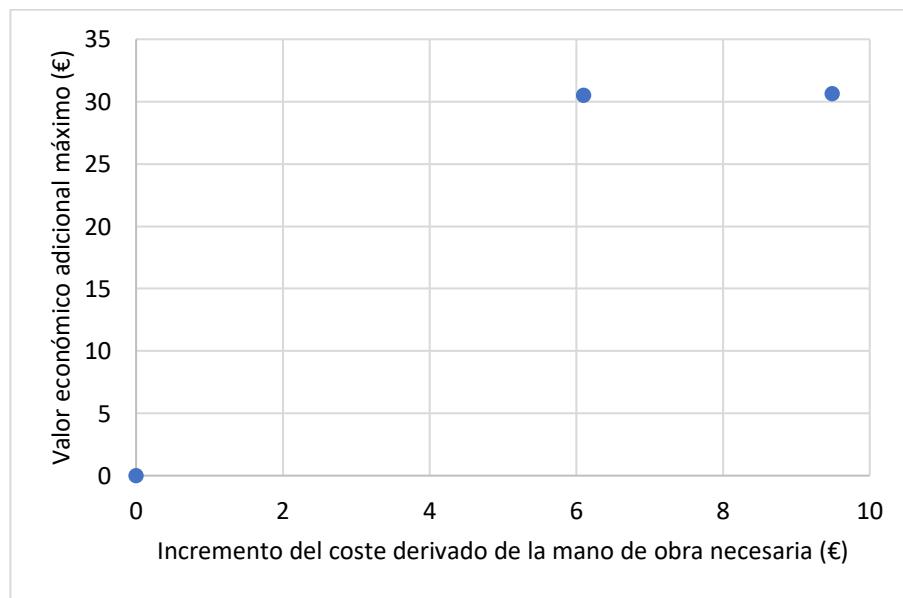


Figura 19. Precio de mercado de los metales del cuadro de instrumentos– SEAT León modelo II para los tres casos de estudio

4.4.2 Sistema de infoentretenimiento SEAT León II

El precio de mercado que presentan los metales del sistema de infoentretenimiento SEAT León modelo II recuperados en el reciclaje para los tres casos de estudio se muestra en la Figura 20.

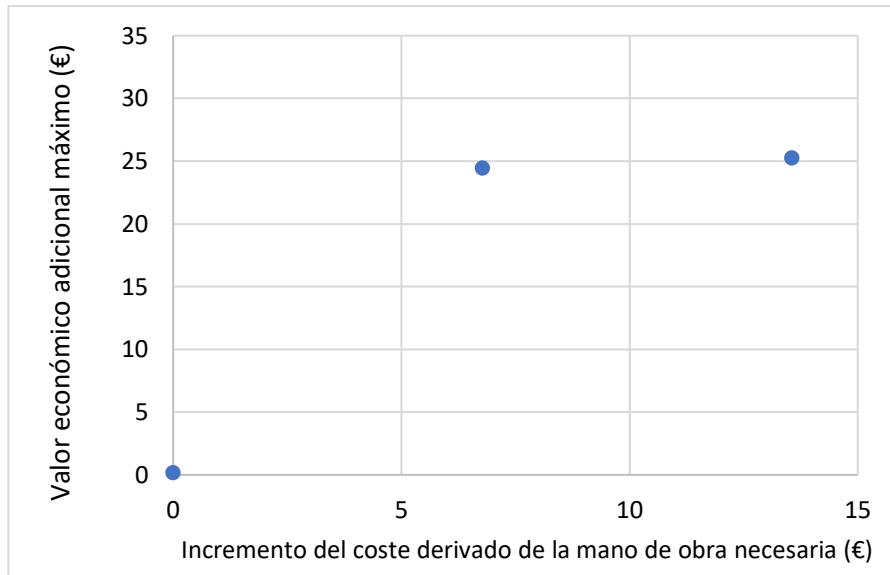


Figura 20. Precio de mercado de los metales del sistema de infoentretenimiento—SEAT León modelo II para los tres casos de estudio

Una vez realizado el análisis económico de desamblabilidad y subdesensambabilidad de las piezas de estudio, se ha observado que el valor de mercado de los metales es notablemente superior al coste de mano de obra en ambas piezas y, por tanto, se podría llegar a obtener beneficio económico, siempre y cuando los costes de transporte, refinado y tasas no fueran superiores a 24,47 € en el Caso 2, ni a 25,26 € en el Caso 3 para el sistema de infoentretenimiento. Para el caso del cuadro de instrumentos, los costes comentados no pueden superar los 30,5 € en el Caso 2, ni los 30,60 € en el Caso 3, de manera que, para su completa evaluación habría que llevar a cabo un análisis económico más detallado. Los valores económicos adicionales máximos son mayores en el caso del cuadro de instrumentos del SEAT León generación II dado a que el valor de los materiales es mayor que en la otra pieza. Esto se debe principalmente, a que en el cuadro de instrumentos hay más cantidad de oro (0,56 g frente a 0,37 g). Por otro lado, el coste de mano de obra es menor en el cuadro de instrumentos que en el caso del sistema de infoentretenimiento del SEAT León generación II, debido a que ésta última es una pieza más compleja y, por tanto, cuesta más tiempo su desensamblaje y/o subdesensamblaje.

Comparando los tres escenarios diferentes (Caso 1, Caso 2 y Caso 3) en ambas piezas, se puede concluir que el valor económico de los metales aumenta si la pieza es desmontada del coche y llevada al proceso metalúrgico de la “ruta del cobre” (Caso 2) en vez de ser fragmentada (Caso 1) o desensamblada (Caso 3).

5. Conclusiones

Las principales conclusiones obtenidas durante la realización de este trabajo se presentan a continuación:

Según los resultados obtenidos en el análisis de las dos piezas objeto de estudio, se puede destacar que la recuperación de capital mineral en el caso del cuadro de instrumentos pasa de ser prácticamente inexistente a un 59 % solamente con ser desmontado y dirigido a una ruta de reciclaje metalúrgico orientada a la recuperación de cobre. En el caso del subdesensamblaje, sólo ha resultado eficaz para el sistema de infoentretenimiento, aunque la mejora ha sido de sólo un 2 % respecto al escenario anterior. Este hecho demuestra que el subdesensamblaje para la aplicación de procesos metalúrgicos adicionales solamente es efectivo en componentes con un alto porcentaje férrico.

En ambas piezas y a pesar de aplicar los casos 2 y 3, la pérdida de capital mineral se debe principalmente, a que los procesos metalúrgicos aplicados son incompatibles con la recuperación del tantalio, un metal cuya producción procede de la extracción y refinado del coltan. El tantalio a pesar de no tener un alto coste de procesado (exergía incorporada de 3.083 kJ/kg) es el metal cuyo coste exergético de reposición es más elevado (482.828 kJ/kg) si obviamos el caso del oro y de los metales del grupo del platino, motivo por el cual su nula reciclabilidad afecta a la pérdida de capital mineral.

Además, la composición de los datos empleados no permite identificar qué subcomponentes contienen tantalio. Este inconveniente implica que no solamente no es reciclado por estos procesos, sino que los subcomponentes que lo emplean tampoco pueden ser desmontados del resto del conjunto para su recuperación.

Por otro lado, es también destacable que, a pesar de que los procesos de desmontaje y subdesensamblaje son manuales, el incremento de valor de los metales recuperados aplicando estos procesos puede ser hasta cinco veces superior al coste de la mano de obra.

En el caso del cuadro de instrumentos–SEAT León generación II, se observa que, si se aplican los escenarios contemplados en el Caso 2 y 3 en lugar del Caso 1, la pérdida de capital mineral referida al oro se ve reducida considerablemente, de aproximadamente un 53 % a un 6%. Esto ha sido posible gracias a la compatibilidad del proceso metalúrgico definido como “ruta del cobre” con este metal, de manera que el oro se pueda recuperar casi en su totalidad. Cabe destacar que la recuperación de este metal es muy importante, puesto que es el que mayor valor de Rareza Termodinámica presenta en la pieza (365.844,74 kJ frente a los 247.903,00 kJ del tantalio).

Análogamente al caso del cuadro de instrumentos–SEAT León generación II, en lo que respecta al sistema de infoentretenimiento–SEAT León generación II, se observa que, si se aplican los escenarios contemplados en el Caso 2 y 3 en lugar del Caso 1, la pérdida de capital mineral referida al oro se ve reducida considerablemente, de aproximadamente un 30 % a un 3%. Cabe destacar que la recuperación de este metal es muy importante por lo comentado en el caso del cuadro de instrumentos, aunque en esta pieza, el elemento que presenta mayor valor de Rareza Termodinámica es el tantalio (332.891,59 kJ frente a los 241.151,99 kJ del oro).

Atendiendo a los valores de Rareza Termodinámica del sistema de infoentretenimiento–SEAT León generación II, se observa que el valor de este parámetro es notablemente mayor si la subpieza “controlador” se incluye en la fracción no férrica (581.173,79 kJ) en vez de en la fracción férrica (285.909,65 kJ), es por ello, que la reciclabilidad de esta pieza se ha calculado teniendo en cuenta que la subpieza pertenece a la fracción no férrica. En consecuencia, en esta pieza, se puede observar que, tras el tántalo, el metal que más pérdida de capital mineral presenta es el hierro debido a la incompatibilidad de los procesos metalúrgicos aplicados con la recuperación de este elemento.

Derivado de los resultados, se puede concluir que los actuales procesos de reciclado aplicados en la industria del automóvil son ineficaces para recuperar metales críticos, que están siendo subciclados y por tanto perdidos. Sin embargo, con la aplicación de procesos metalúrgicos en piezas con una alta composición no-férrica, se puede mejorar la reciclabilidad en ciclo cerrado de gran parte de estos metales. Por tanto, la legislación debería proponer objetivos específicos de reciclado para los metales críticos utilizados por los fabricantes de automóviles. Estos objetivos fomentarán un mejor diseño ecológico orientado al desmontaje y subdesensamblaje de las piezas valiosas de los automóviles.

Finalmente es preciso indicar que el presente trabajo tiene las siguientes puntos de mejora, los cuales deberían de ser abordados en próximas fases de investigación:

- En un análisis económico en detalle, habría que considerar los costes asociados a la operación de los procesos de reciclaje descritos, así como los derivados de la logística inversa de las piezas/subpiezas hasta los centros de reciclaje.
- La reciclabilidad calculada se basa en unos resultados procedentes de una herramienta de simulación, la cual, y aunque es de reconocido prestigio, tendrá alguna desviación con relación al resultado que se obtendría de aplicar en la realidad los procesos definidos.
- Este trabajo aplica el método sobre dos componentes (cuadro de instrumentos y sistema de infoentretenimiento) pero no analiza otros de gran interés por los materiales que emplea tales como los espejos retrovisores, sensores, centralitas electrónicas o sistemas LED. Sería de gran importancia aplicar los procesos descritos sobre estos componentes para conocer sus resultados.

6. Futuras líneas de investigación

- 1) Analizar un mayor número de piezas de vehículos como: espejos retrovisores, sensores, centralitas electrónicas, iluminación LED, entre otras. Dichas piezas contienen materias primas críticas, las cuales son de vital importancia para definir propuestas de ecodiseño, y poder así, evaluar la eficiencia en el uso de los recursos materiales.
- 2) Investigar nuevas rutas de procesado metalúrgico específicas para la recuperación de metales valiosos como el tantalio, algunos metales nobles como el oro, la plata y los PGMs, así como los metales pertenecientes a las tierras raras o lo que es lo mismo, el grupo de elementos del grupo de los lantánidos: Ce, Dy, Eu, Er, Gd, Ho, La, Lu, Nd, Pm, Pr, Sm, Sc, Tb, Tm, Y e Yb. Dichos procesos metalúrgicos complementarán a los actuales (proceso metalúrgico diseñado para la recuperación de cobre y otros metales no férricos y proceso metalúrgico diseñado para la recuperación de acero), de manera que mejoren la eficiencia en el reciclado de los metales críticos contenidos en las piezas evaluadas.
- 3) Desarrollar métodos de optimización y reducción de costes asociados a las operaciones de los procesos de reciclaje metalúrgico, así como los derivados de la logística inversa de las diferentes piezas/ subpiezas hasta los centros de reciclaje.
- 4) Estudiar cómo los procesos metalúrgicos descritos en el proyecto pueden ayudar a mejorar la reciclabilidad y el diseño de los vehículos eléctricos. En particular de las baterías, motores eléctricos y *powertrain* (sistema de propulsión), de manera que, los materiales que constituyan dichas piezas se puedan volver a incorporar a la cadena de valor estableciendo un modelo circular.
- 5) Evaluar las posibilidades que la automatización y la industria 4.0 o “fábrica del futuro”, supone un nuevo escenario productivo a través de acciones innovadoras en diferentes ámbitos de la cadena de valor, resultando en una mayor eficiencia de los procesos de desensamblabilidad y subdesensamblabilidad de componentes mediante la automatización y sensorización de máquinas inteligentes y de dispositivos interconectados.
- 6) Analizar el rol de los plásticos en la reciclabilidad del vehículo. Un vehículo como el descrito tiene un 18 % de compuestos orgánicos y más de 20 tipos diferentes de plásticos, que terminan principalmente en vertederos, de tal manera que es de vital importancia investigar los métodos apropiados para reciclar de forma correcta estos materiales.

7. Bibliografía

Achzet, B., & Helbig, C. (2013). How to evaluate raw material supply risks—an overview. *Resources Policy*, 38(4), 435–447. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.06.003>

Alicia Valero, Abel Ortego, & Guiomar Calvo. (2017). *Análisis exergético*. 1–58.

Alonso, E., Gregory, J., Field, F., & Kirchain, R. (2007). Material availability and the supply chain: Risks, effects, and responses. *Environmental Science and Technology*, 41(19), 6649–6656. <https://doi.org/10.1021/es070159c>

Ana Xenia Valencia Chávez. (2006). *LOGÍSTICA INVERSA: Centros Autorizados de Tratamiento para Vehículos al final de su vida útil (VFU)*. Instituto tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.

Antoinette van Schaik, & Markus A. Reuter. (2022). *D3.3: Recyclability analysis*.

Antoinette Van Schaik, & Markus Reuter. (2014). Material-Centric (Aluminum and Copper) and Product-Centric (Cars, WEEE, TV, Lamps, Batteries, Catalyst) Recycling and DfR Rules. In *Handbook of Recycling* (pp. 307–378). Elsevier.

A.Ortego, A.Valero, R.Magdalena, M. Liendo, E. Alquezar, A. Diez, & M. Iglesias. (2022). *D3.2: Report on disassemblability analysis*.

Arad Branding. (2023, January 20). <https://aradbranding.com/en/barite-powder-price-per-ton-2022/#price-of-barite-per-ton>

Blankemeyer, S., Wiens, D., Wiese, T., Raatz, A., & Kara, S. (2021). Investigation of the potential for an automated disassembly process of BEV batteries. *Procedia CIRP*, 98, 559–564. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.151>

BUNTING. (2023, January 20). <https://www.bunting-berkhamsted.com/ferrite-magnet-price-concerns/>

Business Analytiq. (2023, January 20). <https://businessanalytiq.com/>

Chen, W. H., Foo, G., Kara, S., & Pagnucco, M. (2021). Automated generation and execution of disassembly actions. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 68. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102056>

Cochehoy.com. (2023, January 17).

Cox, D.P; Singer, D. A. (1992). *Grade and tonnage model of distal disseminated Ag- Au, in Bliss, J.D., ed.*

Daily Metal Prices. (2023, January 20). <https://www.dailymetalprice.com/metalprices.php>
Ellen MacArthur Foundation. (2022, May 23). *Europe's first circular economy factory for vehicles: Renault*.

EUROFRANCE. (2023, January 19). <https://eurofrance.es/velocmetro-instrumentos-y-relojes-seat-leon-ii-1p0920823g-110-080-280-027-1468.html>

European Commission. (2014). *Report on critical raw materials for the EU. Report of the Ad hoc working group on defining critical raw materials.*

European Commission. (2017). Study on the review of the list of critical raw materials. In *European Comission* (Issue June). <https://doi.org/10.2873/876644>

Faber, M., & Proops, J. (1991). Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability National Accounting, Time and the Environment. In C. University (Ed.), *Ecological Economics: The Science and Management of Sustainability National Accounting, Time and the Environment*.

FIRERING. (2023, January 20). <https://www.fireringplc.com/page.php?pID=228&page=Prices>

Gerlitz, E., Greifenstein, M., Hofmann, J., & Fleischer, J. (2020). Analysis of the Variety of Lithium-Ion Battery Modules and the Challenges for an-Agile Automated Disassembly System. *Procedia CIRP*, 96, 175–180. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.071>

GLENCORE TECHNOLOGY. (2023, January 16). <https://www.glencoretechnology.com/es/technologies/isasmelt/>

Grigor'ev. (2000). The average mineral composition of the upper continental crust. *Ural Geology*, 3, 3–21.

Group 6 Metals Limited. (2023, January 20). <https://g6m.com.au/tungsten/the-market/>

Hjorth, S., & Chrysostomou, D. (2022). Human–robot collaboration in industrial environments: A literature review on non-destructive disassembly. In *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (Vol. 73). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102208>

Huang, J., Pham, D. T., Li, R., Qu, M., Wang, Y., Kerin, M., Su, S., Ji, C., Mahomed, O., Khalil, R., Stockton, D., Xu, W., Liu, Q., & Zhou, Z. (2021). An experimental human-robot collaborative disassembly cell. *Computers and Industrial Engineering*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107189>

Iglesias-Émbil, M., Valero, A., Ortego, A., Villacampa, M., Vilaró, J., & Villalba, G. (2020). Raw material use in a battery electric car – a thermodynamic rarity assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104820>

INDEXBOX. (2023, January 20). <https://www.indexbox.io/>

ISE. (2023, January 20). <https://en.institut-seltene-erden.de/current-prices-of-strategic-metals/>

Jaenichen, F.-M., Liepold, C. J., Ismail, A., Schiffer, M., & Ehm, H. (2022). Disruption evaluation in end-to-end semiconductor supply chains via interpretable machine learning. *IFAC-PapersOn Line*, 55(10), 661–666. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.479>

LAUSAN. (2023, January 10). <https://www.lausan.es/noticias/el-precio-medio-de-la-mano-de-obra-de-taller-es-de-4067-euros>

Liener. (2021). GM aims to tackle chip shortage with new designs made in North America. *Reuters*.

Mangold, S., Steiner, C., Friedmann, M., & Fleischer, J. (2022). Vision-Based Screw Head Detection for Automated Disassembly for Remanufacturing. *Procedia CIRP*, 105, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.001>

Matusewicz, R., & Reuter, M. A. (2008). *THE ROLE OF TOP SUBMERGED LANCE (TSL) TECHNOLOGY IN RECYCLING AND CLOSING THE MATERIAL LOOP*. www.ausmelt.com.au

Metalcess. (2023, January 16). http://www.metalcess.com/equipment/pyrometallurgy/Top_Blown_Rotary_Converter_TBRC_19_show.html

Mohammad, W., Elomri, A., & Kerbache, L. (2022a). The Global Semiconductor Chip Shortage: Causes, Implications, and Potential Remedies. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 476–483. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.439>

Mohammad, W., Elomri, A., & Kerbache, L. (2022b). The Global Semiconductor Chip Shortage: Causes, Implications, and Potential Remedies. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 476–483. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.439>

Ohno, H., Matsubae, K., Nakajima, K., Kondo, Y., Nakamura, S., & Nagasaka, T. (2015). Toward the efficient recycling of alloying elements from end of life vehicle steel scrap. *Resources, Conservation and Recycling*, 100, 11–20.

Ortego, A. (2019). *Thermodynamic assessment of raw material use in passenger vehicles*. Universidad de Zaragoza.

Ortego, A., Calvo, G., Valero, A., Iglesias-Émbil, M., Valero, A., & Villacampa, M. (2020). Assessment of strategic raw materials in the automobile sector. *Resources, Conservation and Recycling*, 161. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104968>

Ortego, A., Valero, A., Valero, A., & Iglesias, M. (2017). *Downcycling in automobile recycling process. A Thermodynamic assessment*.

Ortego, A., Valero, A., Valero, A., & Iglesias, M. (2018). Toward Material Efficient Vehicles: Ecodesign Recommendations Based on Metal Sustainability Assessments. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, 11(3), 213–228. <https://doi.org/10.4271/05-11-03-0021>

Ortego, A., Valero, A., Valero, A., & Restrepo, E. (2018). Vehicles and critical raw materials. A sustainability assessment using thermodynamic rarity. *Industrial Ecology*, 22(5). <https://doi.org/10.1111/jiec.12737>

Pablo Gallén. (2022, August 5). *Taiwán: la gran fábrica de semiconductores del mundo con una cuota del 63%*. ESTRATEGIAS de INVERSIÓN. <https://www.estrategiasdeinversion.com/analisis/bolsa-y-mercados/informes/taiwan-la-gran-fabrica-de-semiconductores-del-n-547717>

Panarello, D., & Gatto, A. (2023). Decarbonising Europe – EU citizens' perception of renewable energy transition amidst the European Green Deal. *Energy Policy*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2022.113272>

Ponis, S. T., & Ntalla, A. (2016). Crisis Management Practices and Approaches: Insights from Major Supply Chain Crises. *Procedia Economics and Finance*, 39, 668–673. [https://doi.org/10.1016/s2212-5671\(16\)30287-8](https://doi.org/10.1016/s2212-5671(16)30287-8)

Poschmann, H., Brüggemann, H., & Goldmann, D. (2021). Fostering End-of-Life Utilization by Information-driven Robotic Disassembly. *Procedia CIRP*, 98, 282–287. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.104>

Prioli, J. P. J., Alrufaifi, H. M., & Rickli, J. L. (2022). Disassembly assessment from CAD-based collision evaluation for sequence planning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102416>

Prioli, J. P. J., & Rickli, J. L. (2020). Collaborative robot based architecture to train flexible automated disassembly systems for critical materials. *Procedia Manufacturing*, 51, 46–53. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.10.008>

Ramani, V., Ghosh, D., & Sodhi, M. M. S. (2022). Understanding systemic disruption from the Covid-19-induced semiconductor shortage for the auto industry. *Omega (United Kingdom)*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.omega.2022.102720>

Rentzelas, A., & Triviza, N. L. (2022). Enhancing circularity in the car sharing industry: Reverse supply chain network design optimisation for reusable car frames. *Sustainable Production and Consumption*, 32, 863–879. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.06.009>

Reuter, M., & van Schaik, A. (2016). Process Metallurgy an Enabler of Resource Efficiency: Linking Product Design to Metallurgy in Product Centric Recycling. In P. J. Mackey, E. J. Grimsey, R. T. Jones, & G. A. Brooks (Eds.), *Celebrating the Megascle* (pp. 93–104). Springer International Publishing.

Rudnick, R. L., & Gao, S. (2003). 3.01 – Composition of the Continental Crust. In *Treatise on Geochemistry* (pp. 1–64). <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03016-4>

Schaik, A., & van Reuter, M. A. (2013). *Product Centric Simulation Based Design for Recycling (DfR), 10 Fundamental Rules & General Guidelines for Design for Recycling &Resource Efficiency*. <https://www.nvmp.nl/uploads/pdf/nieuws/2013/2013%2010%2011%20Summary%20MA-RAS%20def3.pdf>

SEAT S.A. (2021). *Los socios de Future: Fast Forward registran el proyecto al PERTE VEC con la ambición de convertir a España en un hub del vehículo eléctrico en Europa*. <https://www.seat-mediacenter.es/smcc/seat-sa/seat-sa-news/company/2022/Los-socios-de-Future-Fast-Forward-registran-el-proyecto-al-PERTE-VEC-con-la-ambicion-de-convertir-a-Espana-en-un-hub-del-vehiculo-electrico-en-Europa.html>

TRADING ECONOMICS. (2023, January 20). <https://tradingeconomics.com/>

Valero, A. (2018). *Thanatia: El destino de los recursos minerales del planeta Tierra*.

Valero, A., & Valero, A. (2014). *Thanatia, the destiny of the Earth's mineral resources*.

Valero, A., & Valero, A. (2015). *Thanatia: the destiny of the Earth's mineral resources: a cradle-to-cradle thermodynamic assessment*. World Scientific.

Valero, A., & Valero, A. (2021). *Thanatia. Los límites minerales del planeta* (ICARIA S.A, Ed.; 1st ed., Vol. 1). Icaria editorial S.A.

van Schaik, A., & Reuter, M. A. (2007). The use of fuzzy rule models to link automotive design to recycling rate calculation. *Minerals Engineering*, 20(9), 875–890. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.03.016>

van Schaik, A., & Reuter, M. A. (2012). 9 – Shredding, sorting and recovery of metals from WEEE: linking design to resource efficiency. In *Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Handbook* (pp. 163–211). <https://doi.org/10.1533/9780857096333.2.163>

Vanadium Price. (2023, January 20). <https://www.vanadiumprice.com/>

Wells, P. (2013). Sustainable business models and the automotive industry: A commentary.

IIMB Management Review, 25(4), 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.iimb.2013.07.001>

YCHARTS. (2023, January 20). https://ycharts.com/indicators/potassium_chloride_muriate_of_potash_spot_price

8. Anexos

Anexo A. Cálculo Rareza Termodinámica

Anexo A. 1 Rareza termodinámica de los metales

Tabla a. 1. Rareza Termodinámica (kJ/g) de los metales contenidos en el cuadro de instrumentos y en el sistema de infoentretenimiento del SEAT León generación II (Valero et al., 2017)

| Metal | Exergía incorporada | Unidades | Coste de sustitución de Exergía | Unidades | Rareza Termodinámica | Unidades |
|-------|---------------------|----------|---------------------------------|----------|----------------------|----------|
| Ag | 1.566 | kJ/g | 7.371 | kJ/g | 8.937 | kJ/g |
| Al | 34 | kJ/g | 627 | kJ/g | 661 | kJ/g |
| As | 28 | kJ/g | 400 | kJ/g | 428 | kJ/g |
| Au | 108.626 | kJ/g | 546.057 | kJ/g | 654.683 | kJ/g |
| Ba | 1 | kJ/g | 38 | kJ/g | 39 | kJ/g |
| Be | 457 | kJ/g | 253 | kJ/g | 710 | kJ/g |
| Bi | 56 | kJ/g | 489 | kJ/g | 546 | kJ/g |
| Cd | 542 | kJ/g | 5.898 | kJ/g | 6.440 | kJ/g |
| Co | 138 | kJ/g | 10.872 | kJ/g | 11.010 | kJ/g |
| Cr | 36 | kJ/g | 5 | kJ/g | 41 | kJ/g |
| Cu | 57 | kJ/g | 292 | kJ/g | 348 | kJ/g |
| Dy | 384 | kJ/g | 348 | kJ/g | 732 | kJ/g |
| Fe | 14 | kJ/g | 18 | kJ/g | 32 | kJ/g |
| Ga | 610.000 | kJ/g | 144.828 | kJ/g | 754.828 | kJ/g |
| In | 3.320 | kJ/g | 360.598 | kJ/g | 363.918 | kJ/g |
| Li | 432 | kJ/g | 546 | kJ/g | 978 | kJ/g |
| Mg | - | kJ/g | 146 | kJ/g | 146 | kJ/g |
| Mn | 57 | kJ/g | 16 | kJ/g | 73 | kJ/g |
| Mo | 148 | kJ/g | 908 | kJ/g | 1.056 | kJ/g |
| Nb | 360 | kJ/g | 4.422 | kJ/g | 4.782 | kJ/g |
| Nd | 592 | kJ/g | 78 | kJ/g | 670 | kJ/g |
| Ni | 234 | kJ/g | 524 | kJ/g | 758 | kJ/g |
| Pb | 4 | kJ/g | 37 | kJ/g | 41 | kJ/g |
| Pd | - | kJ/g | 2.870.013 | kJ/g | 2.870.013 | kJ/g |
| Pt | - | kJ/g | 2.870.013 | kJ/g | 2.870.013 | kJ/g |
| Ru | - | kJ/g | 2.870.013 | kJ/g | 2.870.013 | kJ/g |
| Sb | 13 | kJ/g | 474 | kJ/g | 488 | kJ/g |
| Sn | 27 | kJ/g | 426 | kJ/g | 453 | kJ/g |
| Ta | 3.083 | kJ/g | 482.828 | kJ/g | 485.911 | kJ/g |
| Ti | 196 | kJ/g | 7 | kJ/g | 203 | kJ/g |
| V | 517 | kJ/g | 1.055 | kJ/g | 1.572 | kJ/g |
| W | 594 | kJ/g | 7.429 | kJ/g | 8.023 | kJ/g |
| Zn | 42 | kJ/g | 155 | kJ/g | 197 | kJ/g |
| Zr | 1.372 | kJ/g | 654 | kJ/g | 2.026 | kJ/g |

Anexo A.2 Contribución metales medida en Rareza termodinámica

Anexo A.2. 1 Cuadro de instrumentos SEAT León II

Tabla a.2.1. 1. Rareza Termodinámica motores

| Motor paso a paso | | |
|-------------------|-----------------------|-----------|
| Metal | Rareza Termo-dinámica | Unida-des |
| Ag | 0,94 | kJ |
| Al | 0,00 | kJ |
| As | 0,00 | kJ |
| Au | 0,00 | kJ |
| B | 0,00 | kJ |
| Ba | 0,00 | kJ |
| Be | 0,00 | kJ |
| Bi | 0,00 | kJ |
| Ca | 0,00 | kJ |
| Cd | 0,00 | kJ |
| Co | 0,00 | kJ |
| Cr | 4,11 | kJ |
| Cu | 497,61 | kJ |
| Dy | 18,10 | kJ |
| Fe | 60,04 | kJ |
| In | 0,00 | kJ |
| Mg | 0,00 | kJ |
| Mn | 0,94 | kJ |
| Mo | 3,94 | kJ |
| Nb | 0,00 | kJ |
| Nd | 158,45 | kJ |
| Ni | 28,34 | kJ |
| Pb | 0,03 | kJ |
| Pd | 0,00 | kJ |
| Pt | 0,00 | kJ |
| Ru | 0,00 | kJ |
| Sb | 0,00 | kJ |
| Si | 0,00 | kJ |
| Sn | 4,63 | kJ |
| Sr | 0,00 | kJ |
| Ta | 0,00 | kJ |
| Ti | 119,54 | kJ |
| V | 0,00 | kJ |
| W | 0,00 | kJ |
| Zn | 30,34 | kJ |

Tabla a.2.1. 2. Rareza Termodinámica tornillos

| Tornillos de cabeza ovalada | | |
|-----------------------------|-----------------------|----------|
| Metal | Rareza Termo-dinámica | Unidades |
| Ag | 0,00 | kJ |
| Al | 0,19 | kJ |
| As | 0,00 | kJ |
| Au | 0,00 | kJ |
| B | 0,00 | kJ |
| Ba | 0,00 | kJ |
| Be | 0,00 | kJ |
| Bi | 0,00 | kJ |
| Ca | 0,00 | kJ |
| Cd | 0,00 | kJ |
| Co | 0,01 | kJ |
| Cr | 0,24 | kJ |
| Cu | 0,37 | kJ |
| Dy | 0,00 | kJ |
| Fe | 21,58 | kJ |
| In | 0,00 | kJ |
| Mg | 0,00 | kJ |
| Mn | 0,33 | kJ |
| Mo | 2,96 | kJ |
| Nb | 0,00 | kJ |
| Nd | 0,00 | kJ |
| Ni | 4,51 | kJ |
| Pb | 0,00 | kJ |
| Pd | 0,00 | kJ |
| Pt | 0,00 | kJ |
| Ru | 0,00 | kJ |
| Sb | 0,00 | kJ |
| Si | 0,00 | kJ |
| Sn | 0,03 | kJ |
| Sr | 0,00 | kJ |
| Ta | 0,00 | kJ |
| Ti | 0,04 | kJ |
| V | 1,93 | kJ |
| W | 0,00 | kJ |
| Zn | 0,00 | kJ |

Tabla a.2.1. 3. Rareza Termodinámica pantalla

| Pantalla adicional | | |
|--------------------|----------------------|----------|
| Metal | Rareza Termodinámica | Unidades |
| Ag | 4,60 | kJ |
| Al | 914,30 | kJ |
| As | 0,00 | kJ |
| Au | 1430,48 | kJ |
| B | 0,00 | kJ |
| Ba | 1,06 | kJ |
| Be | 0,00 | kJ |
| Bi | 0,00 | kJ |
| Ca | 0,00 | kJ |
| Cd | 0,00 | kJ |
| Co | 0,00 | kJ |
| Cr | 0,00 | kJ |
| Cu | 41,62 | kJ |
| Dy | 0,00 | kJ |
| Fe | 0,02 | kJ |
| In | 3114,20 | kJ |
| Mg | 39,78 | kJ |
| Mn | 0,00 | kJ |
| Mo | 13,05 | kJ |
| Nb | 0,00 | kJ |
| Nd | 0,00 | kJ |
| Ni | 3,16 | kJ |
| Pb | 0,00 | kJ |
| Pd | 1,43 | kJ |
| Pt | 0,00 | kJ |
| Ru | 5,67 | kJ |
| Sb | 0,00 | kJ |
| Si | 0,00 | kJ |
| Sn | 0,29 | kJ |
| Sr | 0,00 | kJ |
| Ta | 0,00 | kJ |
| Ti | 1,84 | kJ |
| V | 0,00 | kJ |
| W | 0,72 | kJ |
| Zn | 0,25 | kJ |

Tabla a.2.1. 4. Rareza Termodinámica altavoz

| Altavoz | | |
|---------|----------------------|-----------|
| Metal | Rareza Termodinámica | Unida-des |
| Ag | 8,11 | kJ |
| Al | 4,40 | kJ |
| As | 0,00 | kJ |
| Au | 4,91 | kJ |
| B | 0,00 | kJ |
| Ba | 0,00 | kJ |
| Be | 0,00 | kJ |
| Bi | 0,01 | kJ |
| Ca | 0,00 | kJ |
| Cd | 0,00 | kJ |
| Co | 0,00 | kJ |
| Cr | 0,00 | kJ |
| Cu | 78,10 | kJ |
| Dy | 23,37 | kJ |
| Fe | 104,26 | kJ |
| In | 5,46 | kJ |
| Mg | 0,00 | kJ |
| Mn | 0,38 | kJ |
| Mo | 0,00 | kJ |
| Nb | 31,80 | kJ |
| Nd | 401,00 | kJ |
| Ni | 0,10 | kJ |
| Pb | 0,00 | kJ |
| Pd | 0,00 | kJ |
| Pt | 0,00 | kJ |
| Ru | 0,00 | kJ |
| Sb | 0,01 | kJ |
| Si | 0,00 | kJ |
| Sn | 15,43 | kJ |
| Sr | 0,00 | kJ |
| Ta | 0,00 | kJ |
| Ti | 0,00 | kJ |
| V | 0,00 | kJ |
| W | 0,00 | kJ |
| Zn | 0,03 | kJ |

Tabla a.2.1. 5. Rareza Termodinámica circuito impreso

| Circuito impreso adicional | | |
|----------------------------|-----------------------|----------|
| Metal | Rareza Termo-dinámica | Unidades |
| Ag | 7221,72 | kJ |
| Al | 8191,60 | kJ |
| As | 0,00 | kJ |
| Au | 364409,34 | kJ |
| B | 0,00 | kJ |
| Ba | 51,32 | kJ |
| Be | 0,00 | kJ |
| Bi | 1,56 | kJ |
| Ca | 0,00 | kJ |
| Cd | 0,00 | kJ |
| Co | 0,00 | kJ |
| Cr | 0,00 | kJ |
| Cu | 5921,35 | kJ |
| Dy | 0,00 | kJ |
| Fe | 39,03 | kJ |
| In | 1039,90 | kJ |
| Mg | 0,00 | kJ |
| Mn | 0,00 | kJ |
| Mo | 0,00 | kJ |
| Nb | 0,00 | kJ |
| Nd | 0,00 | kJ |
| Ni | 246,33 | kJ |
| Pb | 4,92 | kJ |
| Pd | 0,00 | kJ |
| Pt | 42490,79 | kJ |
| Ru | 0,00 | kJ |
| Sb | 1292,96 | kJ |
| Si | 0,00 | kJ |
| Sn | 2491,36 | kJ |
| Sr | 0,00 | kJ |
| Ta | 247903,00 | kJ |
| Ti | 207,99 | kJ |
| V | 0,00 | kJ |
| W | 0,00 | kJ |
| Zn | 10,01 | kJ |

Anexo A.2. 2 Sistema de infoentretenimiento SEAT León II

Tabla a.2.2. 1. Rareza Termodinámica

| Controlador | | |
|-------------|----------------------|----------|
| Metal | Rareza Termodinámica | Unidades |
| Ag | 6175,59 | kJ |
| Al | 1061,11 | kJ |
| As | 0,01 | kJ |
| Au | 206166,46 | kJ |
| B | 0,00 | kJ |
| Ba | 1,23 | kJ |
| Be | 0,11 | kJ |
| Bi | 0,09 | kJ |
| Ca | 0,00 | kJ |
| Cd | 0,01 | kJ |
| Co | 232,92 | kJ |
| Cr | 55,44 | kJ |
| Cu | 18993,43 | kJ |
| Dy | 7,39 | kJ |
| Fe | 17353,34 | kJ |
| Ga | 7,18 | kJ |
| In | 10,90 | kJ |
| K | 0,00 | kJ |
| Li | 0,04 | kJ |
| Mg | 4,02 | kJ |
| Mn | 96,89 | kJ |
| Mo | 8,00 | kJ |
| Na | 0,00 | kJ |
| Nb | 0,00 | kJ |
| Nd | 85,26 | kJ |
| Ni | 312,28 | kJ |
| Pb | 1,49 | kJ |
| Pd | 4640,51 | kJ |
| Pt | 1093,51 | kJ |
| Ru | 137,34 | kJ |
| Sb | 17,74 | kJ |
| Si | 0,00 | kJ |
| Sn | 275,66 | kJ |
| Sr | 0,00 | kJ |
| Ta | 0,00 | kJ |
| Ti | 84,14 | kJ |
| V | 5,21 | kJ |
| Zn | 401,51 | kJ |
| Zr | 8,79 | kJ |

Tabla a.2.2. 2. Rareza Termodinámica carcasas

| Carcasas | | |
|----------|----------------------|----------|
| Metal | Rareza Termodinámica | Unidades |
| Ag | 0,00 | kJ |
| Al | 3,48 | kJ |
| As | 0,01 | kJ |
| Au | 0,00 | kJ |
| B | 0,00 | kJ |
| Ba | 0,00 | kJ |
| Be | 0,00 | kJ |
| Bi | 0,01 | kJ |
| Ca | 0,00 | kJ |
| Cd | 0,11 | kJ |
| Co | 0,00 | kJ |
| Cr | 2,74 | kJ |
| Cu | 180,04 | kJ |
| Dy | 0,00 | kJ |
| Fe | 26540,13 | kJ |
| Ga | 0,00 | kJ |
| In | 0,00 | kJ |
| K | 0,00 | kJ |
| Li | 0,00 | kJ |
| Mg | 0,00 | kJ |
| Mn | 184,44 | kJ |
| Mo | 33,30 | kJ |
| Na | 0,00 | kJ |
| Nb | 0,00 | kJ |
| Nd | 0,00 | kJ |
| Ni | 50,79 | kJ |
| Pb | 0,01 | kJ |
| Pd | 0,00 | kJ |
| Pt | 0,00 | kJ |
| Ru | 0,00 | kJ |
| Sb | 0,02 | kJ |
| Si | 0,00 | kJ |
| Sn | 144,23 | kJ |
| Sr | 0,00 | kJ |
| Ta | 0,00 | kJ |
| Ti | 0,88 | kJ |
| V | 21,69 | kJ |
| Zn | 625,65 | kJ |
| Zr | 0,00 | kJ |

Tabla a.2.2. 3. Rareza Termodinámica circuito impreso

| Circuito impreso | | |
|------------------|----------------------|----------|
| Metal | Rareza Termodinámica | Unidades |
| Ag | 13,10 | kJ |
| Al | 9187,18 | kJ |
| As | 0,35 | kJ |
| Au | 23192,93 | kJ |
| B | 0,00 | kJ |
| Ba | 15,29 | kJ |
| Be | 0,00 | kJ |
| Bi | 11,73 | kJ |
| Ca | 0,00 | kJ |
| Cd | 0,35 | kJ |
| Co | 2210,24 | kJ |
| Cr | 0,97 | kJ |
| Cu | 5,62 | kJ |
| Dy | 0,00 | kJ |
| Fe | 280,96 | kJ |
| Ga | 0,00 | kJ |
| In | 0,00 | kJ |
| K | 0,00 | kJ |
| Li | 0,00 | kJ |
| Mg | 0,00 | kJ |
| Mn | 5,34 | kJ |
| Mo | 0,00 | kJ |
| Na | 0,00 | kJ |
| Nb | 564,69 | kJ |
| Nd | 19,98 | kJ |
| Ni | 370,28 | kJ |
| Pb | 81,70 | kJ |
| Pd | 101673,65 | kJ |
| Pt | 0,00 | kJ |
| Ru | 3803,32 | kJ |
| Sb | 55,88 | kJ |
| Si | 0,00 | kJ |
| Sn | 1694,61 | kJ |
| Sr | 0,00 | kJ |
| Ta | 229519,72 | kJ |
| Ti | 27,99 | kJ |
| V | 0,00 | kJ |
| Zn | 13,96 | kJ |
| Zr | 0,00 | kJ |

Tabla a.2.2. 4. Rareza Termodinámica disipador de calor

| Dissipador de calor | | |
|---------------------|----------------------|----------|
| Metal | Rareza Termodinámica | Unidades |
| Ag | 0,00 | kJ |
| Al | 28943,67 | kJ |
| As | 0,00 | kJ |
| Au | 0,00 | kJ |
| B | 0,00 | kJ |
| Ba | 0,00 | kJ |
| Be | 0,00 | kJ |
| Bi | 0,00 | kJ |
| Ca | 0,00 | kJ |
| Cd | 0,00 | kJ |
| Co | 0,00 | kJ |
| Cr | 0,00 | kJ |
| Cu | 0,00 | kJ |
| Dy | 0,00 | kJ |
| Fe | 0,00 | kJ |
| Ga | 0,00 | kJ |
| In | 0,00 | kJ |
| K | 0,00 | kJ |
| Li | 0,00 | kJ |
| Mg | 0,00 | kJ |
| Mn | 0,00 | kJ |
| Mo | 0,00 | kJ |
| Na | 0,00 | kJ |
| Nb | 0,00 | kJ |
| Nd | 0,00 | kJ |
| Ni | 0,00 | kJ |
| Pb | 0,00 | kJ |
| Pd | 0,00 | kJ |
| Pt | 0,00 | kJ |
| Ru | 0,00 | kJ |
| Sb | 0,00 | kJ |
| Si | 0,00 | kJ |
| Sn | 0,00 | kJ |
| Sr | 0,00 | kJ |
| Ta | 0,00 | kJ |
| Ti | 0,00 | kJ |
| V | 0,00 | kJ |
| Zn | 8,71 | kJ |
| Zr | 0,00 | kJ |

Tabla a.2.2. 5. Rareza Termodinámica marco pantalla LCD

| Marco de la pantalla LCD | | |
|--------------------------|----------------------|----------|
| Metal | Rareza Termodinámica | Unidades |
| Ag | 0,00 | kJ |
| Al | 0,00 | kJ |
| As | 0,01 | kJ |
| Au | 0,00 | kJ |
| B | 0,00 | kJ |
| Ba | 0,00 | kJ |
| Be | 0,00 | kJ |
| Bi | 0,00 | kJ |
| Ca | 0,00 | kJ |
| Cd | 0,00 | kJ |
| Co | 0,00 | kJ |
| Cr | 0,00 | kJ |
| Cu | 0,01 | kJ |
| Dy | 0,00 | kJ |
| Fe | 804,25 | kJ |
| Ga | 0,00 | kJ |
| In | 0,00 | kJ |
| K | 0,00 | kJ |
| Li | 0,00 | kJ |
| Mg | 0,00 | kJ |
| Mn | 5,53 | kJ |
| Mo | 0,00 | kJ |
| Na | 0,00 | kJ |
| Nb | 0,00 | kJ |
| Nd | 0,00 | kJ |
| Ni | 0,00 | kJ |
| Pb | 0,00 | kJ |
| Pd | 0,00 | kJ |
| Pt | 0,00 | kJ |
| Ru | 0,00 | kJ |
| Sb | 0,01 | kJ |
| Si | 0,00 | kJ |
| Sn | 74,73 | kJ |
| Sr | 0,00 | kJ |
| Ta | 0,00 | kJ |
| Ti | 0,00 | kJ |
| V | 0,00 | kJ |
| Zn | 0,00 | kJ |
| Zr | 0,00 | kJ |

Tabla a.2.2. 6. Rareza Termodinámica panel de control

| Panel de control | | |
|------------------|----------------------|----------|
| Metal | Rareza Termodinámica | Unidades |
| Ag | 826,62 | kJ |
| Al | 4137,75 | kJ |
| As | 0,16 | kJ |
| Au | 10445,71 | kJ |
| B | 0,00 | kJ |
| Ba | 7,72 | kJ |
| Be | 0,00 | kJ |
| Bi | 5,28 | kJ |
| Ca | 0,00 | kJ |
| Cd | 0,16 | kJ |
| Co | 995,46 | kJ |
| Cr | 0,44 | kJ |
| Cu | 8505,42 | kJ |
| Dy | 0,00 | kJ |
| Fe | 126,54 | kJ |
| Ga | 0,00 | kJ |
| In | 0,00 | kJ |
| K | 0,00 | kJ |
| Li | 0,00 | kJ |
| Mg | 0,00 | kJ |
| Mn | 2,41 | kJ |
| Mo | 0,00 | kJ |
| Na | 0,00 | kJ |
| Nb | 254,33 | kJ |
| Nd | 9,00 | kJ |
| Ni | 166,77 | kJ |
| Pb | 36,80 | kJ |
| Pd | 45792,13 | kJ |
| Pt | 0,00 | kJ |
| Ru | 1712,95 | kJ |
| Sb | 25,17 | kJ |
| Si | 0,00 | kJ |
| Sn | 763,22 | kJ |
| Sr | 0,00 | kJ |
| Ta | 103371,88 | kJ |
| Ti | 12,61 | kJ |
| V | 0,00 | kJ |
| Zn | 6,29 | kJ |
| Zr | 0,00 | kJ |

Tabla a.2.2. 7. Rareza Termodinámica pantalla LCD

| Pantalla LCD | | |
|--------------|----------------------|----------|
| Metal | Rareza Termodinámica | Unidades |
| Ag | 0,00 | kJ |
| Al | 63,80 | kJ |
| As | 0,00 | kJ |
| Au | 1346,90 | kJ |
| B | 0,00 | kJ |
| Ba | 0,83 | kJ |
| Be | 0,00 | kJ |
| Bi | 0,00 | kJ |
| Ca | 0,00 | kJ |
| Cd | 0,00 | kJ |
| Co | 0,00 | kJ |
| Cr | 57,22 | kJ |
| Cu | 92,47 | kJ |
| Dy | 0,00 | kJ |
| Fe | 192,85 | kJ |
| Ga | 0,00 | kJ |
| In | 0,00 | kJ |
| K | 0,00 | kJ |
| Li | 0,00 | kJ |
| Mg | 0,00 | kJ |
| Mn | 6,01 | kJ |
| Mo | 34,76 | kJ |
| Na | 0,00 | kJ |
| Nb | 0,00 | kJ |
| Nd | 0,00 | kJ |
| Ni | 469,70 | kJ |
| Pb | 0,00 | kJ |
| Pd | 0,00 | kJ |
| Pt | 0,00 | kJ |
| Ru | 0,00 | kJ |
| Sb | 0,00 | kJ |
| Si | 0,00 | kJ |
| Sn | 0,14 | kJ |
| Sr | 0,00 | kJ |
| Ta | 0,00 | kJ |
| Ti | 2,14 | kJ |
| V | 0,00 | kJ |
| Zn | 0,00 | kJ |
| Zr | 0,00 | kJ |

Anexo B. Diagramas de flujo de los procesos metalúrgicos seleccionados

Anexo B.1 Ruta del cobre

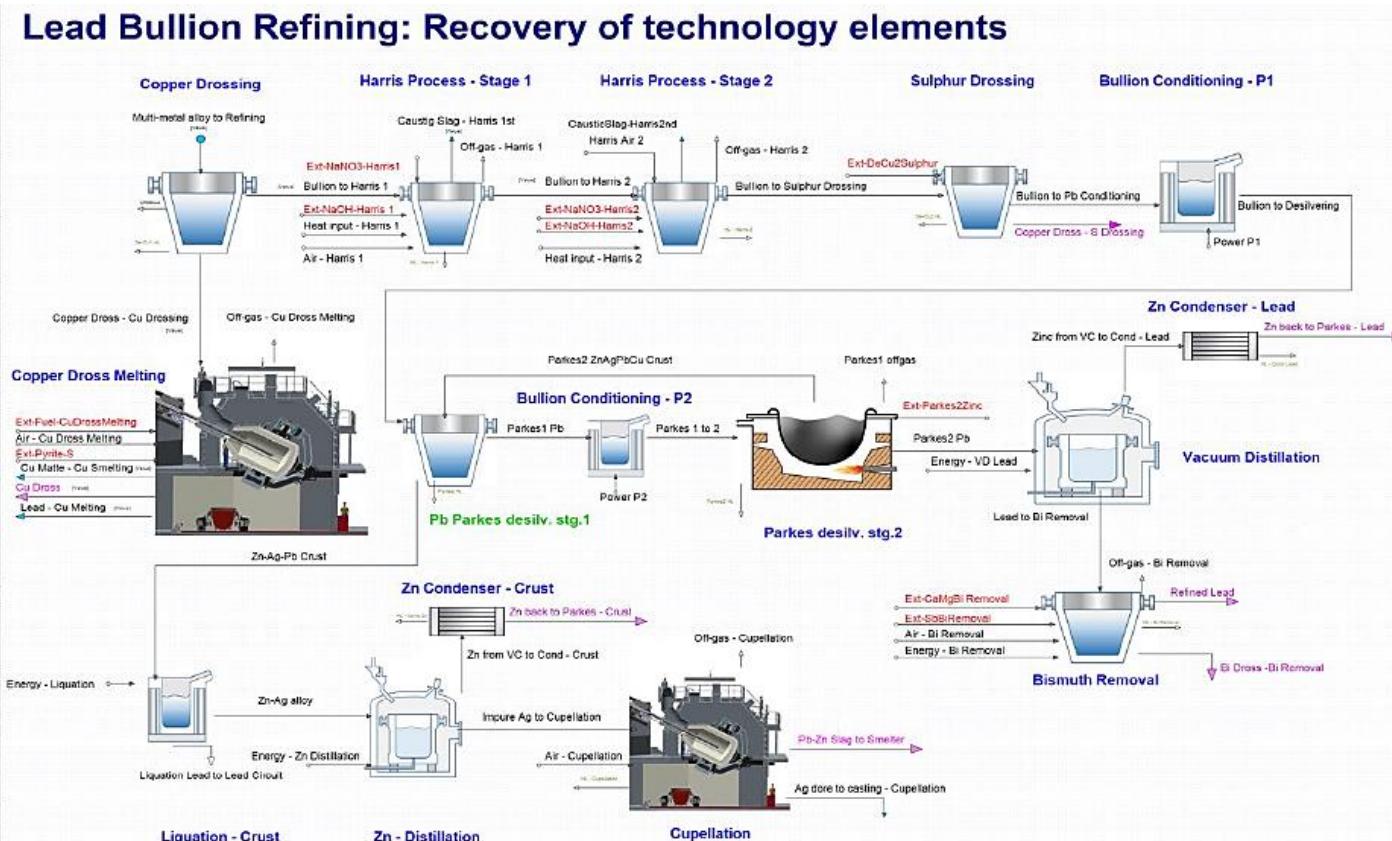


Figura b. 1. Diagrama de flujo detallado de los procesos requeridos para la recuperación de todos los elementos representados en la ruta del cobre. (Antoinette van Schaik & Markus A. Reuter, 2022)

Anexo B.2 Ruta del acero

Steel Recycling in EAF

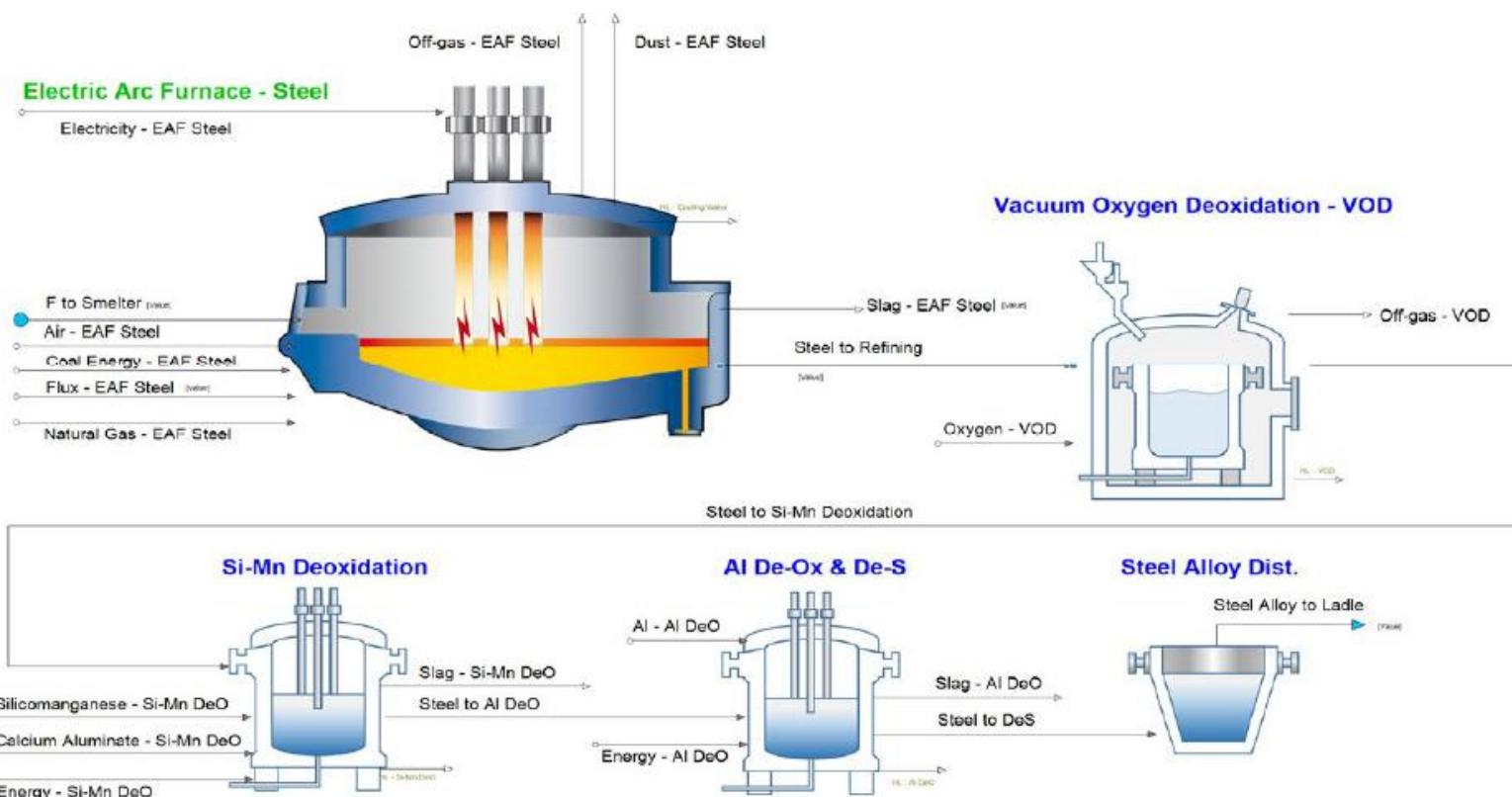


Figura b. 2. Diagrama de flujo detallado de los procesos pirometalúrgicos que tienen lugar en la ruta del acero. (Antoinette van Schaik & Markus A. Reuter, 2022)

Anexo C. Subpartes de las piezas de estudio

Anexo C.1 Cuadro de instrumentos-SEAT León II

Tabla c.1. 1. Subpiezas plásticas del cuadro de instrumentos-SEAT León II

| Plásticos | | | | |
|---|--|--|---|--|
| A black plastic dashboard frame with two circular cutouts for the speedometer and tachometer. | A clear plastic cover for the front dashboard frame. | A black plastic housing or base for a component. | A silver-colored plastic guide plate with a red rectangular component highlighted by a yellow circle. | A white plastic adjustment knob and a black plastic component. |
| Marco delantero BG | Cubierta de cristal del marco delantero BG | Carcasa | Guía luminosa HL | Pomo de ajuste |
| Two black plastic gauge faces for the tachometer. | Two black plastic gauge faces for the fuel and temperature indicators. | No identificado | A silver-colored plastic disc with a red rectangular component highlighted by a yellow circle. | No identificado |
| Esfera tacómetro DZM | Esfera Tanque-Temperatura | Alfombrilla de seguridad | Disco de color (pantalla HL) | Fototransistor |
| Two black plastic pointer supports with white luminous tips. | Two black plastic luminous pointers. | A black plastic pointer support with a white luminous tip. | No identificado | No identificado |
| Puntero luminoso adicional BG | Agujas luminosas adicionales TT | Puntero luminoso adicional DZM | Guía luminosa velocímetro | Guía luminosa DZM |

Tabla c.1. 2. Subpiezas metálicas (fracción no férrica) del cuadro de instrumentos-SEAT León II

| Fracción no férrica | | | |
|----------------------------|---------------------|--------------------------------|------------------|
| Four white plastic步进电机. | A black LCD screen. | A green printed circuit board. | A black speaker. |
| Motores paso a paso | Pantalla adicional | Circuito impreso adicional | Altavoz |

Tabla c.1. 3. Subpiezas metálicas (fracción férrica) del cuadro de instrumentos-SEAT León II

| Fracción no férrica |
|-----------------------------|
| |
| Tornillos de cabeza ovalada |

Anexo C.2 Sistema de infoentretenimiento-SEAT León II

Tabla c.2. 1. Subpiezas metálicas (fracción no férrica) del sistema de infoentretenimiento-SEAT León II

| Fracción no férrica | | | | |
|----------------------------|--------------------|------------------|--------------|-------|
| | | | | |
| PCB del controlador | Disipador de calor | Panel de control | Pantalla LCD | Drive |

Tabla c.2. 2. Subpiezas metálicas (fracción férrica) del sistema de infoentretenimiento-SEAT León II

| Fracción férrica | | |
|-------------------------|--------------------|----------|
| | | |
| Tornillos | Marco pantalla LCD | Carcasas |

Tabla c.2. 3. Subpiezas plásticas del sistema de infoentretenimiento-SEAT León II

| Plásticos |
|------------------|
| |
| Panel frontal VW |