



*Máster Universitario en Economía y Desarrollo*

Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales

**Un Estudio del Grado de Circularidad Económica de los Aparatos Eléctricos y Electrónicos: El Caso Particular de los Ordenadores Personales**

**A Study of the Extent of Economic Circularity of Electrical and Electronic Devices: The Particular Case of Personal Computers**

Trabajo de Fin de Máster presentado para optar al Título de Máster Universitario en Economía y Desarrollo por Joaquín Obando Rivero, siendo la tutora del mismo la Dra. Dña. Rocío Yñiguez Ovando

Vº. Bº. del Tutor:

Dra. Dña. Rocío Yñiguez Ovando

Alumno:

D. Joaquín Obando Rivero

Sevilla, 03 de noviembre de 2021



*Máster Universitario en Economía y Desarrollo*

**Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales**

**TRABAJO DE FIN DE MÁSTER CURSO ACADÉMICO [2020-2021]**

TÍTULO:

**UN ESTUDIO DEL GRADO DE CIRCULARIDAD ECONÓMICA DE LOS APARATOS ELÉCTRICOS Y ELECTRÓNICOS: EL CASO PARTICULAR DE LOS ORDENADORES PERSONALES**

AUTOR:

**JOAQUÍN OBANDO RIVERO**

TUTOR ACADÉMICO:

**Dra. Dña. ROCÍO YÑIGUEZ OVANDO**

RESUMEN:

La gestión de los residuos electrónicos es un problema creciente a nivel mundial, ya que el modelo de producción y consumo de aparatos electrónicos en general, y de ordenadores en particular, no es sostenible en la actualidad debido en gran parte a la linealidad de su proceso productivo. Los valiosos recursos que se usan para su fabricación se desperdician tras el fin del corto ciclo de vida útil en los modelos de producción lineal, y la adopción de prácticas de Economía Circular se plantea como la principal solución para un mejor aprovechamiento de los recursos y frenar el ritmo de crecimiento de esta clase de residuos.

En este trabajo se analizará concretamente qué se considera un residuo electrónico y, cómo la adopción de medidas de economía circular puede mejorar la gestión de los recursos utilizados en la fabricación de ordenadores personales, distinguiendo entre los ordenadores portátiles y de sobremesa, asimismo se valorará el grado de circularidad de los procesos productivos de estos equipos haciendo uso de índices de circularidad propuestos por la Fundación Ellen MacArthur.

Con los índices de circularidad se pueden concretar las áreas fundamentales para mejorar la circularidad del proceso, compararlo con procesos de otros sectores, y realizar propuestas e iniciativas que logren minimizar el impacto ambiental en su fabricación, sobre todo dada la escasez y dificultad en concreto de la obtención de sus valiosos componentes. Como resultado observamos que el índice de circularidad es un 6,1% superior en los portátiles respecto a los sobremesa, aunque en ambos casos presenta un valor bajo que los

acerca a un modelo más lineal que circular, lo que implica que aún existe margen para mejorar la circularidad del proceso.

**PALABRAS CLAVE:**

Economía Circular, Índice de Circularidad, Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos, Aparatos Eléctricos y electrónicos, Ordenadores, Reciclaje.



*Máster Universitario en Economía y Desarrollo*

**Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales**

**MASTER THESIS ACADEMIC COURSE [2020-2021]**

TITLE:

**A STUDY OF THE EXTENT OF ECONOMIC CIRCULARITY OF ELECTRICAL AND ELECTRONIC DEVICES: THE PARTICULAR CASE OF COMPUTERS**

AUTHOR:

**JOAQUÍN OBANDO RIVERO**

ACADEMIC SUPERVISOR:

**Dra. Dña. ROCÍO YÑIGUEZ OVANDO**

ABSTRACT:

E-waste management is a growing problem worldwide, as the production and consumption model of electronic devices in general, and computers in particular, is not sustainable at present due in large part to the linearity of their production process. The valuable resources used for their manufacture are wasted after the end of the short useful life cycle in linear production models, and the adoption of Circular Economy practices is the main solution for a better use of resources and to slow down the growth rate of this kind of waste.

This paper will analyze specifically what is considered an electronic waste and how the adoption of circular economy measures can improve the management of resources used in the manufacture of computers, distinguishing between laptops and desktops, and will also assess the degree of circularity of the production processes of this equipment using circularity indexes proposed by the Ellen MacArthur Foundation.

With the circularity indexes it is possible to identify the fundamental areas to improve the circularity of the process, compare it with processes in other sectors, and make proposals and initiatives to minimize the environmental impact in its manufacture, especially given the scarcity and difficulty in obtaining its valuable components. As a result, we observe that the circularity index is 6.1% higher in laptops than in desktops, although in both cases it presents a low value that brings them closer to a more linear than circular model, which implies that there is still room for improving the circularity of the process.

**KEYWORDS:**

Circular Economy, Circularity Index, Waste of Electrical and Electronic Equipment, Electrical and Electronic Equipment, Computers, Recycling

## Índice de contenidos

1.	Introducción .....	2
2.	Marco Teórico y estado de la cuestión.....	6
2.1.	Modelo de Economía Circular .....	6
2.2.	Sector de Aparatos Eléctricos y Electrónicos .....	8
3.	Metodología.....	14
3.1.	Indicadores de Circularidad Económica.....	14
3.2.	El Índice de Circularidad de Material (MCI) .....	15
3.3.	Desarrollo teórico del MCI.....	18
4.	Resultados .....	26
4.1.	Resultados Preliminares de la Literatura .....	26
4.2.	Cálculo del MCI .....	29
4.3.	Propuestas de Mejora .....	31
5.	Conclusiones.....	33
6.	Bibliografía.....	36

## Índice de Figuras y Tablas

Figura 1.....	8
Figura 2.....	19
Figura 3.....	21
Figura 4.....	27
Tabla 1 .....	27
Tabla 2 .....	29
Tabla 3 .....	30

## **1. Introducción**

Tradicionalmente, y en muchos sectores en la actualidad, el modelo de explotación de recursos que alimentan los sistemas económico-productivos de nuestra sociedad ha seguido un sistema lineal, en el que se extraen las materias primas de la naturaleza, se usan para la creación de bienes y servicios, y luego se desechan, en muchos casos, sin posibilidad de reutilización posterior. Este modelo se podía utilizar cuando se creía que los recursos eran ilimitados y fáciles de obtener, pero actualmente este modelo de producción lineal no es compatible con el cuidado del medio ambiente ni con la limitación de recursos existentes. Por ello, hay que virar hacia un nuevo modelo que limite la extracción de nuevas materias primas, optimice los recursos disponibles y reduzca al máximo la generación de residuos (Puentes Cociña, 2018).

En la Unión Europea, la gestión de los residuos generados en los países miembros se ha convertido en una de las principales prioridades para el desarrollo de un modelo económico sostenible y más respetuoso con el medio ambiente. Se estima que en Europa se pierden anualmente unos 600 millones de toneladas de materiales presentes en residuos que han sido desechados y que podrían haber sido aprovechados para ser reciclados o reutilizados; de media no se recicla ni la mitad de los residuos producidos en los hogares (Ortega Bernardo, 2016).

Para hacer frente a este problema y romper la dependencia directa que tiene el crecimiento económico de la extracción de recursos naturales, se ha planteado un cambio de modelo productivo hacia la Economía Circular. La Economía Circular es un modelo económico-productivo en el que se maximizan los recursos disponibles, tanto materiales como energéticos, para que estos permanezcan el mayor tiempo posible dentro del ciclo productivo, de ese modo se reduce la generación de residuos y se aprovecha lo mejor posible aquellos residuos cuya generación no se haya podido evitar (Ruiz Saiz-Aja et al., 2016).

De este modo, con el modelo de Economía Circular se construye una forma alternativa de producir frente al modelo lineal tradicional. La Economía Circular convierte a los bienes que están al final de su vida útil en recursos para la fabricación de otros bienes, cerrando bucles en sistemas industriales y minimizando residuos (Cerdá and Khalilova, 2016).

La adopción de prácticas de Economía Circular en los procesos productivos hace que los modelos de desarrollo económico sean más sostenibles. Algunas de las prácticas que ayudan a construir casos de éxito en la implantación de medidas de Economía Circular en los procesos productivos se encuentran detalladas en la guía de buenas prácticas de Economía Circular por la *European Circular Economy Stakeholder Platform* (ECESP), que son usados para la determinación de buenos ejemplos a seguir para la implantación de modelos de Economía Circular (Barberio et al., 2020).

Estas prácticas constituyen ejemplos que pueden ayudar a enfocar en qué procesos pueden centrarse los productores a la hora de adoptar estrategias para mejorar la circularidad de los productos que fabrican, como la mejora de la reciclabilidad de los materiales o utilización de materias primas secundarias en la producción. La prevención de residuos y selección de estos para un uso posterior también constituye un ejemplo de buenas prácticas, ya que mejoran la circularidad del proceso al aprovechar recursos ya utilizados y evitar el uso de nuevas materias primas que requieran de una nueva extracción y merma de los recursos naturales (European Circular Economy Stakeholder Platform (ECESP), 2018).

Prolongar la vida útil del producto a través de la reutilización, reparación mantenimiento o rediseño también constituye una forma de mejorar la circularidad de este, ya que la prolongación de su uso evita la necesidad de consumir nuevos recursos para la adquisición de nuevos productos que vengan a cubrir la necesidad que se dejó de satisfacer por el fin de la vida útil del anterior.

Otras prácticas que son consideradas buenas prácticas de Economía Circular incluyen un uso más eficiente de los recursos, introducción de nuevos modelos de consumo, proporcionar a los consumidores información sobre el uso eficiente de los productos y mejora de los recursos y flujo de subproductos.

Haciendo uso de estas actividades, se puede minimizar los residuos generados por procesos lineales y propiciar un mejor aprovechamiento de los recursos a nivel general, sobre todo en aquellos sectores donde se generan una importante cantidad de residuos y cuyos recursos usados en la producción sean valiosos.

Uno de los sectores que cobra cada vez más trascendencia en nuestras sociedades y en donde el flujo de residuos es cada vez más creciente es el sector de los Equipos o Aparatos Eléctricos y Electrónicos (EEE o AEE). El crecimiento en número y en



importancia de los aparatos de electrónica de consumo ha sido muy importante en los últimos años y ha impactado de forma profunda en el estilo de vida de nuestra sociedad (Coughlan, Fitzpatrick and McMahon, 2018). Este crecimiento tiene como consecuencia directa un aumento de los Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), que ha ido creciendo cada año, considerándose uno de los flujos de residuos cuyo crecimiento es de los más rápidos y crecientes en la Unión Europea y en el mundo (Coughlan, Fitzpatrick and McMahon, 2018). De acuerdo con el *Global e-waste monitor*, el incremento medio que se produce en el consumo de EEE a nivel mundial es de 2,5 millones de toneladas métricas al año, que en el año 2019 se tradujo en una generación de 53,6 millones de toneladas métricas residuos derivados de estos productos, 7,3 kg per cápita y un crecimiento de un 21% en los últimos 5 años (Forti et al., 2020).

Estos residuos reciben el nombre de Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (RAEE), que son los generados tras el uso y desecho de toda clase de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (AEE). Su estudio y análisis es importante, no solo por el crecimiento que ha tenido este flujo de residuos en los últimos años, sino también debido a que en su composición existen elementos que pueden llegar a ser muy contaminantes para el medioambiente si no se gestionan correctamente, sin olvidar mencionar que las materias primas para la fabricación de estos equipos son escasas y su obtención es difícil. En la composición de los EEE pueden llegar a encontrarse hasta 69 elementos de la tabla periódica, incluyendo metales preciosos y materias primas críticas (Forti et al., 2020).

La escasez de esos materiales, y el crecimiento de este flujo de residuos, convierte este fenómeno en un gran problema, que se ve agravado por la linealidad del sistema productivo. Por lo que la adopción de prácticas de Economía Circular a lo largo de toda la vida útil de este tipo de producto desde su fabricación hasta su consumo puede contribuir al menos a paliar este problema.

Los recursos utilizados para la fabricación de EEE son en su mayoría materias primas críticas que son fundamentales para el desarrollo de las tecnologías de la información y comunicación, esenciales hoy día para el adecuado progreso y desarrollo de nuestras sociedades en el presente y en el futuro, al menos inmediato. Según el *Global e-waste monitor*, entre las materias primas que nos podemos encontrar en esta clase de productos destacan el oro, cobre y hierro (Forti et al., 2020).

Es por ello que el aprovechamiento de estos materiales tras el fin de la vida útil de estos productos es una cuestión fundamental, y así lo remarca la Unión Europea en su Directiva 2012/19/UE sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos, donde afirma que la falta de reciclado de estos residuos provoca la pérdida de recursos valiosos, y que su adecuada gestión es una de las áreas objetivo que debe ser regulada de forma prioritaria (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2012).

Una de las categorías de Equipos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos más destacadas es la de los ordenadores personales, por el importante rol que desempeña su uso en toda clase de sectores, y porque el buen aprovechamiento de los recursos invertidos en su producción es considerado un gran problema económico y ambiental, ya que la eficiencia en el uso de los materiales para la producción de estos tiene un gran margen para su mejoría, sobre todo en lo relativo a la extensión de su ciclo de vida útil y su facilidad de reparación o reacondicionamiento (Tecchio et al., 2018).

En este estudio analizaremos la circularidad del proceso de producción de ordenadores portátiles y sobremesa, de cuyos desechos surge uno de los flujos de RAEE de mayor crecimiento y complejidad, utilizando el método propuesto por la Fundación Ellen MacArthur (EMF) basado en indicadores de circularidad del flujo de materiales. De este modo analizaremos los aspectos más problemáticos para lograr la circularidad del proceso de estos aparatos electrónicos, como son el diseño propio a la hora de confeccionar estos equipos, la gestión de los residuos generado tras su uso, la dificultad de reciclaje de ciertos componentes y materiales, y las escasas posibilidades de reusabilidad de sus componentes debido, entre otros motivos, a la obsolescencia tecnológica.

El objetivo de este trabajo de investigación es conocer el nivel de circularidad del proceso de producción de los ordenadores personales, distinguiendo entre portátiles y sobremesa y poder así valorar su grado de circularidad, resaltando qué es lo que se podría mejorar para que sea considerado como un proceso modélico de Economía Circular, y para ello vamos a hacer uso de los indicadores de circularidad propuestos por la Fundación Ellen MacArthur para este propósito.

## **2. Marco Teórico y estado de la cuestión**

### **2.1. Modelo de Economía Circular**

Tradicionalmente los modelos económico-productivos que impulsan la Economía de nuestras sociedades han seguido un cauce de recursos lineal, esto es, un flujo productivo en el que los inputs son aquellos recursos naturales que se obtienen de la naturaleza, son transformados en bienes y servicios destinados a satisfacer las necesidades de los consumidores que, una vez consumidos y satisfecha la necesidad, esos productos o sus restos son desechados, y con ello, los recursos y energía invertidos en los mismos. Este modelo de producción provoca un crecimiento crónico de altos niveles de desperdicios y una relación de dependencia entre el desarrollo económico y el consumo de más recursos naturales vírgenes, lo cual plantea un modelo insostenible en el tiempo e incluso ya hay indicios de que está alcanzando sus límites (The Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Es por ello por lo que, para solucionar este problema, se ha propuesto optar por nuevos modelos de producción basados en la Economía Circular. La Economía circular ha sido considerada como una de las soluciones para minimizar la cantidad de materias primas utilizadas en los flujos económicos y reducir la generación de residuos. La Economía Circular supone mirar más allá del actual coger, hacer y desechar del modelo extractivo industrial, y sustituirlo por un modelo que restaura y que va regenerando los recursos que utiliza durante su vida útil o al final del mismo gracias a un diseño del producto concebido para tal fin; en otras palabras, un modelo de producción de un producto pensado para facilitar la reparación, reusabilidad y reciclaje de este (The Ellen MacArthur Foundation, 2019). La concepción de Economía Circular propuesto por la Fundación Ellen MacArthur, se pone énfasis en el problema de que aquellos sistemas que están basados en el consumo de recursos más que en el uso restaurativos de los mismos, lo que lleva aparejado pérdidas significativas a lo largo de la cadena de valor, con el aumento de las externalidades negativas que eso conlleva.

El modelo de producción lineal está cada vez más en entredicho por las diversas circunstancias que envuelven a las economías desarrolladas en la actualidad. Existen numerosos factores que corroboran esta realidad, como las pérdidas económicas derivadas del desperdicio estructural de los procesos productivos cuando estos crean

valor, el riesgo al que se exponen las empresas con la volatilidad de los precios de las materias primas y suministros, o la degradación del ecosistema (The Ellen MacArthur Foundation, 2015). Es por ello, por lo que la solución propuesta para minimizar estos problemas sea tratar de adoptar una visión de la Economía Circular, que vele por un uso más eficiente de los recursos, diseñe productos para que su vida útil sea más larga y se facilite su reparabilidad, reciclaje y reusabilidad.

La Fundación Ellen MacArthur (EMF) propone un modelo de Economía Circular que sirva a las empresas para incorporar sus principios en la totalidad del proceso de creación de valor (The Ellen MacArthur Foundation, 2015). Para ello plantea un modelo compuesto por dos ciclos (ciclo técnico y ciclo biológico) y basado en tres principios fundamentales, tal y como se observa en la Figura 1. Este diagrama representado en la Figura 1 recibe el nombre del diagrama de la mariposa y constituye un marco teórico de uso muy extendido entre las empresas que quieren adoptar prácticas de economía circular, ya que alinea la idea del uso de los recursos para razones económicas en los procesos empresariales con la necesidad de desacoplar la creación de riqueza del consumo de los recursos finitos (Howard, Hopkinson and Miemczyk, 2019).

El primer principio establece que el proceso de Economía Circular ha de preservar y mejorar los recursos naturales controlando los recursos limitados y equilibrando el flujo de recursos. Esto se consigue utilizando tecnologías y procesos que usen fuentes renovables cuando sea posible.

El segundo principio incide en la idea de tratar de optimizar el uso de los recursos gracias a productos, componentes y materiales circulares con la mayor utilización posible de los mismos tanto en el ciclo técnico como en el biológico, lo que implica que se ha de concebir el diseño del producto para que éste sea reparable, y susceptible de remanufacturación o refabricación para mantener los materiales y componentes en un ciclo de vida más largo.

El tercer principio promueve desarrollar sistemas más efectivos a través de la minimización de las externalidades negativas, por ejemplo, tratando de eliminar los desperdicios en la cadena de valor.

Estos principios inspiran el modelo de Economía Circular que está formado por dos ciclos. El primero a considerar es el Ciclo Biológico, que es aquél en el que los materiales y productos orgánicos son devueltos a la bioeconomía, en el proceso de

regeneración de los recursos naturales. El otro es denominado Ciclo Técnico, que es aquél en el que los productos, componentes y materiales se siguen manteniendo en funcionamiento con la mayor calidad posible y durante el mayor tiempo posible, a través de la reparación, mantenimiento, reutilización, remanufactura, y en última instancia el reciclaje (The Ellen MacArthur Foundation, 2019).

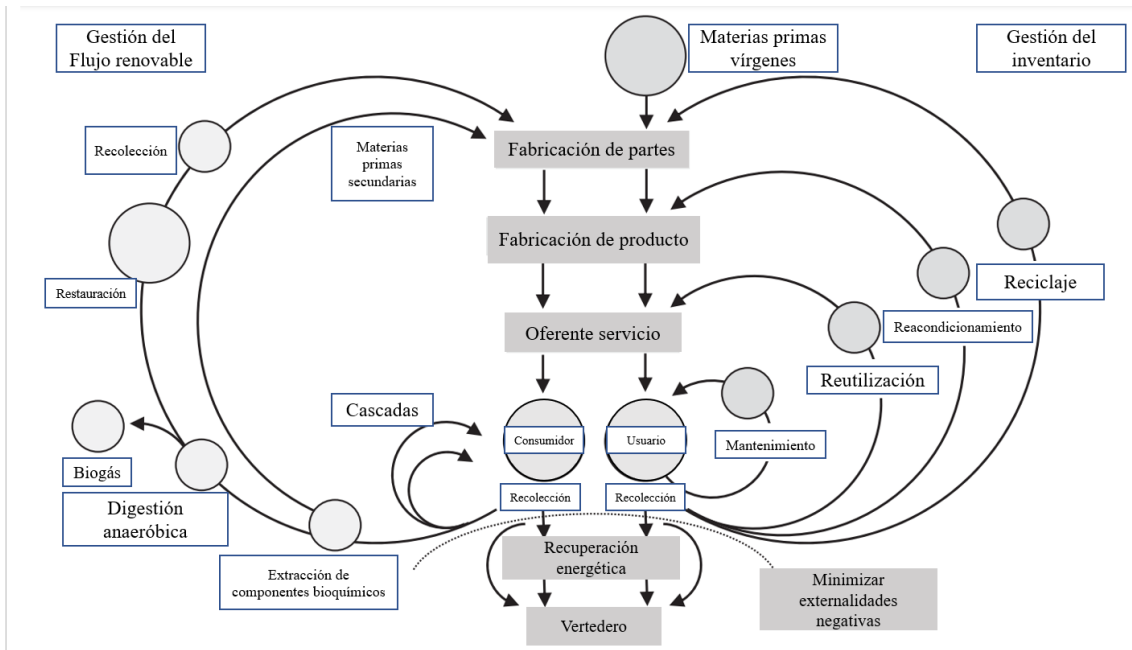


Figura 1: Diagrama de la mariposa que expone los ciclos y principios de la Economía Circular (The Ellen MacArthur Foundation, 2019) versión adaptada por Howard et al. (Howard, Hopkinson and Miemczyk, 2019)

Tomando como base este modelo, las empresas que quieran adaptar sus procesos a la Economía Circular cuentan con una herramienta que facilita el proceso al poner el foco en diferentes partes del proceso. En aquellos sectores donde el proceso sea plenamente lineal y donde más residuos se generan por su actividad productiva, es donde existe una mayor necesidad de implantar procesos circulares basados en estos principios para promover un desarrollo económico más acorde con la certeza de que los recursos naturales no son ilimitados.

## 2.2. Sector de Aparatos Eléctricos y Electrónicos

Uno de los sectores de actividad en los que se genera cada vez más residuos, que cobra cada vez más importancia en el seno del desarrollo de las sociedades modernas, y

que hace un uso intensivo de recursos naturales escasos, es el sector de los aparatos eléctricos y electrónicos (AEE), siendo los residuos derivados de estos uno de los flujos de más rápido crecimiento en el mundo (Shittu, Williams and Shaw, 2020).

Un aparato eléctrico y electrónico (AEE) es definido como un equipo o artilugio que requiere de corrientes eléctricas o campos electromagnéticos para poder desempeñar la función para la cual fue diseñado y fabricado (Environmental Protection Agency, 2017) (Shittu, Williams and Shaw, 2020). El Parlamento y Consejo de la Unión Europea en su Directiva 2012/19/EU proporciona una definición más detallada, al afirmar que los equipos eléctricos y electrónicos son aparatos que necesitan corriente eléctrica o campos electromagnéticos, y los aparatos necesarios para generar, transmitir y medir tales corrientes y campos, y que están destinados a utilizarse con una tensión nominal no superior a 1.000 voltios en corriente alterna y 1.500 voltios en corriente continua (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2012).

Del concepto de AEE surge otro de gran importancia que determina en gran medida la linealidad del proceso productivo de estos productos: los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE o WEEE en inglés). Éstos son aquellos residuos que provienen de estos Aparatos Eléctricos y Electrónicos, ya sea el producto en sí mismo o sus derivados y componentes. Los AEE están diseñados para funcionar adecuadamente durante un período de tiempo correspondiente con la vida útil del producto, o cuando su funcionamiento ya no se adecua a las necesidades para las cuáles fue adquirido, y por lo tanto se vuelve obsoleto. El término de RAEE es utilizado en definitiva para describir aquellos AEE y sus componentes que han sido desechados por sus propietarios sin la intención de ser reutilizados (Shittu, Williams and Shaw, 2020).

Merece la pena realizar la distinción entre RAEE y otra clase de residuos debido en gran medida a su complejidad en el tratamiento posterior y a su volumen. Esta clase de residuos tiene una composición muy compleja y heterogénea, por lo que no es una tarea fácil. Para facilitar la gestión de esta clase de residuos se ha creado un sistema de clasificación de estos residuos.

Dada la cantidad y variedad de AEE existentes en el mercado con diferentes funciones, podría afirmarse que existen más de 660 tipos de productos con funciones comunes susceptibles de ser clasificados como diferentes AEE (Magalini et al., 2016). La clasificación de estos AEE es de fundamental importancia para poder mejorar la

eficiencia en la valoración de los mismos, usando categorías genéricas para clasificar los diferentes aparatos que existen, y simplificar así el cálculo de los productos que están presentes en el mercado (parque de AEE) y el de los residuos generados por éstos.

El criterio de clasificación de AEE UNU-KEYs elaborado por la *United Nations University* es de los más indicados para poder clasificar los aparatos, dado que dicho criterio cumple los requisitos de ser capaz de diferenciar entre 54 categorías distintas por su peso, tiempo de vida del producto, comportamiento en el mercado de los mismos, y relevancia medioambiental. Dentro de este criterio de clasificación, el código 0302 está reservado para los ordenadores de sobremesa y el código 0303 está reservado para los ordenadores portátiles (Magalini et al., 2016). Estos son los dos tipos de productos en los que vamos a centrar el estudio de la circularidad de su proceso de producción y desecho, permitiendo acotar el estudio a una cuestión específica de gran relevancia.

En este estudio se va a tratar de poner énfasis en el problema derivado de la gestión de esta clase de residuos, debido en parte al gran crecimiento de este flujo de residuos. Como los RAEE constituyen una fuente de residuos en constante crecimiento, hay un gran interés por parte de los agentes que se dedican al reciclaje de estos aparatos, ya que en estos residuos se esconden un gran atractivo económico tras su correcto procesamiento para su reciclaje, debido en parte a que el proceso supone la recolección de materias primas críticas y valiosas como pueden ser el oro, plata, paladio y cobre (Berwald et al., 2021).

En relación con la afirmación anterior sobre el crecimiento de los RAEE, cabe destacar en concreto el problema que reside en el corto ciclo de vida de esta clase de productos, en muchos casos originado por la obsolescencia programada de los mismos a la hora de ponerlos a la venta. Analizando el comportamiento del ciclo de vida de los productos de electrónica de consumo en los últimos años, se ha podido observar la tendencia del acortamiento del ciclo de vida de estos (Wieser, 2016, Bakker et al. 2014, Huisman et al. 2012), sobre todo en los ordenadores portátiles y en los ordenadores de sobremesa, experimentando una caída de la vida útil del 10% entre el año 2000 y 2010 (Huisman et al. 2012).

En el mundo de la informática se producen muchos avances a un ritmo acelerado que dejan atrás ciertas tecnologías que al poco tiempo quedan en desuso por lograr una alternativa que venga a satisfacer mejor la necesidad que la tecnología antigua estaba

satisfaciendo. Sin embargo, en muchos casos nos encontramos con barreras impuestas artificialmente para limitar la vida útil de los productos que utilizamos para desecharlos antes de lo previsto, con prácticas realizadas por parte de los fabricantes para acelerar la obsolescencia del producto como incompatibilidades con nuevas tecnologías o un insuficiente servicio postventa, incitando a los consumidores a adquirir un nuevo equipo para poder seguir satisfaciendo la necesidad que se cubría con ese producto (Wieser, 2016).

En el caso concreto de los ordenadores personales, la aparición de componentes más rápidos, más eficientes, nuevas arquitecturas, o actualizaciones de software que deja obsoletos equipos más antiguos provoca que, en equipos que venían cumpliendo una función que hasta ese momento realizaban adecuadamente, se vuelvan obsoletos y no puedan seguir desempeñando dicha función tan bien como antes. La creación de sistemas informáticos cada vez más complejos y cerrados a la modificación de los usuarios provoca que estos queden a merced de las decisiones tomadas por las grandes compañías que los fabrican.

Hennies y Stamminger (2016) afirman que existen tres tipos de obsolescencia, y entre ellas la “obsolescencia funcional”, que es la provocada por la introducción de innovaciones, nuevas características y la “obsolescencia deseada” que viene marcada por las tendencias, deseos y modas que hacen que los productos se vuelvan “anticuados”. Estos dos tipos de obsolescencia juegan un papel clave en el ciclo de vida de los ordenadores personales, siendo su influencia bastante importante a la hora de acortar su durabilidad.

Un planteamiento acorde con la Economía Circular de un determinado producto o servicio supone que los recursos invertidos en su creación producen los mínimos desechos posibles o tratan de alargar en la mayor medida posible el ciclo de vida de los productos que se generan en el mercado. Limitar su usabilidad hace que se generen más residuos al final de su vida útil que alienten al consumidor a adquirir otro producto nuevo, lo que generaría más ventas para el fabricante, pero más residuos generados en el sistema. Limitar dicha obsolescencia, y optar por otras formas de ofrecer tecnologías más acordes al modelo de Economía Circular, puede suponer el primer paso para hacer más sostenible este mercado, y evitar de este modo los problemas derivados de los modelos lineales de producción, como la generación de toneladas de residuos peligrosos o el desperdicio de componentes escasos y valiosos. Este problema de la obsolescencia también se ve



agravado por las pautas de consumo de los compradores, ya que los consumidores compran cada vez más aparatos eléctricos y electrónicos en general, debido en gran medida al rápido crecimiento de la industria tecnológica y al cambio en la cultura de consumo (Akhtar, 2013).

Esta idea de la obsolescencia del producto es usada por parte de los consumidores como uno de los argumentos principales para el desecho de los equipos informáticos. Diversos estudios afirman que los consumidores normalmente optan por un nuevo equipo debido a su deseo de actualizar el nuevo software, pero no debido a que este producto sea inservible (Herat, 2007) y también se debe al cada vez más corto ciclo de vida de los productos electrónicos de consumo (Williams et al., 2008)

De ahí que cobra especial importancia la adopción de prácticas de Economía circular durante toda la vida del producto, que pueden englobar medidas como la extensión de su vida útil y reusar o reciclar sus componentes, ya que así se reduce el desperdicio de estas materias primas tan escasas y valiosas, presentes en estos equipos informáticos, cuya disponibilidad en la cadena de suministros en la fabricación de componentes electrónicos es crítica.

Comprender mejor el origen y destino de los recursos utilizados para la fabricación de ordenadores nos ayuda a saber especificar el origen de ciertos RAEE y sobre cómo aprovecharlos adecuadamente para su reutilización o, si esto no fuera posible por cuestiones prácticas, su reciclaje y extracción de las materias primas que puedan destinarse al aprovechamiento productivo de las mismas.

Los RAEE generados tras el desecho de los ordenadores personales son interesantes para su análisis debido a que tienen un impacto medioambiental considerable en su fabricación, pero a menudo no tienen la opción de reutilización directa, ya que son propensos a sufrir daños y experimentan una rápida pérdida de valor con el tiempo. Además, contienen múltiples materias primas críticas con tasas de reciclaje muy bajas (Coughlan, Fitzpatrick and McMahon, 2018).

Es necesario concretar y especificar cuál es el flujo que siguen los RAEE de los ordenadores, ver qué materias primas fundamentales se pueden aprovechar, y qué se puede mejorar en su gestión para reciclar mejor sus componentes o alargar el ciclo de vida útil de los productos AEE. La gestión de la circularidad económica de los AEE requiere de un sistema adecuado de medición que indique el progreso de la circularidad

de dicho proceso. Entre los sistemas de medición debemos señalar el de los indicadores que permiten la evaluación de los diferentes planes de acción adoptados para incrementar el grado de circularidad económica (Moraga et al., 2019).

### **3. Metodología**

#### **3.1. Indicadores de Circularidad Económica**

Para poder realizar la medición de la circularidad del proceso de fabricación y desecho de los ordenadores portátiles y de sobremesa, se hará uso de la metodología propuesta por la Fundación Ellen MacArthur sobre indicadores de circularidad. La Fundación Ellen MacArthur (EMF) es una institución creada en 2010 con el objetivo de acelerar la transición a la Economía Circular y trabaja con gobiernos, empresas y con el mundo científico para construir una economía regenerativa y reparadora desde el diseño (The Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Una de las metodologías planteadas por la Fundación Ellen MacArthur para analizar la circularidad de un sector económico es la basada en el uso de indicadores de circularidad. Gracias al uso de estos indicadores podemos detectarse variables o parámetros cuantificables que nos ayuden a desarrollar un modelo productivo con una orientación hacia la circularidad del proceso. Haciendo uso de los indicadores de circularidad propuesto por la EMF, podemos analizar cómo de circular es el proceso económico-productivo de un producto en concreto. En este trabajo procederemos a analizar el grado de circularidad del sector de fabricación y venta de ordenadores personales.

El planteamiento que realiza la EMF a la hora de desarrollar la idea de la Economía Circular, y la medición de la misma con el uso de indicadores, es que un modelo basado en los principios de la Economía Circular trata de desvincular la relación directa que existe entre el crecimiento económico y un mayor consumo de los recursos naturales vírgenes ya que, si se siguen las pautas de los modelos de crecimiento lineales, para poder seguir creciendo económicamente es necesario que se sigan extrayendo nuevos recursos de la naturaleza, siendo esta última actividad completamente necesaria para la generación de riqueza en la sociedad.

Con un proceso que siga los principios de la Economía Circular, se tratará de acabar con este binomio, consumiendo menos recursos al aprovechar los que ya se están usando de forma regenerativa o restaurativa a través de la reutilización, remanufacturación, restauración o reciclaje, minimizando los potenciales problemas de

suministro de materias primas de fuentes limitadas, y aprovechando de una forma más eficiente los recursos que ya están en circulación en el sistema minimizando el desperdicio de los mismos.

La manera más eficaz para valorar el grado de circularidad de un proceso es a través del uso de los mencionados indicadores de circularidad, así se puede valorar el estado en el que se encuentra un sector en concreto y valorar si un proceso es más lineal o circular en función de las prácticas que se adopten en el proceso productivo que se esté considerando.

El uso de medidas cuantitativas y cualitativas para la creación de indicadores es una práctica que tanto empresas y organizaciones utilizan para fundamentar sus estrategias y realizar un seguimiento del grado de cumplimiento de los objetivos (Kaplan and Norton 1995).

La utilización de indicadores de circularidad para analizar el proceso de fabricación de un determinado producto ya sea a nivel de empresa o a nivel sectorial, nos posibilita la medición comparativa sobre si dicho proceso estudiado cumple con ciertos parámetros para que sea considerado circular o no.

### **3.2. El Índice de Circularidad de Material (MCI)**

La metodología de la EMF para desarrollar un indicador de circularidad que mida el proceso productivo analiza principalmente el flujo de los diferentes materiales que se van utilizando en la fabricación y desecho del producto, abarcando todo el ciclo de vida útil del producto, lo cual es de suma importancia en el sector de ordenadores personales, por el nivel de elementos críticos que contienen las materias primas utilizadas para la construcción de estos equipos y porque mayoritariamente la composición de los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos tiene su origen en el desecho de estos componentes.

Al enfocarse la metodología en el flujo de materiales, nos permite centrarnos específicamente en cómo la gestión de los recursos naturales destinados a la fabricación del producto es aprovechada de la forma más eficiente, posibilitando su reciclaje y usando esas materias en nuevos productos sin tener que acudir nuevamente al uso de recursos

vírgenes, sino apostando por materias primas secundarias. De este modo se pueden aportar cifras concretas y específicas sobre una magnitud homogénea que es comparable entre productos y sectores, pudiendo observarse el grado de avance en términos de circularidad de un producto concreto.

El índice desarrollado por la EMF, y que se utilizará para calcular la circularidad del proceso de producción de ordenadores personales, recibe el nombre de Índice de la Circularidad Material o *Material Circularity Indicator* (MCI), que es el índice que mide cómo de restaurativo y regenerativo es el proceso productivo de un determinado producto basándonos en cómo se realiza la gestión de sus flujos del material (The Ellen MacArthur Foundation, 2019).

El propósito de este indicador, y como lo establece la propia EMF, es el de servir como herramienta para ayudar en la toma de decisiones empresariales a la hora de diseñar los procesos productivos, la elección de las fuentes para la obtención de los materiales y componentes para la fabricación, y toda clase de decisiones que influyen en el ciclo de vida útil del producto y el destino del mismo al finalizar éste.

El indicador trata de velar por la sostenibilidad del proceso centrándose en la restauración de flujos de material en la producción de los productos, haciendo propios los principios que inspiran un proceso de economía circular, completándolos y concretándolos para enfocarlos en la circularidad del material.

El MCI trata de estudiar la circularidad de los procesos premiando una serie de prácticas que sirven como principios para mejorar la circularidad del producto. En primer lugar, destaca el uso de fuentes de suministro sostenibles para la obtención de materias primas que se usarán para la fabricación del producto, ya que el uso de fuentes sostenibles que traten de minimizar el impacto ambiental o que potencien la regeneración de recursos tras la extracción serán preferibles a otras fuentes que no llevasen a cabo dichas prácticas. En muchas ocasiones la obtención de recursos de fuentes primarias es inevitable para el proceso productivo, por lo que para velar por la circularidad se ha de asegurar al menos que esa fuente posea unos estándares que aseguren la sostenibilidad de la obtención de dicha materia prima.

En segundo lugar, en el MCI se premia el uso de materias primas secundarias, que son aquellas procedentes de procesos de reciclaje, o fruto de la reutilización de un producto anterior, o procedente de una remanufacturación del producto o restauración de

este. A diferencia del principio anterior, estos materiales no provienen de fuentes primarias preferiblemente sostenibles, sino que son materiales o componentes que ya han sido utilizados porque formaban parte de la explotación económica de un producto distinto, por lo que, si los materiales que procedan de dicho producto anterior se usan como input para el proceso analizado por el MCI, será valorado positivamente por este indicador.

En tercer lugar, el MCI valora positivamente la promoción de alargar la vida útil de los productos en circulación gracias a la redistribución, reutilización y a los incrementos en su durabilidad. Este principio surge como contraposición a la obsolescencia programada, y que afecta particularmente a los equipos para el proceso de información objeto de este estudio, ya que la planificación de la obsolescencia del producto ataca directamente a su durabilidad en contraposición con lo propuesto por la Economía Circular, que busca la máxima utilización del bien producido y de los recursos en circulación y a la minimización de los residuos. Una empresa puede optar por otorgar al producto fabricado una vida útil más corta que la económicamente deseable (Bulow, 1986).

Para ello el MCI también valora positivamente que se reutilicen los materiales o componentes al final de la vida útil del producto, que se haga un uso intensivo del mismo para sacar el mayor provecho posible y no se deseché antes de tiempo (con servicios añadidos, sistemas de uso compartido o mejoras en las características y calidad de los modelos) y que se asegure que las materias primas que se obtengan del producto cuando se recicle o reutilice se mantienen sin contaminar y accesibles para uso posterior.

Siguiendo estos preceptos, el MCI puede aportar una valoración de la circularidad del proceso desde la perspectiva de la circularidad de los materiales creando un indicador estándar y comparable entre diferentes productos y sectores que valore la recuperación de los materiales. Con este indicador se parte de la premisa de que, al tratar de gestionar los materiales y materias primas de la forma más eficiente, se alcanzará el objetivo de extender el tiempo de vida útil de los productos a través de la reutilización o el reciclaje, ya sea gracias a una mejora del diseño del producto para que éste dure más tiempo con un enfoque que facilite la reparabilidad o uso intensivo del producto, contribuyendo de esta manera a que éste sea más sostenible. Aunque no se cumplan todas las premisas expuestas en un determinado proceso, el indicador de circularidad trata de poner en valor todas las iniciativas alrededor del producto que se traduzcan en un impacto

positivo importante en su uso a favor de la sostenibilidad. De este modo, se posibilita la explotación de la utilización del mismo durante más tiempo, trayendo como consecuencia un ahorro en el uso de nuevos materiales que se hubiesen tenido que utilizar en un nuevo producto que supla al anterior cuando llegase al fin de su vida útil.

### **3.3.Desarrollo teórico del MCI**

Tal y como se detalla en la base teórica del desarrollo del MCI, la proporción del producto que es recuperado (a través del reciclaje y reutilización de los componentes,) se denomina la parte del flujo restaurativa, mientras que la parte lineal del flujo es la proporción que proviene de materias primas vírgenes y que acaban siendo desechadas (The Ellen MacArthur Foundation, 2019).

El MCI aplicado a un producto concreto ofrece una calificación que indica hasta qué punto se ha minimizado el flujo lineal de materiales, y a su vez mide cómo se ha maximizado el flujo restaurativo de materiales, y cómo se han utilizado los materiales (duración e intensidad de uso) en comparación con otros productos de la industria.

$$MCI = 1 - LFI \cdot F(X)$$

En la fórmula detallada para el cálculo del MCI aparecen los dos elementos principales que componen su formulación: El Índice de Flujo Lineal (LFI) y el Factor de Utilidad (F(x)). El Índice de Flujo Lineal es el indicador que nos proporciona información sobre qué proporción del material involucrado en un proceso productivo fluye de manera lineal, mientras que el Factor de Utilidad nos proporciona información sobre qué intensidad de uso se hace del producto, y su tiempo de vida útil en comparación con otros productos del mismo tipo (The Ellen MacArthur Foundation, 2019).

El flujo de materiales descrito por la metodología puede observarse en el diagrama de la Figura 2.

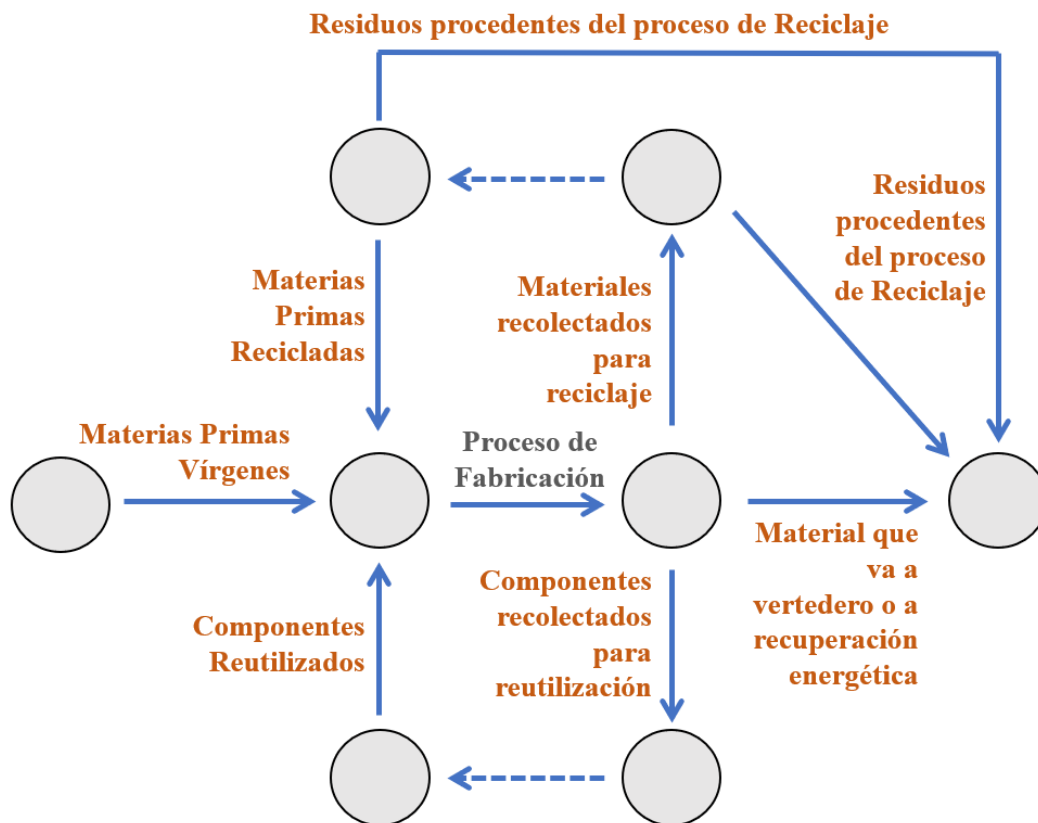


Figura 2: Diagrama que describe el flujo lineal y circular de materiales (The Ellen MacArthur Foundation, 2019)

El MCI se compone esencialmente de una combinación de tres características del producto:

V= Cantidad de Materias Primas naturales usadas en la fabricación (*Virgin Feedstock*)

W= Cantidad de residuos irrecuperables asociados al producto

X= Factor de utilidad que cuantifica la duración e intensidad de uso del producto

Estos elementos cobran gran relevancia a la hora de analizar la circularidad del flujo de materiales del producto. Según esta metodología, un producto que es fabricado haciendo uso únicamente de materias primas vírgenes y que al final de su vida útil son desechados completamente como residuos sin posibilidad de reciclaje o reutilización, sigue entonces un proceso completamente lineal. Por otro lado, un producto que no está fabricado con materias primas vírgenes es completamente reciclado o reutilizado tras el fin de su vida útil y la eficiencia del proceso de reciclado es del 100%, entonces este producto puede considerarse que sigue un proceso completamente circular.



Estos dos supuestos coinciden con los dos extremos que plantea el indicador MCI, siendo 0 un proceso completamente lineal y 1 un proceso completamente circular. En definitiva, toda clase de productos y procesos analizados siguiendo esta metodología obtendrán valores en este indicador comprendidos entre el 0 y 1.

En la mayoría de los casos, al aplicar la fórmula del MCI para analizar la circularidad de un proceso productivo, se espera que se conozcan los componentes del producto y los tipos de materiales que lo componen, pero puede hacerse uso de la fórmula MCI con una consideración total del producto sin diferenciar entre los tipos de materiales para poder realizar una comparación más sencilla con otros sectores. Dicha formulación es la que va a ser utilizada en este estudio para analizar la circularidad del proceso de producción de ordenadores portátiles y de sobremesa.

La metodología para la elaboración del MCI está diseñada para hacer uso de datos representativos de lo que ocurre actualmente en el mercado, por lo que es conveniente que para formular este indicador se usen datos que se aproximen a lo que ocurre en el mercado, eligiendo fuentes de información fiables o haciendo uso de datos genéricos de la industria, o con las mejores aproximaciones posibles debidamente fundamentadas en el caso de que dicha información no estuviera disponible.

En la Figura 3 se detalla el proceso descrito anteriormente por la fórmula MCI, detallando la procedencia de cada flujo de material dentro de todo el entramado de conexiones que forman parte del proceso de producción de cualquier producto que pueda ser analizado haciendo uso de esta metodología.

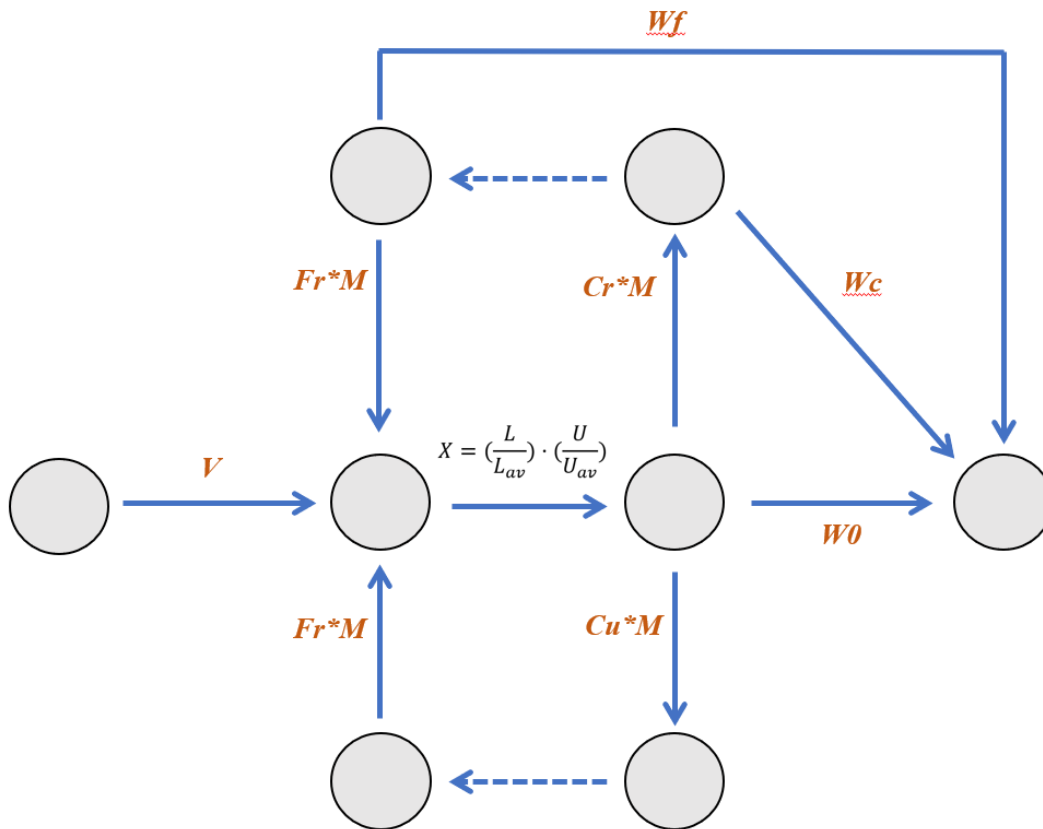


Figura 3: Diagrama que indica la procedencia y fórmula de cada flujo de material para el cálculo del MCI (The Ellen MacArthur Foundation, 2019)

Para proceder al cálculo del MCI, hay que comenzar primero con el cálculo de la cantidad de materias primas naturales usadas en la fabricación (Virgin Feedstock,  $V$ ) y la cantidad de residuos irrecuperables asociados al producto ( $W$ ), seguido de la determinación del factor de utilidad que cuantifica la duración e intensidad de uso del producto ( $X$ ).

### ***Cálculo del Virgin Feedstock***

Para calcular la variable  $V$  hay que considerar un determinado producto en el que  $F_R$  representa la proporción de material reciclado usada para la fabricación del producto y  $F_U$  representa la proporción de material que proviene de la reutilización de otros productos:

$$V = M(1 - F_R - F_U)$$

siendo:

$M$ = Masa del producto.

$F_R$ = Designa la fracción o % de material reciclado.

$F_U$ = Designa la fracción o % de material procedente de reutilización.

### ***Cálculo de los residuos irrecuperables***

Durante la vida útil de un producto es en ocasiones inevitable que parte de los materiales involucrados en el proceso de producción, en el uso del producto, o en el desecho de este, no terminen en el producto final, sino que sean desperdiciados en diferentes fases de su vida útil. Toda la cantidad de desechos irrecuperables asociados al producto está definida por la variable  $W$ , que es la suma de la cantidad de material desechado destinado a vertedero ( $W_0$ ), cantidad de residuo generado tras el proceso de reciclaje ( $W_C$ ) y cantidad de material irrecuperable generada en la recuperación de materias primas para el uso posterior en la fabricación de productos ( $W_F$ ).

$$W = W_0 + W_C + W_F$$

El primer paso para calcular la cantidad de residuos irrecuperables asociados al producto es haciendo uso de la siguiente fórmula que define la cantidad de material destinado a vertedero:

$$W_0 = M (1 - C_R - C_U)$$

siendo:

$C_R$ = % que será separada para reciclaje.

$C_U$ = % de material que será destinado a reutilización.

Para complementar la fórmula anterior, se define la cantidad de residuo generado tras el proceso de reciclaje ( $W_C$ ), haciendo uso de la variable  $E_C$  que hace referencia a la eficiencia de dicho proceso:

$$W_C = M(1 - E_C) * C_R$$

También es necesario el cálculo de la cantidad de material irrecuperable generada en la recuperación de materias primas para el uso posterior en la fabricación de productos.

$$W_F = M \frac{(1 - E_F)F_R}{E_F}$$

En esta fórmula,  $E_F$  indica la eficiencia del proceso de reciclaje utilizada para producir materias primas secundarias recicladas, susceptibles de constituir nuevas materias para la fabricación de nuevos productos ( $F_R$ ).

Como el objetivo de la propia Economía circular es el de reducir el número de procesos involucrados, se va a asumir que partimos de un ciclo de economía circular cerrada en la que  $E_C = E_F$ , siguiendo las directrices metodológicas propuestas en el informe de la Fundación Ellen MacArthur.

Del mismo modo, para proceder al cálculo de la cantidad total de desecho irrecuperable, se han de tomar los tres valores detallados previamente ( $W_0$ ,  $W_C$  y  $W_F$ ), aunque para evitar la duplicación en la cantidad de residuo generado tras el proceso de reciclaje, ha de incluirse en la formulación la siguiente expresión para que  $W_C$  y  $W_F$  tengan la misma proporción y que la cantidad de residuo asociada al reciclaje se calcule como:

$$\frac{W_F + W_C}{2}$$

Siendo la fórmula para el cálculo de la totalidad del residuo la siguiente:

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2}$$

### ***Cálculo Índice de Flujo Lineal***

A partir de estas formulaciones, se puede calcular el Índice de Flujo lineal (*Linear Flow Index*, o LFI), el cual mide la proporción de material que fluye de manera lineal. Toma valores de 0 a 1, donde 1 es un flujo completamente lineal y 0 un flujo completamente circular.

$$LFI = \frac{V + W}{2M + \frac{W_F + W_C}{2}}$$

El máximo valor del indicador, que es 1, ocurre cuando tanto  $V$  como  $W$  son iguales a  $M$  y  $W_F$  y  $W_C$  son iguales a 0. Esto significa que no hay material procedente de reciclado o fruto de la reutilización a la hora de fabricar el producto, ni que tras el fin de la vida útil del producto hay material reciclado o susceptible de reutilización. Esto implica que nos encontramos ante un flujo totalmente lineal en el que toda la materia prima usada para la fabricación del producto proviene directamente de la naturaleza, y que al final de la vida útil del producto éste ni se usa ni se recicla, sino que se desecha totalmente. Lo contrario ocurre cuando el valor del LFI es 0, cuando el material que se usa para la fabricación del producto proviene de material 100% reciclado (o reutilizado) y cuando se aprovecha el 100% del material desechado en el proceso de reciclaje (o reutilización).

#### ***Cálculo del Factor de Utilidad***

El otro elemento necesario para poder calcular finalmente el MCI es el factor de utilidad ( $X$ ), que está constituido por dos componentes: el componente que mide la vida útil del producto y el componente que mide la intensidad de uso en unidades funcionales. Se calcula de la siguiente forma.

$$X = \left(\frac{L}{L_{av}}\right) \cdot \left(\frac{U}{U_{av}}\right)$$

Siendo la variable  $L$  la vida útil del producto analizado en cuestión, y la variable  $L_{av}$  la vida útil media de otros productos relacionados de la industria; mientras que la variable  $U$  es la media de unidades funcionales alcanzados por el producto durante la fase de uso de este, y la variable  $U_{av}$  es la media de unidades funcionales alcanzados por productos del mismo tipo en la industria.

Incrementar el tiempo de vida útil de un producto ( $L$ ) respecto a la vida útil media de otros productos relacionados de la industria ( $L_{av}$ ) conlleva un aumento del factor de utilidad y, en consecuencia, a un aumento y mejora del MCI del producto. Lo mismo se aplica para el componente que hace uso de las unidades funcionales.

Tal y como está detallado en la metodología de elaboración del MCI, a la hora de poner en práctica el uso de esta fórmula para calcular el factor de utilidad de un producto concreto, se recomienda usar un componente u otro de la fórmula, pero no ambos, por lo que, en el caso de tomar valores para medir la utilidad de un producto en uno de los componentes, el otro componente tomará el valor 1. Habrá de usarse aquel componente del que se tenga mayor disponibilidad de información del mercado.

### ***Cálculo del Índice de Circularidad Material***

Una vez definidas las fórmulas y variables que componen el MCI, se procedería al cálculo del índice con el producto del factor de utilidad  $F(X)$  y el LFI.

$$MCI = 1 - LFI \cdot F(X)$$

Una vez determinadas todas las variables, y la fórmula final para el cálculo del MCI, podría ponerse en práctica si se cuenta con la información adecuada para determinar el grado de circularidad del proceso de fabricación y desecho de un producto concreto.

## 4. Resultados

### 4.1. Resultados Preliminares de la Literatura

Una vez detallada la metodología que va a ser utilizada para elaboración del índice de circularidad MCI, se procederá a la aplicación de dicha metodología sobre dos productos en concreto que tienen gran importancia en la generación de RAEE, como son los ordenadores de sobremesa y los portátiles, señalando las diferencias que existen entre ambos productos en lo que respecta a la circularidad de sus procesos de producción y desecho.

Previamente es necesario disponer de ciertos datos relacionados con estos productos para el cálculo del MCI, y que se corresponden con las variables usadas para obtener el factor de utilidad (X) y el LFI.

La fracción de material que se recicla ( $C_R$ ) se corresponde con la proporción de material, que se puede recuperar de los productos una vez concluida su vida útil, para que sea destinada a su reciclaje, pudiendo volver a obtener materias primas que puedan ser usadas para la fabricación de nuevos productos. Para obtener este dato, es necesario realizar un análisis del flujo de materiales (“Material Flow Analysis” o MFA) que estudie el recorrido que hacen los materiales a través de un sistema que ha sido estudiado y definido en un espacio y momento determinado a través de la cuantificación de los inputs y outputs. Este método de análisis fue propuesto por (Brunner and Rechberger, 2004) y se centra en los materiales que pasan a través de este sistema.

En la publicación de la investigación llevada a cabo por (Van Eygen et al., 2016) se realizó este estudio sobre los RAEE de ordenadores de sobremesa y portátiles, llegando a la conclusión de que la fracción de material que se recicla tras un tratamiento primario de sus residuos es de un 60,92% para los portátiles y de un 61,03% para los ordenadores de sobremesa. Realizando el cálculo de los parámetros  $W_0$  y V, como se está estudiando la circularidad de los materiales en el caso de que el material reciclado vuelva al proceso de producción para la fabricación de productos nuevos, cabe destacar que ambos valores coinciden debido a que el porcentaje de material asociado al producto que se desechará, tendrá que ser sustituido en la fabricación posterior por un porcentaje similar de materias primas vírgenes, cálculo que se ha realizado en estudios similares (Quintalla Villar et al., 2016). Los diferentes destinos a los que se ven sometidos los materiales que se han podido

extraer del proceso de reciclaje están detallados en la Figura 4 usando información procedente de dicho estudio.

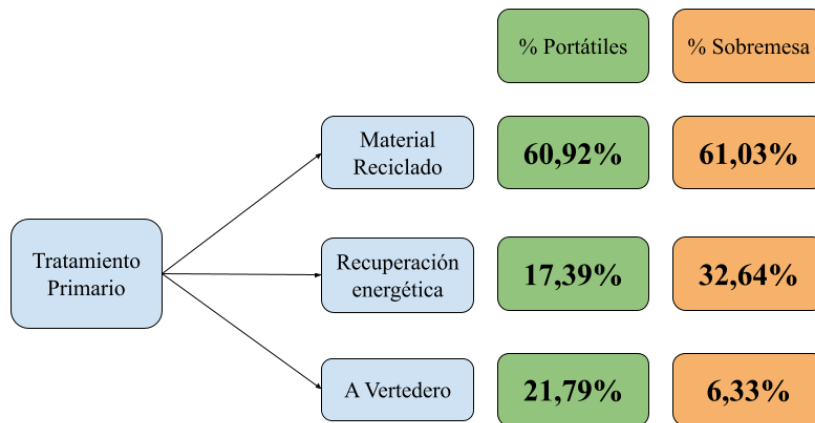


Figura 4: Detalle de los diferentes tipos de output existentes tras un tratamiento primario de reciclaje de ordenadores portátiles y de sobremesa expresados en porcentaje. (Van Eygen et al., 2016).

Dicho estudio hace uso del “*Material Weight Recycling Indicator*” (MWR) propuesto por Nelen et al. (2014), que expresa el peso de los materiales que son efectivamente reciclados en relación con el peso del input, lo cual supone un buen indicador para obtener la eficacia del proceso de reciclaje de los ordenadores portátiles y de sobremesa para la elaboración del MCI. En la Tabla 1 se observan los resultados del MRW de estos dos productos:

	Sobremesa MWR %	Portátil MWR%
Ferrosos	89%	86%
Aluminio	83%	75%
Cobre	78%	85%
Metales Preciosos	49%	63%
Otros Metales no ferrosos	29%	90%
Plásticos	43%	13%
Otros orgánicos	0%	0%
Minerales	0%	0%
Otros	0%	0%
<b>Promedio total</b>	<b>49%</b>	<b>39%</b>

Tabla 1: Material efectivamente reciclado por cada 1000 kg de ordenadores portátiles y de sobremesa usando el indicador MRW en % sobre el total. Fuente: elaboración propia, a partir de Van Eygen et al, 2016.



El estudio arroja que la eficiencia en el reciclaje de los materiales de ordenadores portátiles es de un 39%, mientras que el de los ordenadores de sobremesa es de un 49%, porcentajes que aumentan considerablemente cuando apartamos los plásticos de la ecuación, en un 85% y 87% respectivamente, por su dificultad a la hora de realizar su efectiva separación (Hopewell et al., 2009). Es por ello que para obtener el LCI, se deberá utilizar el porcentaje de eficiencia total del producto.

La fracción de materiales que se reutilizan en la fabricación de los ordenadores portátiles puede ser considerada nula debido a que las piezas y tecnologías que constituyen los ordenadores de nueva fabricación incorporan componentes más avanzados que no se encuentran en modelos anteriores y se actualizan en periodos cortos de tiempo. Además, la reutilización de piezas de equipamientos más antiguos puede acarrear el retraso en la introducción en el mercado de nuevos equipos que sean más eficientes energéticamente, y que en un mercado que evoluciona rápidamente, gran versatilidad y mejora en las funcionalidades, el buen rendimiento de viejos equipos no siempre está garantizado (Van Eygen et al., 2016).

Un estudio de la Comisión Europea denominado “*Analysis of Material Efficiency Aspects of Personal Computers Product Group*” realizó un análisis sobre la eficiencia en la gestión de materiales usados para la producción de equipos para el proceso de información, entre los que se encuentran los ordenadores de sobremesa y portátiles. En dicho estudio se realizó un análisis sobre la durabilidad de los distintos componentes que forman parte de esta clase de equipos, y con las aportaciones de Viegand Maagøe and VITO (2017) pudieron estimar el tiempo de vida útil de esta clase de equipos, dando a los ordenadores de sobremesa 6 años de vida útil, y a los portátiles 5 años. La vida útil promedio de estos dos productos juntos con otros productos relacionados del sector (como servidores, workstations, tablets, All-in-ones, etc) era de 5,33 años, lo que nos proporciona a efectos de calcular el LCI la vida útil media ( $L$ ) y la vida útil promedio del sector ( $L_{av}$ ).

En la tabla 2 se recoge los datos obtenidos de la literatura que son necesarios para el cálculo del MCI

PARÁMETROS	Portátiles	Sobremesa
Proporción material que se recicla ( $F_R, C_R$ )	60,92%	61,03%
Proporción material que se reutiliza ( $F_U, C_U$ )	0%	0%
Eficacia de los procesos de reciclaje ( $E_C, E_F$ )	39%	49%
Vida útil media ( $L$ )	5 años	6 años
Vida útil promedio de productos del sector ( $L_{av}$ )	5,33	5,33

Tabla 2. Datos de las diferentes variables necesarias para el cálculo del MCI obtenidas de la literatura analizada. Fuente: Elaboración propia, a partir de Van Eygen et al., (2016); Nelen et al. (2014); y Viegand Maagøe and VITO (2017)

#### 4.2. Cálculo del MCI

Con los datos incluidos en la tabla 2 podemos proceder al cálculo del LCI, el factor de utilidad y el MCI.

A) Fracción de materias primas naturales usadas en el proceso de fabricación:

$$\text{Portátiles: } V = 1 - F_R - F_U = 1 - 0,6092 - 0 = 0,3908$$

$$\text{Sobremesa: } V = 1 - F_R - F_U = 1 - 0,6103 - 0 = 0,3897$$

B) Cantidad total de residuos irrecuperables (W):

$$\begin{aligned} \text{Portátiles: } W &= W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} = (1 - C_R - C_U) + \frac{(1 - E_F)F_R + (1 - E_C)C_R}{2} = \\ &0,3908 + \frac{0,9528 + 0,3716}{2} = 1,053 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sobremesa: } W &= W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} = (1 - C_R - C_U) + \frac{(1 - E_F)F_R + (1 - E_C)C_R}{2} = \\ &0,3897 + \frac{0,7597 + 0,3112}{2} = 0,8629 \end{aligned}$$

C) Flujo de lineal de materiales o “Linear Flow Index” (LFI):

$$LFI \text{ de Portátiles} = \frac{V+W}{2+\frac{W_F+W_C}{2}} = \frac{0,3908+1,053}{2+\frac{0,9528+0,3716}{2}} = \mathbf{0,63032361}$$

$$LFI \text{ de Sobremesa} = \frac{V+W}{2+\frac{W_F+W_C}{2}} = \frac{0,3897+0,863}{2+\frac{0,7597+0,3112}{2}} = \mathbf{0,579391304}$$

D) Factor de utilidad (X):

$$X \text{ de Portátiles} = \left(\frac{5}{5,33}\right) = 0,938086304$$

$$X \text{ de Sobremesa} = \left(\frac{6}{5,33}\right) = 1,125703565$$

E) Material Circularity Indicator (MCI):

$$MCI \text{ de Portátiles} = 1 - 0,6303 \cdot 0,9381 = \mathbf{0,4087}$$

$$MCI \text{ de Sobremesa} = 1 - 0,5794 \cdot 1,1257 = \mathbf{0,3477}$$

Tras la aplicación de los diferentes cálculos definidos por la metodología establecida por la Fundación Ellen MacArthur para la obtención del MCI, obtenemos como resultado del indicador de circularidad de material un 0,4087 para los ordenadores portátiles, y de un 0,3477 para los ordenadores de sobremesa.

	<i>Portátiles</i>	<i>Sobremesa</i>
<i>Factor de Utilidad F(X)</i>	<i>0,938</i>	<i>1,125</i>
<i>LFI</i>	<i>0,6303</i>	<i>0,5793</i>
<i>MCI</i>	<i>0,4087</i>	<i>0,3477</i>

Tabla 3. Resultados del Factor de Utilidad F(X) y del Flujo Lineal de Materiales (LFI) e Índice de Circularidad de Material (MCI). Fuente: Elaboración propia

Analizando los resultados otorgados por los indicadores LFI y MCI, se puede afirmar que el proceso de fabricación de ordenadores portátiles y de sobremesa, tal y como está concebido con los datos obtenidos, es más lineal que circular y todavía hay mucho margen de mejora. El modelo productivo de fabricación y desecho de los ordenadores portátiles y de sobremesa tienen un 40,87% y un 34,77% de circularidad respectivamente, e interpretando el LFI obtenemos que el porcentaje de material que fluye de forma lineal en ambos procesos es de un 63,03% para los portátiles y de un 57,93% para los ordenadores de sobremesa.

Ambos procesos de producción están lejos de ser procesos completamente circulares, sobre todo debido a que las tasas de reciclaje de ambos productos no son especialmente altas (60,92% para los portátiles y 61,03% para los ordenadores de sobremesa) y a la escasa eficiencia de recuperación de los procesos de reciclaje (39% para los portátiles, y 49% para los ordenadores de sobremesa).

### **4.3. Propuestas de Mejora**

Para poder mejorar estas tasas, sería conveniente que aumentase la tasa de reciclaje y la eficiencia de los procesos de reciclaje tanto de los ordenadores portátiles como de sobremesa. Para ello hay que mejorar el propio diseño de los equipos informáticos, ya que tendrían que estar concebidos pensando en la reparabilidad de los mismos, facilitar el acceso de los técnicos especializados a los componentes para su reparación, reutilización o reciclaje. Otra propuesta de diseño para facilitar el reciclaje de los ordenadores es fomentar el uso de piezas móviles sin adhesivos para facilitar el acceso humano a los componentes internos, facilitando la retirada de estos para su cambio, reutilización o reciclaje.

Todavía existe margen de mejora en la circularidad de los ordenadores portátiles y de sobremesa desde el punto de vista de la circularidad del material y desde el punto de vista de aumento de su vida útil. Los resultados además tienen en cuenta el flujo de circularidad del mercado de ordenadores nuevos, ya que si se tuviera en cuenta el mercado de ordenadores reutilizados el indicador de circularidad arrojaría diferentes resultados al no contar con materias primas vírgenes para su fabricación. Lo que ocurre con este supuesto es que se estaría hablando de un mercado con características diferentes al estudiado, ya que los equipos informáticos reutilizados pueden contribuir a la prevención de la generación de residuos, pero son equipos que en muchas ocasiones no se pueden adaptar a las necesidades y cambios de tecnología demandados actualmente por empresas y usuarios que necesitan prestaciones más actualizadas, y que sólo se pueden encontrar en equipos nuevos.

Además, para proceder a la reutilización de un ordenador considerado ya RAEE, sería necesario que éste se sometiera a un procedimiento de reparación y limpieza que en

muchas ocasiones no es rentable económicamente, siendo el potencial de reutilización de RAEE descartados por los consumidores muy limitado (Van Eygen et al., 2016). Estos equipos, a través de su efectiva reutilización, pueden contribuir positivamente a la circularidad del proceso de producción y desecho de los ordenadores, pero donde habría más potencial de mercado para estos equipos es en regiones con estándares menos exigentes y con una infraestructura de reciclaje más débil, donde sí que podría prevenirse un ahorro de los recursos después de la fase de uso, pero debido sobre todo a la falta de un apropiado tratamiento posterior (Chancerel, 2010; Sahni et al., 2010).

Otro problema derivado del enfoque en la reutilización en vez de en el reciclaje reside en que al final de la vida útil del producto reutilizado, también se tendrá que hacer frente a los residuos del producto al igual que ocurre con los productos nuevos, por lo que, aunque se haya aumentado el factor utilidad, el problema de la gestión de los materiales sigue presente.

## 5. Conclusiones

El Índice de Circularidad de Material o MCI es una herramienta de medición de la circularidad económica de determinados procesos productivos que puede ayudar a mejorar la gestión tanto de los inputs, como de los residuos de los aparatos eléctricos y electrónicos.

Este índice se podría considerar un primer paso para aumentar la concienciación sobre la importancia de la circularidad de los procesos productivos, aunque presenta algunas carencias que tendrían que ser suplidas a través del uso de indicadores complementarios.

La metodología propuesta por la Fundación Ellen MacArthur sugiere el uso de indicadores complementarios que permite tener en cuenta impactos adicionales y riesgos en el proceso analizado (The Ellen MacArthur Foundation, 2019). Aunque también existen otros indicadores que miden la circularidad pensando en el ciclo de vida del producto, en sus efectos en la sociedad y medio ambiente, o que tengan en cuenta sus dimensiones económicas, no existen sin embargo apenas indicadores que midan la preservación de las funciones del producto con estrategias como la promoción de plataformas de uso compartido, o una exploración de su posible multifuncionalidad (Moraga et al., 2019).

El *Material Circularity Indicator* y el *Linear Flow Index* son herramientas indicadas para dar el primer paso hacia el análisis de la circularidad enfocado en la circularidad del material de un proceso, pero que aún le falta recorrido, puesto que hay variables clave para mejorar la circularidad de un proceso entendido como un todo, pero que aún no se tienen en cuenta en este índice debido a la complejidad en muchos casos de poder incorporar esa información en su cálculo estandarizado, o a la indisponibilidad de los datos. Una de las debilidades de este indicador, que ha sido resaltada en otros estudios similares que han aplicado la misma metodología, es la no consideración de la circularidad cruzada con otros procesos (Rocchi et al., 2021), ya que se enfoca en la circularidad de un único proceso que se retroalimenta con los materiales que pueden ser reciclados o reutilizados fruto de ese mismo proceso, pero que quizás puedan ser mejor aprovechados en otros procesos de distinta naturaleza.

Hay variables que serían de mucho interés a tener en cuenta, y que ya se están aplicando en las legislaciones de otros países para mejorar la circularidad, como el Índice de Reparabilidad en Francia para los AEE, que hace uso de indicadores económicos cuantitativos y cualitativos para otorgar un índice de calificación global de un producto en función de una serie de parámetros que valoren su facilidad para ser reparados (Fontejne, 2021). Con esta herramienta se facilita la proporción de información a los usuarios en términos de la circularidad del producto, ya que los consumidores que los adquieran podrán estar más informados acerca de la facilidad para repararlo, y así potenciar su factor de utilidad al alargar el tiempo de vida útil con su reparación. La expansión de vida útil de los productos supone un ahorro de recursos para los particulares y empresas que quieran adquirirlos al expandir su periodo de amortización, y supone además una minimización de potenciales residuos que se puedan generar si se produjese una depreciación total de dicho activo de forma anticipada.

Sin embargo, cabe destacar que la concreción del concepto de Economía Circular y el establecimiento de estos indicadores supone un buen comienzo para la expansión de este concepto a cada vez más sectores, ya que para que efectivamente se pueda evaluar el grado de circularidad de un proceso, es necesario utilizar alguna herramienta de medición debidamente fundamentada que permita evaluar varios procesos entre sí, o el mismo proceso en diferentes periodos de tiempo. Con las mediciones otorgadas por el MCI y el LFI, se consigue establecer las bases para desarrollar indicadores de circularidad más avanzados en el futuro.

El impacto del uso de indicadores para mejorar la Economía Circular de los productos no tiene efectos únicamente en el uso sostenible de los recursos para cuidar el medioambiente, sino que tiene implicaciones en el crecimiento económico, el empleo y en la innovación que merecen ser resaltados y analizados con profundidad en futuras investigaciones. La propia Fundación Ellen MacArthur proporciona información acerca de qué impactos tendrían en estos campos si se siguiese una senda de crecimiento económico enfocada en la Economía Circular, pudiendo potenciar un crecimiento del PIB en Europa de un 11% para 2030 y de un 27% para 2050 (The Ellen MacArthur Foundation, 2015).

Con el uso de indicadores se potencia en definitiva el factor de utilidad de los materiales, gracias al fomento de la reusabilidad, reparabilidad y reciclaje. La expansión del uso y comprensión de estos indicadores entre empresas, instituciones y usuarios

ayudará a orientar sus prácticas en mejorar la circularidad y sostenibilidad de los procesos, por lo que habría que contribuir a la implantación y mejora de estos para que logren alcanzar su cometido; promover prácticas sostenibles en los procesos económico-productivos que nos llevarán a un desarrollo económico en consonancia con la capacidad de generación de recursos de nuestro ecosistema.



## 6. Bibliografía

Akhtar, R. (2013). Survey and analysis of public knowledge, awareness and willingness to pay in Kuala Lumpur, Malaysia e a case study on household WEEE management. *Journal of Cleaner Production*, 52, pp.185–193.

Barberio, G., Cutaia, L., Cappellaro, F. and Fantin, V. (2020). Circular Economy Good Practices Supporting Waste prevention: the Case of Emilia-Romagna Region. *Environmental Engineering and Management Journal*, 19, pp.1701–1710.

Berwald, A., Dimitrova, G., Feenstra, T., Onnekink, J., Peters, H., Vyncke, G. and Ragaert, K. (2021). Design for circularity guidelines for the EEE sector. *Sustainability*, [online] 13. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/7/3923>.

Brunner, P. and Rechberger, H. (2004). Practical handbook of material flow analysis. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 9.

Bulow, J. (1986). An Economic Theory of Planned Obsolescence. *The Quarterly Journal of Economics*, [online] 101, pp.729–749. Disponible en: <https://doi.org/10.2307/1884176>.

Cerdá, E. and Khalilova, A. (2016). Economía Circular. *Revista de Economía Industrial*, [online] 401, pp.11–20. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5771932> [Acceso el 7 Oct. 2021].

Chancerel, P. (2010). *Substance flow analysis of the recycling of small waste electrical and electronic equipment: An assessment of the recovery of gold and palladium*.

Bakker, C., Wang, F., Huisman, J. and den Hollander, M. (2014). Products that go round: exploring product life extension through design. *Journal of Cleaner Production*, [online] 69, pp.10–16. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614000419>.

Coughlan, D., Fitzpatrick, C. and McMahon, M. (2018). Repurposing end of life Notebook computers from consumer WEEE as Thin Client computers – a hybrid end of life strategy for the Circular Economy in Electronics. *Journal of Cleaner Production*, 192.

Environmental Protection Agency (2017). *Compliance & Enforcement*. [online] [www.epa.ie](http://www.epa.ie). Disponible en: <http://www.epa.ie/enforcement/weee/electricalandelectronicequipment/> [Acceso el 4 Oct. 2021].

European Circular Economy Stakeholder Platform (ECESP) (2018). *Circular Economy Good Practices: guidelines for submissions to the ECESP website*. [online] <https://circulareconomy.europa.eu/>. Disponible en: [https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/ecesp\\_-\\_website\\_-\\_gp\\_criteria\\_-\\_v3.pdf](https://circulareconomy.europa.eu/platform/sites/default/files/ecesp_-_website_-_gp_criteria_-_v3.pdf) [Acceso el 13 Oct. 2021].

Fontejne, C. (2021). Improving Repairability in Cordless Vacuum Cleaners. *Delft University of Technology Student theses*. [online] Disponible en: <http://resolver.tudelft.nl/uuid:050c779a-0456-455c-b79c-a2511396f257> [Acceso el 7 Oct. 2021].

Forti, V., Baldé, C., Kuehr, R. and Bel, G. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020. Quantities, flows, and the Circular Economy Potential*. UNU/UNITAR SCYCLE.

Hennies, L. and Stamminger, R. (2016). An empirical survey on the obsolescence of appliances in German households. *Resources, Conservation and Recycling*, 112, pp.73–82.

Herat, S. (2007). Sustainable management of electronic waste (e-Waste). *CLEAN – Soil, Air, Water*, [online] 35, pp.305–310. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/clen.200700022>.

Hopewell, J., Dvorak, R. and Kosior, E. (2009). Plastics recycling: challenges and opportunities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, [online] 364(1526), pp.2115–2126. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2873020/>.

Howard, M., Hopkinson, P. and Miemczyk, J. (2019). The regenerative supply chain: a framework for developing circular economy indicators. *International Journal of Production Research*, [online] 57, pp.7300–7318. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1524166>.

Huisman, J., Maesen, M., Eijsbouts, R., Wang, F., Baldé, C. and Wielenga, C. (2012). The dutch WEEE flows.

Kaplan, R.S. and Norton, D.P. (1995). Putting the Balanced Scorecard to Work. *Performance Measurement, Management, and Appraisal Sourcebook*, Harvard Business School, 66.

Maagøe, V. and VITO (2017). Preparatory study on the Review of Regulation 617/2013. *Computers and Computer Servers (draft report)*.

Magalini, F., Wang, F., Huisman, J., Kuehr, R., Baldé, K., Straalen, V., Hestin, M., Lecerf, L., Sayman, U. and Akpulat, O. (2016). *Study on Collection Rates of Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE), possible measures to be initiated by the Commission as required by Article 7(4), 7(5), 7(6) and 7(7) of Directive 2012/19/EU on Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE)*.

Moraga, G., Huysveld, S., Fabrice Mathieux, Gian Andrea Blengini, Luc Alaerts, Karel Van Acker, Steven de Meester and Dewulf, J. (2019). Circular economy indicators: What do they measure? *Resources, Conservation and Recycling*, [online] 146, pp.452–461. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092134491930151X>.

Nelen, D., Saskia Manshoven, Peeters, J.R., Vanegas, P., Nele D'Haese and Vrancken, K. (2014). A multidimensional indicator set to assess the benefits of WEEE material recycling. *Journal of Cleaner Production*, [online] 83, pp.305–316. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614007070>.

Ortega Bernardo, J. (2016). La Gestión De Los Residuos En El Nuevo Paquete De La Comisión Europea. *Ambienta*, [online] 117, pp.64–71. Disponible en: [https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf\\_AM%5CPDF\\_AM\\_Ambienta\\_2016\\_117\\_completa.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_AM%5CPDF_AM_Ambienta_2016_117_completa.pdf) [Acceso el 8 Oct. 2021].

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea (2012). *Directiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 4 de julio de 2012, sobre residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE)*. [online] Diario Oficial de la Unión Europea. Disponible en: <https://documentacion.fundacionmapfre.org/documentacion/publico/es/consulta/registro.do?id=139060> [Acceso el 7 Oct. 2021].

Puentes Cociña, Beltrán (2018). ¿España Circular 2030? Comentario al borrador de la estrategia española de economía circular. *Revista Catalana de Dret Ambiental*, 9.

Quintalla Villar, M., Calderón Barat, L., De la Cruz Gómez, L.M. and Fernández García, I. (2016). Economía Circular Para La Optimización Del Modelo De Gestión De RAEE. [online] Disponible en: <https://www.eoi.es/es/savia/publicaciones/26534/proyecto-fin-de-master-economia-circular-para-la-optimizacion-del-modelo-de-gestion-de-raee> [Acceso el 1 Oct. 2021].

Rocchi, L., Paolotti, L., Cortina, C., F, F.F. and Boggia, A. (2021). Measuring circularity: an application of modified Material Circularity Indicator to agricultural systems. *Agricultural and Food Economics*, [online] 9(1), p.9. Disponible en: <https://doi.org/10.1186/s40100021001828>.

Ruiz Saiz-Aja, M., Fabrellas Rodríguez, B., Dávila Sena, S., Santervás Gómez, G., Cabrera Marianini, A., Gonzalo Pedrero, G., Tapia Carrasco, C. and Callaba de Roa, A. (2016). La Economía Circular. *Ambienta*, [online] 117, pp.4–21. Disponible en: [https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf\\_AM%5CPDF\\_AM\\_Ambienta\\_2016\\_117\\_completa.pdf](https://www.mapa.gob.es/ministerio/pags/biblioteca/revistas/pdf_AM%5CPDF_AM_Ambienta_2016_117_completa.pdf) [Acceso el 6 Oct. 2021].

Sahni, S., Boustani, A., G, G.T. and C, G.S. (2010). Reusing personal computer devices - good or bad for the environment? pp.1–6.

Shittu, O.S., Williams, I.D. and Shaw, P.J. (2020). Global E-waste management: Can WEEE make a difference? A review of e-waste trends, legislation, contemporary issues and future challenges. *Waste Management*.

Tecchio, P., Ardente, F., Marwede, M., Clemm, C., Dimitrova, G. and Mathieux, F. (2018). Analysis of material efficiency aspects of personal computers product group. *Joint Research Centre Report*.

The Ellen MacArthur Foundation (2015). Towards a Circular Economy: Business Rationale for an Accelerated Transition. In: *Towards a Circular Economy*. [online] The Ellen MacArthur Foundation. Disponible en: <https://ellenMacArthurfoundation.org/towards-a-circular-economy-business-rationale-for-an-accelerated-transition> [Acceso el 15 Oct. 2021].

The Ellen MacArthur Foundation (2019). CIRCULARITY INDICATORS An Approach to Measuring Circularity NON-TECHNICAL CASE STUDIES. In: *Material Circularity Indicator*. [online] The Ellen MacArthur Foundation. Disponible en: <https://emf.thirdlight.com/link/3jtevhlkbukz-9of4s4/@/preview/1?o> [Acceso el 4 Oct. 2021].

Van Eygen, E., De Meester, S., Tran, H.P. and Dewulf, J. (2016). Resource savings by urban mining: The case of desktop and laptop computers in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling*, [online] 107, pp.53–64. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344915301269>.

Wieser, H. (2016). Beyond planned obsolescence: Product lifespans and the challenges to a circular economy. *Gaia: Ökologische Perspektiven in Natur-, Geistes- und Wirtschaftswissenschaften*, 25, pp.156–160.

Williams, E., Kahhat, R., Allenby, B., Kavazanjian, E., Kim, J. and Xu, M. (2008). Environmental, social, and economic implications of global reuse and recycling of personal computers. *Environmental Science & Technology*, [online] 42, pp.6446–6454. Disponible en: <https://doi.org/10.1021/es702255z>.