

Marco para el Análisis del Ciclo de Vida de Productos Remanufacturados. Aplicación al Impacto Ambiental de Servomotores.

Aitor San Francisco Lasa

Directores:

Dr. D. Rikardo Minguez Gabiña

Dr. D. Erlantz Lizundia Fernandez

Noviembre de 2020

Dawarentzat.

DECLARACIÓN DE ORIGINALIDAD

Esta investigación ha sido realizada por Aitor San Francisco Lasa, cuyo fin en la misma es ahondar en la sostenibilidad ambiental que aportan los cierres circulares dentro de la economía circular. Para ello se ha generado el marco para el análisis de ciclo de vida de productos remanufacturados y un estudio comparativo entre un producto de nueva fabricación y un producto remanufacturado, focalizando el estudio en un motor.

La realización de esta investigación comenzó gracias a una beca ofrecida por IHOBE (Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco) y la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), para realizar el desarrollo de la investigación dentro del espacio *Basque Ecodesign Hub*, núcleo neurálgico del ecodiseño, donde se trabaja codo con codo con jóvenes profesionales realizando proyectos principalmente para el *Basque Ecodesign Center*.

Por lo tanto, declaro a través de este documento, que esta tesis doctoral y el trabajo presentado en ella con sus resultados, fueron hechos totalmente por mí, y bajo la supervisión de mis directores de la tesis doctoral Rikardo Minguez Gabiña y Erlantz Lizundia Fernandez del Departamento de Expresión Gráfica y Proyectos de Ingeniería de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU).

Aitor San Francisco Lasa

Noviembre 2020

AGRADECIMIENTOS

El interés y la profundización que he querido realizar en el campo del análisis de ciclo de vida viene dado de cuando cursé y me formé en el aula de ecodiseño en 2009. En dicha formación conocí al que fue mi tutor Gorka Benito, a quien acudo siempre que tengo alguna duda técnica sobre el análisis de ciclo de vida y siempre me brinda con su paciencia y conocimiento. A lo largo de esta tesis no ha sido para menos y es por ello que le doy las gracias.

Esta tesis me ha brindado la oportunidad de profundizar en la economía circular, gracias a la cual he ido conociendo a mucha gente con los que he compartido tiempo, proyectos y experiencias. Es por ello que agradezco a todo el equipo fundador de Circular Hub el tiempo dedicado en soñar por un mundo más circular y sostenible. Eskerrik asko Eduardo, Aitor, Ángela, Yenko eta Mikel. Lo cual me lleva a Iñigo Ruiz de Apodaca y el tiempo que dedicamos divagando sobre la economía circular y las penurias compartidas sobre nuestras respectivas tesis doctorales. Eso si, no me olvido de los viajes realizados por Holanda y Helsinki, visitando lugares y congresos sobre la circularidad. Y por supuesto, no puedo olvidarme de Xabi Gorritxategi, responsable de que haya podido conocer la remanufactura desde dentro a lo largo de diversas empresas. Tesi honen zati bat zurea ere bada.

Ihobe y la UPV/EHU fueron los que me brindaron la oportunidad de comenzar esta tesis gracias a una beca y al espacio ofrecido en el Basque Ecodesign Hub. Eskerrik asko Txema por ofrecerme esta oportunidad. Y por supuesto a mis directores de Tesis. Eskerrik asko Rikardo por aportarme tanto en el ámbito académico, del cual era un auténtico neófito, por tus aportes y correcciones y por soportar mis momentos de confusión a lo largo de estos cinco años. Tenemos pendiente realizar una travesía a nado. Y a Erlantz Lizundia, por sus críticas y aportes constructivas en la corrección de la Tesis.

Julen Landa eskerrik asko zure zuzenketa paziente, zorrotz eta esker onekoarengatik. Eskerrik asko lagun!

Antes de finalizar, no puedo dejar de lado el personal de Fagor Automation. Agradezco a Mikel Serrano que haya confiado en mí y haya hecho de puente para realizar el estudio en su empresa. Y muchas gracias a Ruben Melchor por haber obtenido toda la información necesaria en el estudio y su tiempo dedicado en tiempos de confinamiento.

Finalmente quiero dar las gracias a mi familia, ama, aita, Haritz, Ioana eta Paul, por estar ahí, a pesar de no comprenderme siempre. Y Dawa, ha sido un placer conocerte mientras realizaba esta investigación y aunque te ha tocado soportar mis cambios de humor, siempre he sentido tu apoyo. Eskerrik asko nere alboan egoteagatik.

Aitor San Francisco Lasa

Noviembre de 2020.

RESUMEN

En la presente tesis doctoral se ha analizado el grado de sostenibilidad ambiental de un producto industrial remanufacturado, respecto a uno de nueva fabricación. Para ello se han estudiado diversos métodos de asignación en diferentes metodologías de ecodiseño. De ese estudio se han delimitado los límites del sistema de un análisis de ciclo de vida y han sido adaptados a productos remanufacturados. Es decir, se han podido generar los límites entre el ciclo de inicio, los ciclos de uso intermedios y el ciclo final, adaptándolo a una perspectiva de *cradle to cradle*. Además, para completar dicho estudio se ha realizado un estudio comparativo del impacto ambiental de un servomotor remanufacturado y un servomotor de nueva fabricación.

Por lo tanto, para validar el objetivo general de que un producto industrial remanufacturado es ambientalmente más sostenible que uno de nueva generación, el trabajo realizado de esta investigación se divide en los siguientes tres bloques:

En el primero de ellos se contextualiza la economía circular y el ecodiseño. El bloque continua profundizando sobre la remanufactura: se analiza la remanufactura como cierre circular, las implicaciones que tiene en la economía y las principales características desde el punto de vista de los fabricantes y los remanufacturadores.

En la segunda parte se realiza un análisis exhaustivo de las principales metodologías de análisis de ciclo de vida. En la misma se profundiza en los sistemas de asignación para generar los límites entre los diversos ciclos de uso de los productos remanufacturados. De dicho análisis se han obtenido tres maneras diferentes de marcar el fin y el inicio de ciclo dentro de la remanufactura.

Finalmente se ha realizado el análisis de ciclo de vida de un servomotor de nueva fabricación y posteriormente se ha ampliado el análisis para un servomotor remanufacturado. En dicho análisis, se ha realizado una comparativa entre un servomotor de nueva fabricación con uno remanufacturado a lo largo de tres ciclos de uso. Para completar el análisis se han comparado las diferencias entre las diversas metodologías de asignación estudiadas.

Los resultados indican que un servomotor remanufacturado tiene un impacto ambiental menor que uno de nueva fabricación. Aunque para el caso del primer ciclo el impacto es algo mejor en uno de nueva fabricación, en los siguientes ciclos se revierte considerablemente dicha tendencia. A su vez se ha reflejado que al tener una etapa transversal a todos los ciclos con una relevancia del impacto superior al 90% (A su vez se ha reflejado que al tener una etapa transversal a todos los ciclos, como es la fase de uso), relativiza los resultados entre los diversos ciclos. Es por ello que se ha ahondado en lo que ocurre al obviar la fase de uso y realizar un análisis más significativo.

Dicho cambio ha acentuado la diferencia entre el primer ciclo y el resto de los ciclos, siendo este primer ciclo el que tendría el 90% del impacto ambiental. A su vez, se ha pasado de una mejoría del producto industrial remanufacturado respecto al de nueva generación del 3,56% contemplando la fase de uso, a una mejora del 60,92% al excluir dicha fase.

Los resultados finales obtenidos muestran que el impacto ambiental del servomotor se reduce paulatinamente mediante ciclos sucesivos de remanufactura: con tres ciclos la mejora es del 3,56%, mientras que con 7 ciclos esa mejoría es del 4,57%.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE CONTENIDOS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
ÍNDICE DE TABLAS	v
SIGLAS UTILIZADAS	vi
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. CONTEXTO DE LA TESIS DOCTORAL.....	1
1.2. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL.....	2
2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	4
3. ESTADO DEL ARTE: APROXIMACIÓN A LA ECONOMÍA CIRCULAR Y EL ECODISEÑO	5
3.1. ECONOMÍA CIRCULAR Y LAS LÍNEAS DE PENSAMIENTO.....	5
3.2. JERARQUÍA DE RESIDUOS Y LÍMITES AL CRECIMIENTO.....	10
3.3. DISEÑO Y SISTEMAS CIRCULARES.....	12
3.4. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION.....	13
3.5. CIERRES CIRCULARES.....	16
3.6. ECODISEÑO.....	23
4. LA REMANUFACTURA COMO CIERRE DE CICLO	29
4.1. INTRODUCCIÓN.....	29
4.2. REMANUFACTURA.....	31
4.3. DEFINICIÓN DE LA REMANUFACTURA.....	33
4.4. EL PROCESO DE LA REMANUFACTURA.....	34
4.5. AGENTES QUE ACTUAN EN LA REMANUFACTURA.....	36
4.6. BENEFICIOS QUE APORTA LA REMANUFACTURA.....	39
4.7. MOTIVACIONES DE LA REMANUFACTURA.....	41
4.8. BARRERAS DE LA REMANUFACTURA.....	42
4.9. DISEÑO PARA LA REMANUFACTURA.....	46
5. LÍMITES DEL SISTEMA Y MARCO PARA LA REMANUFACTURA EN EL LCA	51

5.1.	INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (LCA)	51
5.2.	LÍMITES DEL SISTEMA PARA LA REMANUFACTURA EN EL LCA...	57
5.3.	MÉTODOS DE ASIGNACIÓN	60
5.3.1.	Método de asignación según Ecoinvent.....	61
5.3.1.1.	Atribucional vs. Resultante	64
5.3.1.2.	La asignación según Ecoinvent adaptado a la remanufactura	67
5.3.2.	Método de asignación según Environdec	67
5.3.2.1.	La asignación según Environdec adaptado a la remanufactura.	72
5.3.3.	Método de asignación según ILCD (modelo atribucional).....	73
5.3.3.1.	Casuística 1: valor del mercado superior a cero.....	74
5.3.3.2.	Casuística 2: valor del mercado inferior a cero.....	77
5.3.3.3.	Procedimiento de dos etapas.....	79
5.3.3.4.	La asignación según ILCD adaptado a la remanufactura.....	81
5.3.4.	Tratamiento de la multifuncionalidad según la HUELLA AMBIENTAL (formula de referencia para el EoL).....	82
5.3.4.1.	La asignación según PEF adaptado a la remanufactura.....	87
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
6.1.	OBJETIVO Y ALCANCE DEL INVENTARIO DEL LCA	89
6.1.1.	Unidad Funcional.....	90
6.1.2.	Vida Útil de Referencia.....	90
6.1.3.	Límites del Sistema	91
6.1.4.	Reglas de corte	92
6.1.5.	Requisito de calidad de los datos.....	92
6.1.6.	Impactos Ambientales	92
6.2.	CÁLCULO COMPARATIVO DE IMPACTO AMBIENTAL ENTRE UN MOTOR NUEVO Y UNO REMANUFATURADO.	95
6.2.1.	Impactos Ambientales del servomotor de nueva fabricación....	96
6.2.2.	Impactos ambientales de un servomotor remanufacturado. ...	100

6.2.3.	Comparativa entre los ciclos y los sistemas de asignación.....	101
6.2.4.	Comparativa entre un servomotor nuevo y otro remanufacturado.	104
6.2.5.	Análisis de la progresión del impacto ambiental mediante la ampliación de ciclos de remanufactura.....	106
6.3.	RESUMEN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	107
7.	CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	111
7.1.	CONCLUSIONES	111
7.2.	LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	113
	BIBLIOGRAFÍA	114
	ANEXO I: ESTRATEGIAS DE DISEÑO Y SUS DIRECTRICES	128
	DISEÑO PARA LA REUTILIZACIÓN Y LA REMANUFACTURA	128
	DISEÑO PARA EL MONTAJE	129
	DISEÑO PARA EL DESMONTAJE	130
	DISEÑO MEDIOAMBIENTAL (DfE).....	131
	PRINCIPIOS DE DISEÑO PARA EL CICLO DE VIDA	135
	ANEXO II: RESULTADOS DEL LCA	137
	IMPACTO AMBIENTAL DE UN SERVOMOTOR DE NUEVA FABRICACIÓN	137
	IMPACTO AMBIENTAL DE UN SERVOMOTOR REMANUFACTURADO	137
	DELIMITACIÓN DE LOS CICLOS LCA EN LA ASIGNACIÓN PPP.....	138
	DELIMITACIÓN DE LOS CICLOS LCA EN LA ASIGNACIÓN MV.....	139
	DELIMITACIÓN DE LOS CICLOS LCA EN LA ASIGNACIÓN 50/50.....	141
	PROGRESIÓN DEL IMPACTO AUMENTADO LOS CICLOS DE REMANUFACTURA	142
	ANEXO III: INVENTARIO ILC	143
	MOTOR DE NUEVA FABRICACIÓN	143
	SERVOMOTOR REMANUFACTURADO.....	144
	ANEXO IV: ESTRUCTURA DE ÁRBOL GENERADO EN OPEN LCA ...	145

ESTRUCUTURA DE ÁRBOL DEL LCA DEL SERVOMOTOR DE NUEVA FABRICACIÓN	145
ESTRUCUTURA DE ÁRBOL DEL LCA DEL SERVOMOTOR REMANUFACTURADO	146
ANEXO V: ECUACIÓN PEF	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: El sistema de la CE según Pearce y Turner (1990).....	6
Figura 2: Esquema temporal de las escuelas de pensamiento de la CE (elaboración propia).....	8
Figura 3: El ciclo biológico y el tecnológico planteado por Cradle to Cradle (adaptación propia desde McDonough y Braungart 2002).	9
Figura 4: Escenario de la situación "Estándar" de Limits To Growth.	12
Figura 5: Gráfico de los ciclos biológicos y técnicos de CE (fuente: EMF)	14
Figura 6: Jerarquía de residuos de la directiva EU 2008/98/CE (adaptado desde Zunft & Fröhlig, 2009).	17
Figura 7: Cierres de la CE y que agentes actúan en diferentes cierres (UNEP, 2020).	18
Figura 8: Diferentes cierres de ciclo (fuente: elaboración propia).	21
Figura 9: Procesos necesarios para la renovación de un producto (elaboración propia a partir de (Fernandez Alcala 2016)).....	22
Figura 10: Procesos necesarios para el reacondicionamiento de un producto (elaboración propia a partir de (Fernandez Alcala 2016)).	22
Figura 11: Procesos necesarios para la remanufactura de un producto (elaboración propia a partir de (Fernandez Alcala 2016)).....	23
Figura 12: Imagen del distintivo de la etiqueta ecológica europea.....	25
Figura 13: Las etapas del ciclo de vida de un producto (Fuente: elaboración propia a partir de Ihobe)	26
Figura 14: Las fases del LCA definidas en la ISO 14040 e ISO 14044.....	27
Figura 15: El proceso completo de ciclo cerrado de la remanufactura (elaboración propia).	35
Figura 16: Motivos para aplicar la remanufactura según los participantes. (European Remanufacturing Network (ERN) 2015)	41
Figura 17: Factores competitivos citados como "extremadamente importante" por los remanufacturadores estadounidenses. (United State International Trade Commission 2012).....	44
Figura 18: Barreras para aplicar la remanufactura según los participantes (European Remanufacturing Network (ERN) 2015).	45
Figura 19: Imagen basada en Rodríguez Lozano por Erwin M. Schau, Traverso, y Finkbeiner.	51
Figura 20: Diferentes límites del sistema y objetivos de alcance de los LCA (elaboración propia).	52
Figura 21: Ejemplo de un sistema del producto para el LCA (International Standard Organization 2006).....	55
Figura 22: Ejemplo de un conjunto de procesos unitarios dentro de un sistema del producto (International Standard Organization 2006).....	55
Figura 23: El marco de dos ciclos comparativos entre uno nuevo (azul) y otro remanufacturado (verde) (elaboración propia).	58
Figura 24: Sistema de un LCA de <i>cradle to grave</i> (elaboración propia).	59
Figura 25: Sistema de un LCA <i>cradle to cradle</i> de remanufactura (elaboración Propia).	59

Figura 26: Cómo llegan las cargas a los materiales secundarios en un sistema de asignación Cut Off (Ecoinvent 2017).....	62
Figura 27: Asignación en el punto de sustitución (Ecoinvent 2017).	63
Figura 28: Marco de Evaluación de un LCA (ISO 14006).....	65
Figura 29: Asignación de los límites del sistema según PPP (Environdec 2008).....	69
Figura 30: El método PPP ilustrado para las diversas opciones de tratamiento de residuo. El área marcada de verde claro indica el impacto ambiental relativo al generador de residuo (Environdec 2008).	70
Figura 31: El método de asignación PPP relacionado con la incineración y la generación energética (Environdec 2008)	71
Figura 32: El punto rojo delimita el fin del primer ciclo según el estudio de Environdec (elaboración propia).	73
Figura 33: Asignación de productos desechos/EoL, cuando en el proceso de gestión se obtiene como resultado un producto valioso (ILCD).	78
Figura 34: En el instante de obtener $MV > 0$ (zona verde) finalizará el primer ciclo según el estudio de ILCD (elaboración propia).	82
Figura 35: Límites del sistema en el ciclo de vida n y la interacción con los ciclos colindantes (EC).....	83
Figura 36: El impacto ambiental correspondiente al espacio de amarillo será el que se repartan los ciclos correspondientes, según la PEF (elaboración propia).	88
Figura 37: Motor modelo FKM44 objeto de estudio en la investigación.	89
Figura 38: Diagrama los procesos del sistema del LCA (Environdec 2019).	90
Figura 39: Marco del estudio comparativo que incluye tres ciclos de uso del producto remanufacturado y tres productos de nueva fabricación (elaboración propia).	96
Figura 40: Desglose de las partes del servomotor	97
Figura 41: Gráfica de los porcentajes de las fases sobre el impacto ambiental de un servomotor de nueva fabricación.....	99
Figura 42: Gráfica de los porcentajes medios de las fases del impacto ambiental de un servomotor de nueva fabricación.....	99
Figura 43: en negro las fases del cálculo de LCA de la remanufactura.....	100
Figura 44: Gráfica de los porcentajes de las fases sobre el impacto ambiental de un servomotor remanufacturado.	101
Figura 45: Gráfica del impacto ambiental medio para cada ciclo contemplando las metodologías de asignación.	102
Figura 46: Gráfica del impacto ambiental medio para cada ciclo contemplando las metodologías de asignación (sin la fase de uso).....	103
Figura 47: Porcentajes medios del impacto ambiental de un servomotor remanufacturado frente a uno de nueva fabricación (con la fase de uso y sin la fase de uso).	105
Figura 48: Tendencia de mejora del incremento de los ciclos.....	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Escuelas de pensamiento utilizados en la CE y sus términos clave (en orden cronológico).....	7
Tabla 2: Jerarquía para las estrategias de diseño en la extensión de la vida de producto y reciclaje.....	11
Tabla 3: Definiciones de las diferentes estrategias de cierre circular.....	19
Tabla 4: Estrategias de recuperación de producto y sus procesos.....	21
Tabla 5: Principios del diseño ecológico.....	24
Tabla 6: Conceptos base y alternativos utilizados tanto en la academia como en la industria.....	33
Tabla 7: Principales sectores y actividad remanufacturera en la EU, (CE, 2015).....	37
Tabla 8: Reparto de la industria remanufactura (en millones de €) entre los países de la EU (EC, 2015).....	38
Tabla 9: Relación entre los procesos de remanufactura y las estrategias de diseño.....	48
Tabla 10: Resumen del modelo de asignación Cut Off.....	63
Tabla 11: Resumen del método de asignación PPP.....	72
Tabla 12: Resumen del modelo de asignación marcado por el ILCD.....	79
Tabla 13: Componentes de la Causalidad Física Determinantes.....	80
Tabla 14: Categorías de impacto ambiental utilizados en el estudio.....	93
Tabla 15: Impacto ambiental de un servomotor de nueva fabricación.....	98
Tabla 16: Impacto ambiental de un servomotor remanufacturado.....	101
Tabla 17: Comparativa de los tres ciclos y las diferentes metodologías de asignación.....	102
Tabla 18: Comparativa de los tres ciclos (sin la fase de uso) y las diferentes metodologías de asignación.....	103
Tabla 19: Estudio comparativo de los ciclos de remanufactura frente a los de nueva fabricación.....	104
Tabla 20: Estudio comparativo de los ciclos de remanufactura para el indicador ambiental GWP 100 frente a los de nueva fabricación.....	104
Tabla 21: Estudio comparativo de los ciclos de remanufactura frente a los de nueva fabricación, sin la fase de uso.....	105
Tabla 22: Porcentaje de mejora mediante el incremento de ciclos.....	106
Tabla 23: Estrategia y directrices de diseño para la reutilización y la remanufactura.....	128
Tabla 24: Estrategia y directrices diseño para el montaje.....	129
Tabla 25: Estrategia y directrices diseño para el desmontaje.....	130
Tabla 26: Estrategia y directrices diseño para el medioambiente.....	131
Tabla 27: Estrategia y directrices diseño para el ciclo de vida.....	135
Tabla 28: Resultados del impacto ambiental del LCA del servomotor de nueva fabricación.....	137
Tabla 29: Resultados del impacto ambiental del LCA del servomotor remanufacturado.....	137
Tabla 30: 1 ^{er} ciclo de la delimitación de ciclos LCA en la asignación PPP.....	138
Tabla 31: 2 ^{do} ciclo de la delimitación de ciclos LCA en la asignación PPP.....	138
Tabla 32: 3 ^{er} ciclo de la delimitación de ciclos LCA en la asignación PPP.....	139

Tabla 33: 1 ^{er} ciclo de la delimitación de ciclos LCA en la asignación MV.....	139
Tabla 34: 2 ^{do} ciclo de la delimitación de ciclos LCA en la asignación MV.....	140
Tabla 35: 3 ^{er} ciclo de la delimitación de ciclos LCA en la asignación MV.	140
Tabla 36: 1 ^{er} ciclo de la delimitación de ciclos LCA en la asignación 50/50.....	141
Tabla 37: 2 ^{do} ciclo de la delimitación de ciclos LCA en la asignación 50/50.	141
Tabla 38: 3 ^{er} ciclo de la delimitación de ciclos LCA en la asignación 50/50.....	142
Tabla 39: Progresión del impacto aumentando los ciclos de remanufactura.	142
Tabla 40: ILC del servomotor de nueva fabricación	143
Tabla 41: ILC del servomotor remanufacturado.	144
Tabla 42: Estructura de árbol del LCA del servomotor de nueva fabricación.....	145
Tabla 43: Estructura de árbol del LCA del servomotor remanufacturado.....	146
Tabla 44: Ecuación de PEF.....	147

SIGLAS UTILIZADAS

SIGLAS	INGLÉS	CASTELLANO
APRA	Automotive Parts Remanufacturers Association	Asociación de Remanufacturadores de Piezas Automovilísticas
CE	Circular Economy	Economía circular
CLEPA	European Association of Automotive Supplier	Asociación Europea de Proveedores del Automóvil
CRR	The Center for Remanufacturing and Reuse	Centro para la Remanufactura y la Reutilización
DfA	Design for Assembly	Diseño para el Ensamblaje
DFD	Design for Disassembly	Diseño para el Desensamblaje
DfML	Design for Multiple Life Cycle	Diseño de Múltiples Ciclos de Vida
DfML	Design for Maintenance	Diseño para el Mantenimiento
DfRem	Design for Remanufacturing	Diseño para la Remanufactura
DfU	Design for Upgradability	Diseño para la Actualización
DfX	Design for Excellence	Diseño para la Excelencia
EC	European Commission	Comisión Europea
EMF	Ellen MacArthur Foundation	Fundación Ellen MacArthur
EoL	End of Life	Fin de Vida
EU	European Union	Unión Europea
IPP	Integrated Product Policy	Política Integral de Producto
ISO	International Standards Organization	Organización Internacional de Normalización
LCA	Life Cycle Assessment	Análisis de Ciclo de Vida
MLP	Multiple Life Cycle Product	Producto con Múltiples Ciclos de Vida
MV	Market Value	Valor de Mercado
OEM	Original Equipment Manufacturer	Fabricante Original de Producto
PLT	Physical Life Time	Vida Útil Física
PSS	Product-Service System	Sistema de Producto-Servicio
PPP	Polluter-Pays-Principle	Principio de quien Contamina Paga
RoHS	Restriction of Hazardous Substance	Restricción de Sustancias Peligrosas
VLT	Value Life Time	Valor de Vida Útil
WEEE	Waste Electrical & Electronic Equipment	Residuos de Aparatos Eléctrico-Electrónicos

1. INTRODUCCIÓN

La tesis doctoral “Marco para el Análisis del Ciclo de Vida de Productos Remanufacturados. Aplicación al Impacto Ambiental de Servomotores”, ha sido desarrollada en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, dentro del programa de doctorado de Ingeniería de Proyectos, de la Universidad del País Vasco- Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). A su vez se ha contado con la ayuda técnica de IHOBE, la Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco.

1.1. CONTEXTO DE LA TESIS DOCTORAL

El agotamiento de recursos, el aumento de la población mundial y el aumento del consumo, entre otros, está demostrando la necesidad de un cambio del paradigma económico. Además de la actual crisis sanitaria, coexiste una emergencia ambiental a cuyo reto también se debe dar una respuesta.

La pandemia de la Covid-19 insta a avanzar en un nuevo marco y diferente de la política industrial. Estas políticas industriales en la era posterior a la Covid-19 deben fomentar el desarrollo humano sostenible (Ferrannini, y otros 2020). En el estudio realizado por Severo y otros, detectan que la pandemia COVID-19 es un vector importante en el cambio de comportamiento de las persona. Entre dichos cambios destacan la sostenibilidad ambiental y la responsabilidad social (Severo, De Guimaraes y Dellarmelin 2020). Por ello, las empresas deben conocer y responsabilizarse de los impactos generados como consecuencia de su actividad; es decir, comenzar a dar una respuesta positiva y aminorar así la presión generada sobre el planeta Tierra.

En diciembre de 2019 Europa presentó una hoja de ruta llamada el pacto verde o como se le conoce el “*New Green Deal*” (Comisión Europea 2019). Dicho pacto pretende dotar a la Unión Europea (a partir de ahora EU por sus siglas en inglés *European Union*) de una economía sostenible, eficiente en el uso de los recursos y competitiva. Es por ello que el *New Green Deal* establece un plan de acción para:

- Impulsar un uso eficiente de los recursos mediante el paso a una economía limpia y circular.
- Restaurar la biodiversidad y reducir la contaminación.

Por lo tanto, la manera de producir, la manera de consumir, así como la creciente masa de clase media, obliga a repensar el diseño de los productos y el mercado para una nueva economía más sostenible (Kharas y Hamel 2018). Esto se puede llevar a cabo

mediante un cambio del actual sistema basado en una economía lineal a una economía circular (a partir de ahora CE por sus siglas en inglés *Circular Economy*). La CE se sostiene en los siguientes tres principios: preservar y mejorar el capital natural, optimizar el rendimiento de los recursos y promover la eficacia de los sistemas (Ellen MacArthur Foundation 2012).

Para promover la eficacia de los sistemas y optimizar el rendimiento de los recursos la CE plantea diferentes cierres circulares. Los cierres circulares que se proponen en la CE son: la reparación, la reutilización, la restauración, el reacondicionamiento, la remanufactura y el reciclaje. Dichos cierres circulares consiguen alargar el tiempo en el que un producto o un material continua aportando valor en el mercado. Entre esos cierre circulares, la remanufactura tiene la capacidad de devolver un producto al mercado como si fuera nuevo, y es uno de los cierres que mejor respuesta ambiental ofrece. Entre las mejoras que ofrece están la conservación material y el aumento del ciclo de vida del producto.

De esta manera, en el presente trabajo estudia el ciclo de vida de los productos remanufacturados mediante metodologías de ecodiseño. Estas metodologías están focalizadas en el estudio del impacto ambiental de productos o servicios. A su vez, están generadas desde el prisma de la economía lineal, es decir, desde una perspectiva de *cradle to grave* y es necesario adaptarlas a un producto basado en los principios circulares de *cradle to cradle*. Para concluir se realiza una comparativa entre diversos ciclos de un servomotor remanufacturado y un servomotor de nueva fabricación y conocer así su respuesta ambiental.

1.2. ORGANIZACIÓN DE LA TESIS DOCTORAL

En el Capítulo 1 se ha descrito el contexto de la tesis doctoral. En la misma se analiza el interés del tema seleccionado y se justifica su elección e interés tanto a nivel científico, así como su aplicación futura. Los objetivos y las hipótesis que se establecen en esta tesis doctoral se resumen en el Capítulo 2.

El Capítulo 3 es el estado del arte. En la misma se realiza una revisión de la CE y la relevancia del ecodiseño como metodología de estudio ambiental. Enumerando los apartados, se enmarca la CE junto con sus escuelas de pensamiento y los límites al crecimiento, se describen los principios de la Fundación Ellen MacArthur (a partir de ahora EMF, por sus iniciales en inglés “Ellen MacArthur Foundation”) y se continua con las diferencias existentes entre los cierres circulares. Al final del capítulo se realiza una introducción al ecodiseño.

El Capítulo 4 es la contextualización de la remanufactura. En la misma se profundiza en todos los aspectos relevantes para la remanufactura: la definición del proceso, las características técnicas, los agentes que toman parte dentro de la remanufactura, los beneficios, las motivaciones, las barreras y el diseño necesario para remanufacturar un producto.

En el Capítulo 5 se genera el marco necesario que posibilite el estudio comparativo entre un producto industrial remanufacturado y uno de nueva fabricación. Para ello, tras una introducción al análisis de ciclo de vida (a partir de ahora LCA, por sus iniciales en inglés “*Life Cycle Assessment*”) y comenzar a delimitar los límites del sistemas para la remanufactura, se estudian diversos métodos de asignación. Dichos métodos corresponden a los utilizados por Ecoinvent, Environdec, International Reference Life Cycle Data (ILCD) y la Huella Ambiental de Producto Europea (a partir de ahora PEF, por sus siglas en inglés “*Product Environmental Footprint*”).

El estudio comparativo del LCA entre un servomotor de nueva fabricación y el servomotor remanufacturado se expone en el Capítulo 6. En la misma además del estudio, se representan y discuten los resultados obtenidos en los cálculos realizados.

Las conclusiones más significativas y las posibles líneas futuras de trabajo se resumen en el Capítulo 7.

Una vez analizado las conclusiones y las líneas futuras está la biografía. Posteriormente se encuentra el apartado de los anexos. El Anexo I incluye diversas estrategias de diseño que actúan en la remanufactura y sus directrices. El Anexo II está compuesto por las tablas y los resultados del análisis del LCA. Los inventarios de ciclo de vida para el estudio del LCA se encuentran en el Anexo III. El Anexo IV está compuesto por la estructura de árbol generado en Open LCA para el servomotor de nueva fabricación y para el remanufacturado. Finalmente la ecuación completa de PEF está en el Anexo V.

2. OBJETIVOS E HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

Los objetivos y las hipótesis relativas a esta investigación pretenden corroborar que un producto industrial remanufacturado es desde una perspectiva ambiental más sostenible que uno de nueva fabricación. Para refutar dicha hipótesis se genera el marco necesario que posibilite realizar una comparativa del impacto ambiental entre los dos casos de estudio.

Por lo tanto, los objetivos establecidos son los siguientes:

- Evidenciar que un producto remanufacturado es ambientalmente más sostenible que uno de nueva fabricación.
- Delimitar los sistemas de un producto remanufacturado, marcando el inicio y el final de cada uno de los ciclos. Es decir, diferenciar el primer ciclo de uso, los ciclos intermedios de uso y el ciclo final.
- Efectuar un estudio comparativo de LCA entre un producto remanufacturado y uno de nueva fabricación.

En cambio las hipótesis de esta investigación son las siguientes:

HIPÓTESIS 1: Un producto remanufacturado reduce el impacto ambiental frente a uno de nueva fabricación. Esa reducción se fundamenta mediante el estudio de los indicadores ambientales según el método de evaluación de impacto CML-IA baseline, por ejemplo: potencial del calentamiento global, acidificación, eutrofización, toxicidad humana,...

HIPÓTESIS 2: La cantidad de ciclos de uso de un producto remanufacturado (esto es, las veces que se reincorpora nuevamente al mercado) influye en la reducción del impacto ambiental.

HIPÓTESIS 3: El impacto ambiental de los ciclos de uso de remanufactura varía dependiendo de si es un primer ciclo de uso, un ciclo intermedio o el ciclo final.

HIPÓTESIS 4: El impacto ambiental comparativo entre un producto de nueva fabricación y uno remanufacturado, variará dependiendo del ciclo de uso con el que se realice la comparativa.

3. ESTADO DEL ARTE: APROXIMACIÓN A LA ECONOMÍA CIRCULAR Y EL ECODISEÑO

El estado del arte comienza con una introducción a la CE y las líneas de pensamiento de la misma. En el siguiente punto se analiza la jerarquía de residuos de la EU y los límites al crecimiento. En el punto 3.3 se aborda el diseño circular y cómo plantear sistemas circulares eficientes. Continúa con la conceptualización de la EMF y la diversidad de cierres circulares. Para finalizar el estado del arte, se realiza un contextualización del ecodiseño.

3.1. ECONOMÍA CIRCULAR Y LAS LÍNEAS DE PENSAMIENTO

Hay muchas realidades que están exigiendo un cambio de paradigma económico, esto se debe principalmente al agotamiento de los recursos, al aumento de la población mundial y al aumento del consumo. El sistema imperante de la era industrial ha estado centrado en un consumo exacerbado y la apropiación y transformación de los recursos (Jackson y Webster 2016).

En la década de los 70 comenzaron a crecer movimientos como el ecologismo y la economía ecológica, en defensa de la naturaleza. Esto se debe, en parte, a la publicación de “Primavera Silenciosa” (Carson 1962). La economía ecológica es el germen de las consiguientes economías ambientales: la economía verde, la bioeconomía, la economía azul (Pauli 2011), la economía circular (Ellen MacArthur Foundation 2012), etc. Desde el Informe Brundtland (World Commission on Environment and Development 1987) se vienen adoptando medidas políticas que no acaban de satisfacer al mundo ecologista. Además de los ecologistas, el campo científico lleva décadas siendo crítico con la situación actual y se reclaman soluciones para nuestro futuro común.

Se ha demostrado que la cantidad de los materiales no renovables está disminuyendo o sus picos de producción se darán a lo largo del siglo XXI (Jackson y Webster 2016). El pico de producción del petróleo ya se da por superado. A nivel global, entre otros, se estima que el pico productivo del hierro será en 2025, el del cobre en 2036 y el de la plata en 2030 (Sverdrup, Koca y Ragnarsdottir 2013). Por lo tanto, cualquier empresa que quiera seguir bajo las mismas condiciones del uso de recursos, deberá responsabilizarse de la conservación de los materiales a nivel de empresa. A pesar de todo, dichas acciones realizadas de manera aislada no tendrán una influencia significativa en la escasez de recursos, siendo necesario un esfuerzo mundial para paliar

este decremento (Asif, y otros 2015). Sin un compromiso global y una legislación que regule y limite la extracción de recursos, será difícil obtener resultados satisfactorios.

Se estima que en 2020 la clase media será de 4.000 millones de personas y en 2030 habrá ascendido a 5.300 millones de personas (Kharas y Hamel 2018). Esto implica que a mayor poder adquisitivo, se da un mayor nivel de consumo y un aumento de la necesidad de los recursos. Por lo tanto, la manera de producir y la manera de consumo, así como la creciente clase media, obliga a repensar el diseño de los productos y el mercado para una nueva economía más sostenible. Esto se puede traducir en la transición de una economía lineal a una CE.

Originalmente el concepto de CE se acuñó en 1990 en una aplicación económica modelada mediante el balance de materiales. Este balance se basaba en las dos primeras leyes de la termodinámica. Estas dos leyes son la “ley de transformación” y la “entropía” (Pearce y Turner 1990), (Lieder y Rashid 2015).

Pearce y Turner sostienen que la economía es un sistema cerrado como el que se puede observar en la Figura 1. Con la primera ley de la termodinámica establecen que “no podemos construir o destruir materia o energía”. Esto es, que todo recurso introducido en el sistema de producción, antes o después, terminará en el medio ambiente (Pearce y Turner 1990).

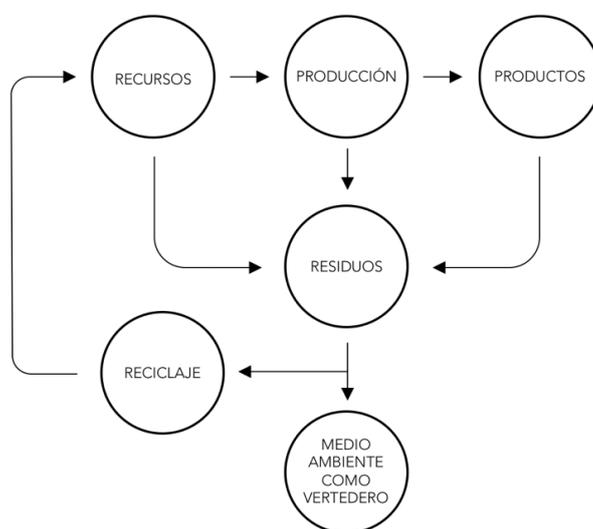


Figura 1: El sistema de la CE según Pearce y Turner (1990)

En la Figura 1 se muestra cómo los recursos se extraen y se destinan a la producción de bienes de consumo. En dicho modelo el material reciclado aparece como un nuevo

recurso que se reintroduce en el sistema, en vez de terminar en el medio ambiente. A pesar de reciclarse, una fracción del residuo termina en el medio ambiente como desecho. Ese desecho vincula el sistema con la segunda ley de la termodinámica, asociado al aumento de la entropía dentro del sistema (Pearce y Turner 1990).

Además de apoyarse en los conceptos económicos de Pearce y Turner, los principios ambientales de la actual CE tienen su origen en diferentes escuelas de pensamiento: la economía ecológica, la biomimética y *cradle to cradle* (McDonough y Braungart 2002); (Benyus 1997); (Mentink 2014), tal y como se puede observar en la Tabla 1 y la Figura 2.

Tabla 1: Escuelas de pensamiento utilizados en la CE y sus términos clave (en orden cronológico)

Escuela de Pensamiento	Términos Clave para la economía circular
Permacultura (Mollison y Holmgren 1978)	Diversidad, estabilidad y resiliencia
Performance Economy (Stahel y Reday-Mulvey 1981)	Basado en el rendimiento, el servicio funcional (de la propiedad a la utilización) Producto como servicio
Ecological Industrial (Frosh y Gallopoulos 1989)	Perspectiva sistémica, pensando en sistemas Minimizar el uso de la energía, el consumo de materiales escasos e impactos medio ambientales incluyendo la generación de residuos Simbiosis Industrial LCA y Análisis del Flujo de los Materiales
Diseño Regenerativo (Lyle 1996)	Regeneración, procesos regenerativos (procesos que renueva sus fuentes de energía y materiales)
Biomimética (Benyus 1997)	La naturaleza como modelo (imitar y aprendizaje) La naturaleza como medida (normas) La naturaleza como mentor (valoración) 6 principios vitales Residuo igual a comida
Cradle to Cradle (McDonough y Braungart 2002)	Celebrar la biodiversidad Utilizar la energía solar Ciclo biológico y técnico La ecoefectividad sobre la ecoeficiencia
Blue Economy (Pauli 2011)	Cascada, un residuo es una entrada

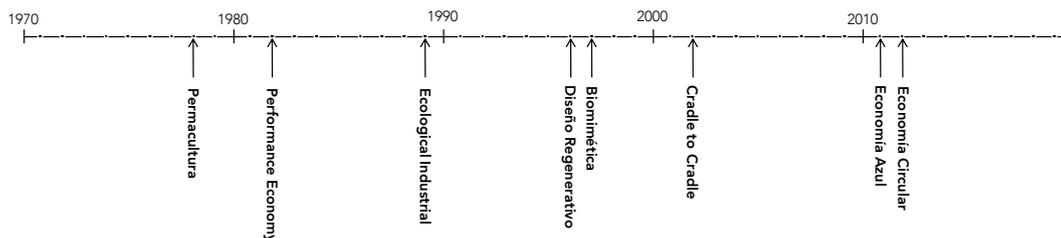


Figura 2: Esquema temporal de las escuelas de pensamiento de la CE (elaboración propia).

A finales de los años 70, Mollison y Holmgren, ecologistas australianos definieron el modelo permacultura como el diseño consciente y mantenedor de ecosistemas agrícolas productivos. Se basaron, en definir los ecosistemas imitando las interrelaciones encontradas en los patrones de la naturaleza. Según estos autores, los ecosistemas poseen la diversidad, estabilidad y resistencia de los ecosistemas naturales. De tal manera que un sistema basado en la permacultura, es capaz de producir lo suficiente para satisfacer sus necesidades, sin explotar recursos o contaminar; de ahí su característica sostenibles a largo plazo (Mollison y Holmgren 1978).

Stahel y Reday-Mulvey plantearon la economía del rendimiento como una economía basada en bucles, mediante la cual, la creación de empleo, la competitividad económica, el ahorro de recursos y la prevención de residuos están asegurados. Los objetivos principales de la economía del rendimiento son: extender la vida del producto, plantear bienes de larga duración y actividades de reacondicionamiento y prevenir la producción de residuos. Del mismo modo se incide en la economía basada en servicios, es decir, aumentar la importancia de la venta de servicios en lugar de productos (Stahel y Reday-Mulvey 1981).

En 1989, Robert Frosh y Nicholas Gallopoulos crearon el concepto ecología industrial. Para ello se basaron en un modelo productivo de los ecosistemas naturales, donde la industria funciona como un organismo que se relaciona con otros. En dicho modelo productivo se establecen relaciones sostenibles de energía, productos y servicios; así como, interrelaciones entre los diferentes operadores del ecosistema industrial que se abastecen de los flujos de materiales y las energías (Frosh y Gallopoulos 1989). Este concepto también se conoce como la ciencia de la sostenibilidad, debido a su carácter interdisciplinar y porque sus principios también se pueden aplicar en el sector de los servicios.

John T. Lyle postuló, que cualquier sistema, partiendo de la agricultura se puede organizar de forma regenerativa y emular el funcionamiento de los ecosistemas. En dichos sistemas, los productos son creados e interaccionan sin producir residuos. El objetivo del diseño

regenerativo es crear sistemas hechos por humanos que no tengan que ser desechados (Lyle 1996).

Aunque la biomímesis lleva siglos aplicándose, en las últimas décadas es un modelo actualizado por Janine Benyus. En 1997 la biomimética se plantea como una innovación basada en la inspiración por la naturaleza, estudiando y aprendiendo de animales y plantas. El modelo se basa en tres principios fundamentales: la naturaleza como modelo, la naturaleza como medida y la naturaleza como mentor (Benyus 1997). Es por ello que la biomímesis pretende resolver los problemas técnicos, mediante principios probados por la naturaleza durante millones de años de evolución (Vargas y Tamayo 2019).

El modelo “*Cradle to Cradle*” pone especial atención en la composición molecular de los materiales. Al final del uso de la vida del producto se hace una distinción entre dos categorías principales “Nutrientes Biológicos” y “Nutrientes Técnicos”. Dichos ciclos se representan en la Figura 3. En esta distinción se proponen dos sistemas circulares, en el ciclo biológico los materiales son capaces de volver a entrar en el ciclo medioambiental y en el ciclo técnico los materiales permanecen dentro de los ciclos industriales de circuito cerrado (McDonough y Braungart 2002). Según *Cradle to Cradle* el diseño y los sistemas de producto deben estar alineados con principios biomiméticos (Lieder y Rashid 2015).

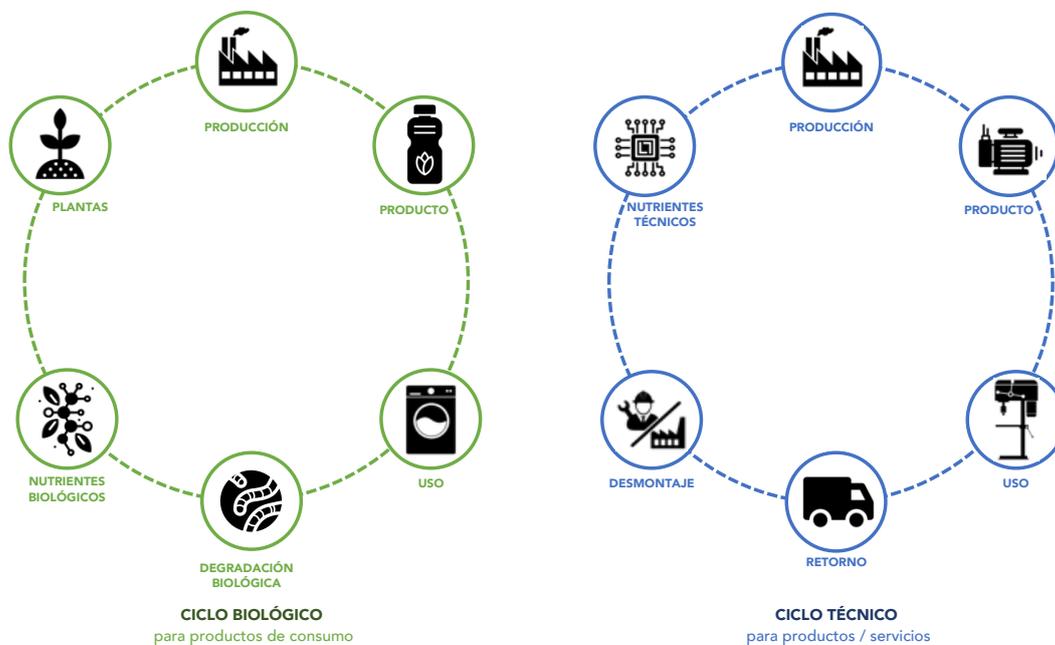


Figura 3: El ciclo biológico y el tecnológico planteado por Cradle to Cradle (adaptación propia desde McDonough y Braungart 2002).

La economía azul es ideada por Gunter Pauli para superar los retos de la generación de residuos y la escasez de recursos. Esta economía azul es estimulada por la innovación y la creatividad como parte de un espíritu de emprendedor social. El modelo económico es un cruce entre *Cradle to Cradle* y la biomímesis. Tiene un enfoque sistémico y se basa en soluciones en escala determinadas por su entorno local y las características físicas y ecológicas del ecosistema (Pauli 2011). A su vez se apoya y se nutre por teóricos como Fritjof Capra (Capra 1.996) y Luigi Bistagnino (Bistagnino 2011), entre otros.

Actualmente la CE se ha popularizado principalmente en las economías industriales por la EMF. La CE es una estrategia económica que sugiere formas innovadoras para transformar el actual sistema de consumo lineal en uno circular. De esta manera se obtiene una rentabilidad basada en el ahorro material (W. Stahel 2013); (Korhonen, y otros 2018).

A su vez, la CE propone sistemas de retorno (sistemas de producto-servicio, remanufactura y reparación), para una economía industrial restaurativa y dependiente de la energía renovable (Ellen MacArthur Foundation 2015).

3.2. JERARQUÍA DE RESIDUOS Y LÍMITES AL CRECIMIENTO

Europa está apostando por la vía de la CE, dejando claro que el futuro debe estar enfocado desde la sostenibilidad. El pacto verde presentado en 2019 ratifica la vía tomada hacia una CE eficiente en recursos. Es por ello, que el pacto verde, “*trata de una nueva estrategia de crecimiento destinada a transformar la UE en una sociedad equitativa y próspera, con una economía moderna, eficiente en el uso de los recursos y competitiva, en la que no habrá emisiones netas de gases de efecto invernadero en 2050 y el crecimiento económico estará disociado del uso de los recursos.*” (Comisión Europea 2019).

Uno de las principales elementos de la *New Green Deal* es el plan de acción para la CE presentado en 2020 (Comisión Europea 2020). Dicho plan consta de las siguientes medidas:

- Hacer que los productos sostenibles sean la norma en la UE.
- Empoderar a los consumidores.
- Centrarse en los sectores que utilizan más recursos y que tiene un elevado potencial de circularidad (Electrónica y TIC, baterías y vehículos, envases y embalajes, plásticos, productos textiles, construcción y vivienda y alimentos).
- Garantizar que se produzcan menos residuos.
- Hacer que la circularidad funcione para las personas, las regiones y las ciudades.

- Liderar los esfuerzos globales sobre la CE.

Según la Comisión Europea ampliar la escala de la CE, de los pioneros a los principales agentes económicos, contribuirá decisivamente a lograr la neutralidad climática de aquí a 2050, a desvincular el crecimiento económico del uso de recursos y garantizar la competitividad a largo plazo de la UE (Comisión Europea 2020). A su vez, dicta que la CE comienza desde el principio mismo de la vida de un producto. Tanto la fase de diseño, como los procesos de producción, tienen un impacto sobre la obtención y la utilización de los recursos a lo largo de la vida de un producto (Comisión Europea 2015).

Las jerarquías adoptadas por la EU en la directiva 2008/98/EC está alineada con una política y una gestión de residuos enfocada hacia la CE. En la Tabla 2 se pueden apreciar las estrategias de diseño para las jerarquías circulares (Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 2008); (Bakker, y otros 2014).

Tabla 2: Jerarquía para las estrategias de diseño en la extensión de la vida de producto y reciclaje.

Jerarquía	Definición (2008/98/EC)	Estrategia de Diseño
Prevención	Medidas para reducir la cantidad de residuo	Eficiencia del material Alargar la vida útil del producto
Reutilización	Utilizar otra vez un producto o algún componente para el mismo propósito para el cual fue concebido.	Reparación Renovación Remanufactura
Reciclaje	Cualquier operación de recuperación mediante el cual el producto es reprocesado en producto, material o sustancia como el originario o con otro propósito.	Reciclaje del producto/material

Por lo tanto, las rutas de recuperación de los recursos de la CE priorizan: el recambio operacional y la reducción (esto viene acorde con la prevención de residuos en la jerarquía de residuos de la EU); la recuperación (reutilización mediante reventa, reparación, remodelación, restauración, reacondicionamiento y remanufactura) y el reprocesamiento (*up-cycling*, *recycling* y *down-cycling*) (Singh y Ordoñez 2015). Esto implica

realizar un esfuerzo mayor que el que se ha realizado hasta ahora, para tener una gestión de residuos adecuada. El reciclaje no puede ser la solución para salvar el planeta, deben encontrarse mejores soluciones (Aziz, y otros 2015).

En caso de que la tendencia demográfica continúe como hasta ahora, se estima que la población mundial doblará en 2072. Esto traería como resultado la quintuplicación del PIB, con el correspondiente aumento del consumo de los recursos y la generación de residuos. Si el ratio de consumo y el ratio de reciclaje continúan como hasta ahora, podría no haber suficiente recursos para el próximo siglo (Asif, Bianchi, y otros 2012).

En *Limits to Growth*, publicado en 1972, ya se asociaba la reducción de los recursos y el aumento de la población con el aumento de consumo y la contaminación. Esta relación daba lugar a unos escenarios críticos para el futuro de la humanidad. En la Figura 4 se puede ver el escenario planteado por Meadows para el funcionamiento estándar del modelo mundial (Meadows, y otros 1972).

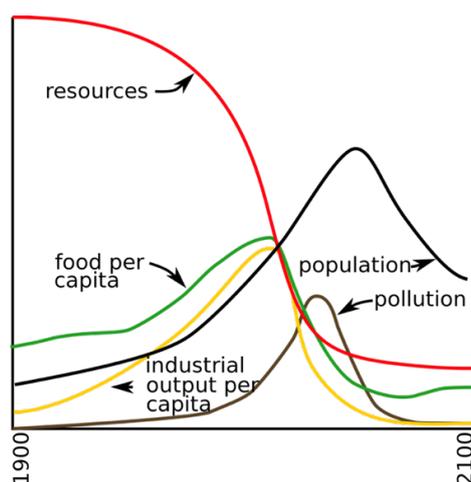


Figura 4: Escenario de la situación "Estándar" de Limits To Growth¹.

3.3. DISEÑO Y SISTEMAS CIRCULARES

El diseño y la optimización de los productos mediante la no generación de residuos, permite una reutilización eficaz de los recursos materiales, apoyándose en el desmontaje y la renovación. De esta forma, se minimizará el efecto adverso de la economía lineal. La CE aboga por la recogida selectiva y la utilización de materiales recuperados (desde consumibles hasta productos duraderos) dentro de la misma cadena de suministro (Geissdoerfer, Savaget, y otros 2017). Con estas medidas se llegará a la máxima

¹ Figura 35 (*World Model Standard Run*), pag. 124. de "The Limits to Growth".

eficiencia (material, económica y medioambiental) entre los actores de la cadena de valor, mediante la gestión colectiva y el intercambio de actividades (Singh y Ordoñez 2015); (Jagtap y Larsson 2019).

Pensar modelos de negocio para una CE está ligado con el diseño de producto, así como con la cadena de suministro (Geissdoerfer, Vladimirova y Evans 2018). Es esencial que los productos a desarrollar estén pensados desde el prisma de la CE con múltiples fases de uso. Esto incluye actividades económicamente viables de recuperación de valor, como parte de una cadena de suministro de ciclo cerrado eficiente (Lieder y Rashid 2015). Estos desarrollos son capaces de rescatar la recuperación y la reutilización en procesos sucesivos a lo largo del ciclo de vida del producto. Para ello se adoptan conceptos como el del “pasaporte del producto”, que contenga información sobre los componentes y materiales del mismo y de cómo puede ser desmontado y reciclado al final de la vida útil del producto (Comisión Europea 2015).

Dentro de una CE, los sistemas se basan principalmente en el mantenimiento, reutilización/redistribución, renovación/remanufacturación y reciclaje, mientras se minimizan la fuga de los recursos a través de la recuperación de la energía y los vertederos. Diversas fuentes de creación de valor, basadas en un modelo de negocio circular, emplean estas operaciones (The All-Party Parliamentary Sustainable Resource Group 2014); (Geissdoerfer, Vladimirova y Evans 2018).

El campo del Sistema Producto-Servicio o servitización (a partir de ahora PSS, por sus iniciales en inglés, “*Product Service System*”) emergió en el campo de la investigación a partir de 1990. Este término ha estado asociado a la prosperidad económica y la gestión sostenible de los recursos, basado en “la mezcla de productos tangibles y servicios intangibles, diseñados y combinados para satisfacer en conjunto las necesidades del consumidor final” (Tukker y Tischner 2006); (Lieder y Rashid 2015). El PSS es uno de los objetivos de la CE, en la que el producto no es propiedad del usuario, sino un servicio prestado por el uso del mismo (da Costa Fernandes, y otros 2020).

3.4. ELLEN MACARTHUR FOUNDATION

La EMF es una fundación que nace para trabajar la transición de una economía lineal a una CE. Entre los socios se encuentran grandes multinacionales como: Cisco, Google, H&M, Intesa Sanpaolo, Nike, Philips, Renault y Unilever.

Según EMF una CE es aquella que es restaurativa y regenerativa a propósito, y trata de que los productos, componentes y materias mantengan su utilidad y su máximo valor en todo momento, distinguiendo entre ciclos técnicos y biológicos. Tiene como premisa desvincular el desarrollo económico global del consumo de recursos renovables (Ellen MacArthur Foundation 2012).

Por lo tanto, según la definición de la fundación, la CE es un ciclo de desarrollo positivo continuo que preserva y mejora el capital natural, optimiza el rendimiento de los recursos y reduce al máximo el riesgo del sistema mediante la gestión de las existencias finitas y los flujos renovables. Es un sistema que funciona de manera efectiva en todas las escalas.

Los campos de actuación de la EMF se han centrado en:

- La educación.
- Empresas y gobiernos.
- El conocimiento y el análisis.

GRÁFICO 1: ESQUEMA DE UNA ECONOMÍA CIRCULAR

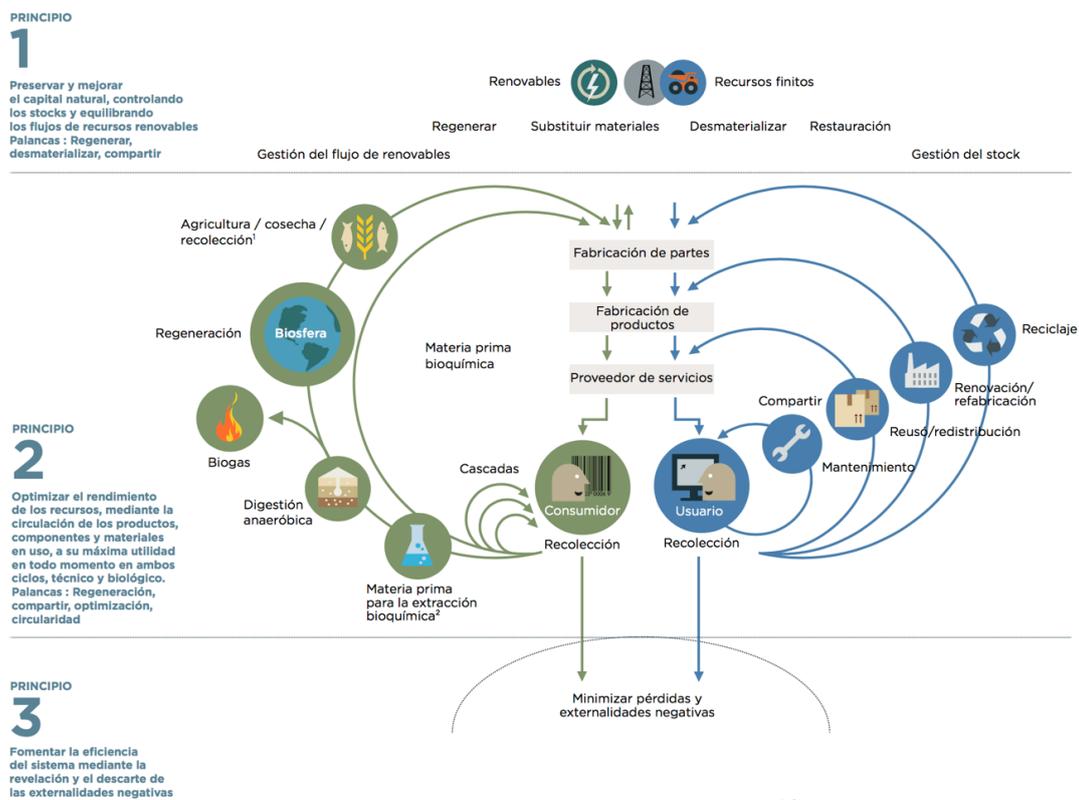


Figura 5: Gráfico de los ciclos biológicos y técnicos de CE (fuente: EMF)

La fundación ha detectado factores que indican que la economía lineal es cada vez más cuestionada y ve la necesidad de un cambio profundo en el sistema operativo de la economía actual. Entre los factores detectados se citan: las pérdidas económicas y los residuos estructurales, la volatilidad de los precios de los recursos, el riesgo de interrupciones en el suministro, deterioro de los sistemas naturales, adaptabilidad a las exigencias normativas, el avance tecnológico y la aceptación de nuevos modelos de negocio.

Los tres principios de la CE según la EMF son los siguientes (Ellen MacArthur Foundation 2015):

Principio 1: PRESERVAR Y MEJORAR EL CAPITAL NATURAL *controlando las existencias finitas y el equilibrio de los flujos de recursos renovables.*

Esto comienza mediante la desmaterialización de la utilidad, siempre que las condiciones lo permitan. Cuando se necesiten recursos el sistema circular selecciona y escoge sabiamente tecnologías y procesos basados en recursos renovables o aquellos de mayor eficiencia, siempre que esto sea posible. Una CE también mejora el capital natural mediante el flujo de nutrientes internos y creando las condiciones idóneas para la regeneración.

Principio 2: OPTIMIZAR EL RENDIMIENTO DE LOS RECURSOS *mediante la circulación de productos, los componentes y los materiales maximizando la utilidad en todo momento, tanto en el técnico como en el biológico.*

Esto implica diseñar pensando en la remanufactura, la renovación y el reciclaje, manteniendo la circulación de los componentes y los materiales en el sistema, contribuyendo constantemente a la economía. Estos sistemas circulares utilizan bucles internos más estrictos (por ejemplo, priorizando el mantenimiento en vez del reciclaje) siempre que sea posible, preservando de esta forma más energía y otros valores, tales como, la mano de obra embebida. Los sistemas circulares también maximizan el número de ciclos consecutivos y/o el tiempo de cada ciclo, mediante la extensión de la vida de los productos y optimizando la reutilización. Compartiendo una y otra vez los productos se aumentará la utilización de los mismos.

En cuanto a los nutrientes biológicos, continuarán su ciclo hacia la biosfera de forma segura para su descomposición, convirtiéndose así en materia prima para un nuevo ciclo. En los ciclos biológicos los productos son diseñados con intención de ser consumidos o metabolizados por la economía y generar un nuevo valor de los recursos. Para los materiales biológicos, la esencia de la creación de valor radica en la posibilidad de extraer un valor adicional de productos y materiales en cascada a través de otras

aplicaciones. Como en cualquier sistema lineal, se debe buscar el mejor rendimiento para cada uno de los niveles y esto requiere continuas mejoras del sistema. Pero a diferencia de un sistema lineal, uno circular no comprometerá la efectividad.

Principio 3: *PROMOVER LA EFICACIA DE LOS SISTEMAS detectando y eliminando del diseño los factores externos negativos.*

Esto incluye la reducción de daños en sistemas y áreas como la alimentación, la movilidad, la vivienda, la educación, la salud y el entretenimiento, así como la gestión de las externalidades, tales como el uso del suelo, la contaminación acuática y acústica, las emisiones de sustancias tóxicas y el cambio climático.

Los tres principios citados con anterioridad deben acompañarse por las siguientes características fundamentales:

- Los residuos se eliminan por diseño.
- La diversidad genera solidez.
- Las fuentes de energía renovables impulsan la economía.
- Se debe pensar en “sistemas”.
- Los precios u otros mecanismos de retroalimentación deben reflejar los costes reales.

Es imprescindible adaptarse a esta nueva realidad y aprender a diseñar un producto capaz de ajustarse a la CE (“productos circulares”). Para ello debe complementarse el diseño de producto con el diseño de sistemas circulares sostenibles y se deberá comprender como optimizar la vida útil del producto desde una perspectiva sostenible sin comprometer la viabilidad de la misma (Bakker, y otros 2014); (Lieder y Rashid 2015).

3.5. CIERRES CIRCULARES

Teóricamente, un producto circular debe estar preparado para reformularse infinitas veces y tener sus componentes diseñadas adecuadamente al cierre circular que más le convenga en cada momento. Para pensar un producto de esas características y resolver los problemas ambientales, las estrategias de diseño deben ir focalizadas a: la eficacia material, la extensión de la vida del producto y el reciclaje de los productos (Aziz, y otros 2015); (Bauer, y otros 2020).

Siendo muchas las complejidades que entrañan el diseño y el uso de un producto, la perspectiva de CE se puede introducir durante las primeras fases de diseño (Ruiz-

Pastor, y otros 2020). Según Ruiz-Pastor y otros, es relevante identificar y conocer el grado de circularidad al que puede llegar el producto. Esto es, cuál de las opciones es la más sostenible para la empresa.

La adaptación realizada de la CE en la actualidad tiene como foco minimizar la fuga de los recursos a través de los vertederos o la revalorización energética. Como se puede observar en la Figura 6, la jerarquía de residuos de la EU prioriza el rechazo o la no generación de residuos, frente al vertedero (Zunft y Fröhlig 2009). Debido a ello se plantea un sistema basado en el mantenimiento, la reutilización/redistribución, la renovación/remanufactura y el reciclaje. Estos sistemas están tomando mayor presencia y se está demostrando la viabilidad de modelos de negocio basados en los cierres circulares mencionados (The All-Party Parliamentary Sustainable Resource Group 2014); (Singh y Ordoñez 2015).



Figura 6: Jerarquía de residuos de la directiva EU 2008/98/CE (adaptado desde Zunft & Fröhlig, 2009).

Por lo tanto, es importante distinguir los diferentes procesos que pueden existir dentro de la CE a la hora de reintroducir un producto al mercado (Paterson, Ijomah y Windmill 2017):

- La **reparación**: reparando desperfectos pero sin garantía.
- La **reutilización**: reutilizar sin modificación alguna.
- La **restauración**: la mejora estética con mejoras de funcionalidad limitada.
- El **reacondicionamiento**: posibles ajustes para que el elemento vuelva a trabajar de nuevo.

- La **remanufactura**: serie de etapas de fabricación que actúan al final de la vida útil de un producto para producirlos como nuevos, de mejor comportamiento y con garantía.
- El **reciclaje**: extracción de los materiales como materia prima, para usarlos en nuevos productos.

De todo esto se deduce que los flujos naturales de retorno-recuperación son (Guide y Van Wassenhove 2008):

- Para el retorno del consumidor → la reparación, la reutilización, la restauración.
- Para el retorno del fin de uso → el reacondicionamiento y la remanufactura.
- Para el retorno del EoL → el reciclaje.

En la Figura 7 se puede ver los agentes que actúan en cada uno de los cierres circulares y la comparativa entre la circularidad y la economía lineal (UNEP 2020).

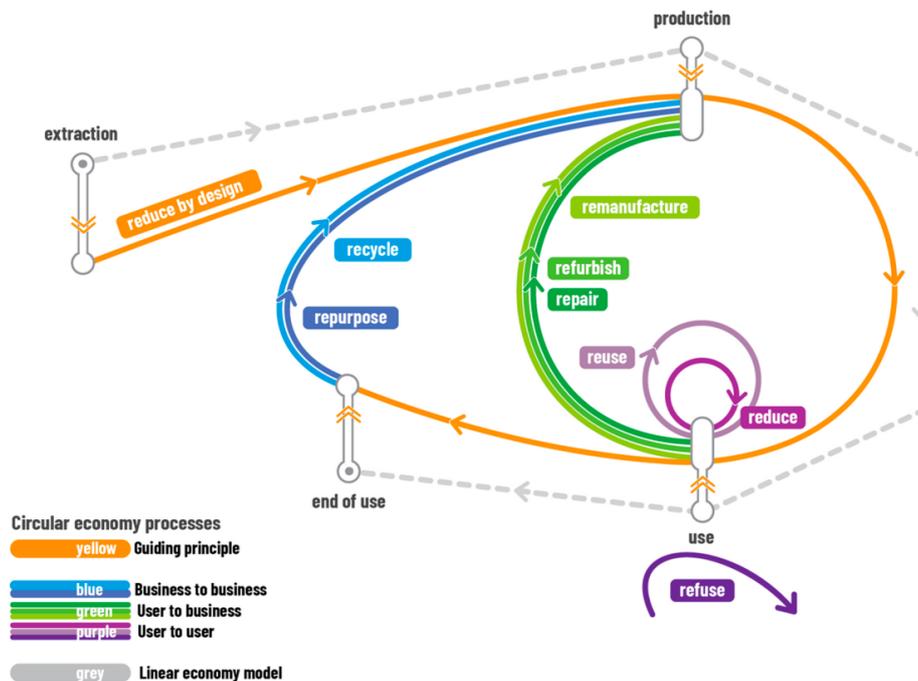


Figura 7: Cierres de la CE y que agentes actúan en diferentes cierres (UNEP, 2020).

La CE reconoce la importancia del desmontaje, la inspección, el ensamblaje y la eliminación de productos tóxicos en el diseño de los productos. En consonancia con lo anterior la CE plantea recuperar los recursos de los productos mediante rutas de recambio operacional y la prevención (esto va ligado con la jerarquía de residuos de la EU), la recuperación (mediante la reutilización, la reventa, la reparación, la remodelación, la restauración, el reacondicionamiento y la remanufactura) y el

reprocesamiento (*up-cycling*, *recycling* y *down-cycling*), en vez de mediante la valorización energética y la eliminación (Singh y Ordoñez 2015).

Cabe destacar, que a la hora de abordar el cierre de ciclo, las estrategias más exitosas hasta la actualidad han sido el reciclaje y la reutilización; a pesar de existir otras estrategias que alargan más el ciclo de vida de los productos (o de las piezas) (Lee, Hu y Lim 2020). Uno de los principales objetivos que se necesita determinar en la actualidad es: cuándo aplicar estrategias de la extensión de vida a un producto (Bakker, y otros 2014) y cuál de las estrategias es la más adecuada (Ruiz-Pastor, y otros 2020).

Para ello es imprescindible discernir y diferenciar bien cada una de las estrategias. En la Tabla 3 se observan algunas definiciones de las estrategias circulares. El caso de la remanufactura tendrá su apartado particular más adelante y se analizará con detenimiento en el apartado 6.1.

Tabla 3: Definiciones de las diferentes estrategias de cierre circular

CONCEPTO	DEFINICIONES
Reutilización	<p>El proceso de desensamblar productos para recuperar partes y conjuntos utilizables con el fin de utilizarlo en productos de nueva fabricación (Seaver 1994).</p> <p>[2] El uso adicional de un componente, una parte o un producto después de que se haya eliminado de un ciclo de servicio (Keoleian y Menerey 1993) .</p> <p>El proceso mediante el cual un limitado número de componentes son extraídos desde un producto para la recuperación (Rogers y Tibben-Lembke 1998).</p> <p>Cuando piezas o componentes se obtienen de un elemento para reparar o reconstruir otra unidad del mismo producto (REVLOG - The European Working Group on Reverse Logistic 1999).</p>
Refurbishing (Renovación)	<p>El proceso mediante el cual un producto o componente es limpiado y reparado para volver a venderlo (Rogers y Tibben-Lembke 1998); (REVLOG - The European Working Group on Reverse Logistic 1999).</p>
Reacondicionamiento	<p>El proceso de restaurar los componentes a un estado funcional y/o satisfactorio pero sin obtener las especificaciones de uso</p>

originales, utilizando métodos tales como el rejuvenecimiento, repintado, enfundado, etc. (Amezquita y Bras, Lean remanufacturing of an Automobile clutch 1996).

Remanufactura

Es un proceso industrial que recupera bienes en su fin de vida para acondicionarlos a su estado de trabajo original o mejorado (British Standard Institute 2014).

Reciclaje

El proceso por el cual materiales que de no ser así estarían destinados al vertedero son recogidos, procesados e incorporados dentro de un nuevo producto (Seaver 1994).

Proceso mediante el cual la estructura de un producto se destruye con el fin de recuperar sus materiales (Rogers y Tibben-Lembke 1998).

Serie de actividades, incluyendo la recolección, la separación, el procesamiento mediante los productos u otros materiales son recuperados desviándolos del vertedero, para reaprovecharlos en forma de materias primas en la fabricación de un nuevo producto (Paterson, Ijjomah y Windmill 2016).

Una vez observadas las definiciones en la Tabla 4, se va a ahondar y diferenciar en qué fase del ciclo está cada una de ellas. La diferencia existente entre ellas es muy amplia, por ejemplo en un proceso de reutilización el proceso más complicado será la logística inversa, mientras en un proceso de reciclaje además de la logística inversa, entran factores sobre los procesos de recuperación (químicos o físicos) y la mezcla de calidades. En el proceso de reciclaje se comienza con la recuperación de los materiales (mediante logística inversa), se seleccionan aquellos que sean aptos para ser reciclados, se limpian y diferentes procesos lo devuelven a un estado de materia prima.

Se puede afirmar que la principal diferencia entre la remanufactura y las otras estrategias de recuperación de producto, como pueden ser la renovación o el reacondicionamiento, reside en las fases de cada uno de los procesos, esto es, el nivel de profundidad de las operaciones y el tipo de mercado al que va dirigido.

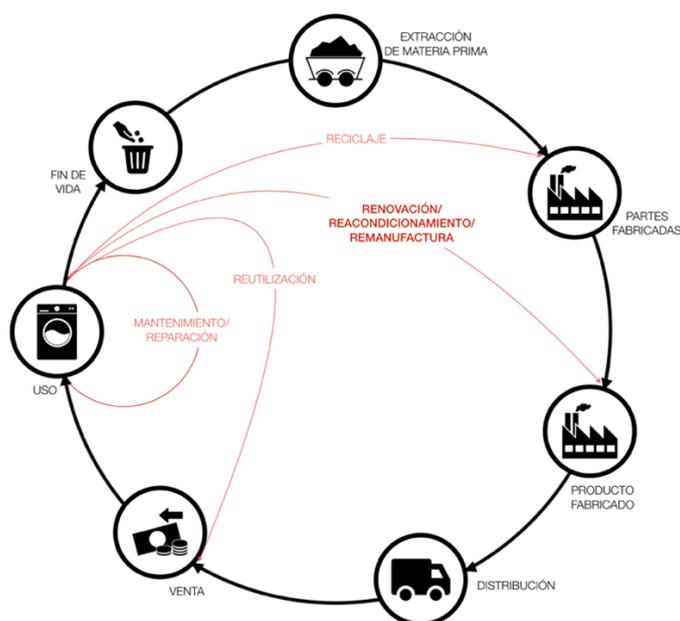


Figura 8: Diferentes cierres de ciclo (fuente: elaboración propia).

En la Tabla 4 se compara la remanufactura con las dos operaciones que más se le asemejan, la renovación y el reacondicionamiento, para poder así comprender las diferencias entre ellas.

Tabla 4: Estrategias de recuperación de producto y sus procesos.

ESTRATEGIAS DE RECUPERACIÓN DE PRODUCTO			
	RENOVACIÓN	REACONDICIONAMIENTO	REMANUFACTURA
1	Recogida	Recogida	Recogida
2	Diagnosis	Diagnosis	Diagnosis
3	Desmontaje	Inspección	Inspección
4	Reparación	Desmontaje	Desmontaje
5	Montaje	Reparación	Reparación
6	Test	Sustitución Preventiva	Sustitución Preventiva
7	Limpieza	Montaje	Montaje
8	Venta (2ª Mano)	Test	Test
9		Limpieza	Limpieza
10		Venta (2ª Mano)	Modernización
11			Venta (1ª Mano)

La renovación del producto (Figura 9): es una estrategia que además de perseguir la reutilización del producto, se centra en su mejora estética para obtener una apariencia de nuevo y poder incrementar así su valor de mercado (a partir de ahora MV, por sus siglas en inglés “*Market Value*”). La renovación incluye también el diagnóstico y la reparación del producto, en caso de que fuera detectado algún problema. Puede incluir alguna mejora funcional menor, pero su destino sigue siendo principalmente mercados de segunda mano. Las etapas que debe seguir la renovación del producto son similares a la de reutilización, sumándole la limpieza y la adecuación estética previa a su comercialización.

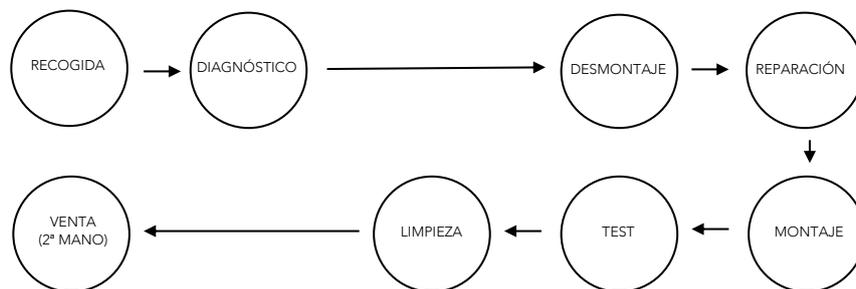


Figura 9: Procesos necesarios para la renovación de un producto (elaboración propia a partir de (Fernandez Alcalá 2016)).

El reacondicionamiento del producto (Figura 10): es una estrategia de cierre que va más allá de la renovación del producto, incluyendo una inspección en profundidad para asegurar su correcto funcionamiento, con una garantía de todo el producto, pero sin tener un estatus de producto nuevo. Las etapas que debe seguir incluyen tanto la inspección como la sustitución preventiva de aquellas piezas y componentes que, aun siendo operativas puedan plantear un problema de integridad en el corto plazo. Su destino sigue siendo el mercado de segunda mano, pero en este caso pueden competir con productos de altas prestaciones.

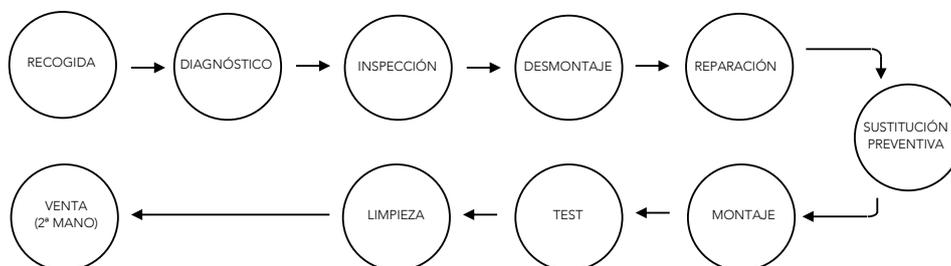


Figura 10: Procesos necesarios para el reacondicionamiento de un producto (elaboración propia a partir de (Fernandez Alcalá 2016)).

La remanufactura del producto (Figura 11): de acuerdo con Hauser y Lund la remanufactura es la estrategia de recuperación de producto más avanzada (Lund y Hauser 2008). Para Steinhilper cubre no sólo los aspectos de la renovación y el reacondicionamiento de forma conjunta, sino que persigue la modernización e incorporación de nuevas funcionalidades en el producto (Steinhilper 1998). Estas nuevas funcionalidades pueden ir desde mejoras en el diseño original derivadas del aprendizaje de la puesta en el mercado del producto (fallos frecuentes, errores en el diseño original...) hasta nuevas prestaciones y funcionalidades añadidas que son aplicables con la incorporación de nuevos componentes. Esta etapa adicional se suele aplicar en la fase final del proceso de recuperación.

El resultado es un producto con iguales o mejores prestaciones que el original y las mismas garantías que un producto nuevo, pudiendo introducirse así en el mercado de primera mano (Sitcharangsie, Ijiomah y Wong 2019).

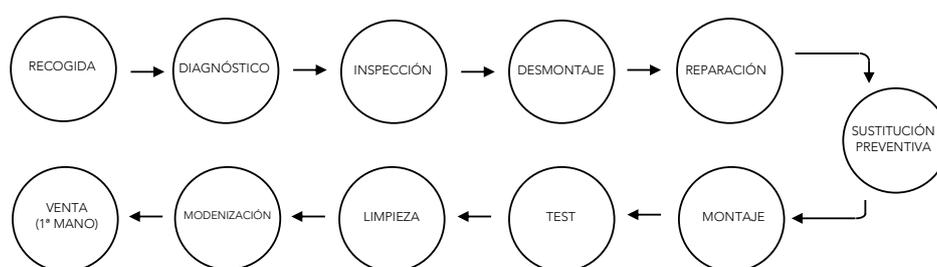


Figura 11: Procesos necesarios para la remanufactura de un producto (elaboración propia a partir de (Fernandez Alcalá 2016)).

Con el análisis de los cierres circulares se detecta la necesidad existente de diseñar los productos en base a las características de dichos cierres. Para ello, se deben dejar de lado estrategias de mercado contrarias a la reutilización de los productos, como pueden ser la obsolescencia programada o la mezcla de materiales que no se pueden separar. Para diseñar productos con el menor impacto ambiental, existen estrategias como el ecodiseño, imprescindible a la hora abordar la CE.

3.6. ECODISEÑO

El ecodiseño (o el diseño ecológico, como se conoce en EEUU) tiene sus raíces a finales de la década de los 80, principalmente debido a la evidencia de que las tecnologías no iban a resolver las causas principales de los problemas ambientales, es decir, la escasez de recursos y la contaminación (Hübner 2012).

Al inicio de la década de los 90 el ecodiseño va tomando más fuerza y en 1992 la *Industrial Designer Society of America* establece por primera vez los 12 principios del diseño ecológico (IDSA 1992). En la Tabla 5 se pueden ver los 12 principios establecidos.

Tabla 5: Principios del diseño ecológico

Principios del diseño ecológico de IDSA

1. Durables
2. Fáciles de reparar
3. Diseñados para que puedan ser remanufacturados
4. Diseñados para que puedan ser reusados
5. Uso de materiales reciclados
6. Uso de materiales comúnmente reciclables
7. Simples para poder separar los componentes reciclables de un producto de los componentes no reciclables
8. Eliminación de componentes tóxicos/problemáticos de un producto o hacer que sea fácil reemplazarlos o separarlos antes de desecharlos
9. Hacer productos más eficientes (tanto energéticos como en el uso de recursos)
10. Usar el diseño de productos para educar sobre el medio ambiente
11. Trabajar hacia el diseño de productos que introduzcan una reducción de recursos
12. Ajustar el diseño del producto para reducir el empaquetado.

Por lo tanto, en consonancia con dichos principios, el ecodiseño puede reducir el uso de los recursos. Esto se da mediante la mejora de la reparabilidad y la durabilidad de los productos; aumentando la reciclabilidad de materiales minimizando el uso de sustancias peligrosas, y también aumentando la eficiencia energética de los procesos de producción o la fase de uso de productos y servicios. En paralelo, en Europa se estaba promoviendo la etiqueta ecológica europea (actualmente vigente), un esquema voluntario para fomentar a las empresas a comercializar productos y servicios más respetuosos con el medio ambiente. Aquellos que obtenían la etiqueta, tenían como distintivo la flor europea (Figura 12). Además, la integración de los aspectos del ecodiseño y del ciclo de vida en las normas ISO, integradas todas ellas dentro de la familia ISO 14000.

A su vez, con el cambio de milenio se empiezan a promover las directivas europeas de ecodiseño para productos eléctrico electrónicos (Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 2005); (Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 2009). A partir de la directiva de residuos (Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 2008) la línea del ecodiseño tendrá mayor presencia y se irán incluyendo en las modificaciones de las

directivas sobre residuos, envases, aparatos eléctrico electrónicos y vehículos al final de su vida útil integrando conceptos de ecodiseño.



Figura 12: Imagen del distintivo de la etiqueta ecológica europea.

Karlsson y Luttropp definen el ecodiseño como un concepto que integra aspectos multifacéticos de diseño y consideraciones ambientales (Karlsson y Luttropp 2006). Esto cubre un amplio espectro de diseño, tanto aquel que está orientado hacia la producción y el producto, como aquel más orientado a la solución (Andersen y Tukker 2006).

Incorporar conceptos ambientales en la etapa de diseño ayudará a reducir el impacto ambiental del producto. Hay que tener en cuenta que en la etapa de diseño se toman las decisiones más relevantes del producto; esto equivale que en esa etapa se definen entre el 60% y el 80% de los impactos de dicho producto (Hübner 2012). Para que la reducción de impacto ambiental sea efectiva se debe tener en cuenta el ciclo de vida completo de un producto.

El principio de ciclo de vida es un enfoque subyacente a todos los conceptos del ecodiseño (Margallo, Domiguez-Ramos y Aldaco 2019). Esto implica conectar el diseño de un producto con la extracción de materias primas, la producción, el transporte, el uso y la eliminación, intentando minimizar los impactos ambientales a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida (Ihobe 2000).

La directiva europea de ecodiseño distingue seis etapas: "...los aspectos ambientales deben identificarse con referencia a las siguientes etapas del ciclo de vida del producto: (a) selección y uso de materia prima; (b) fabricación; (c) embalaje, transporte y distribución; (d) instalación y mantenimiento; (e) uso; y (f) fin de vida útil, lo que significa el estado de un producto que ha llegado al final de su primer uso hasta su disposición final" (Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 2009). Está

distinción puede deberse al hecho, que dicha directiva está enfocada a aparatos de energía, en los que la instalación y el mantenimiento tienen especial relevancia, y diferenciar así la parte del impacto correspondiente al consumidor y la del fabricante.

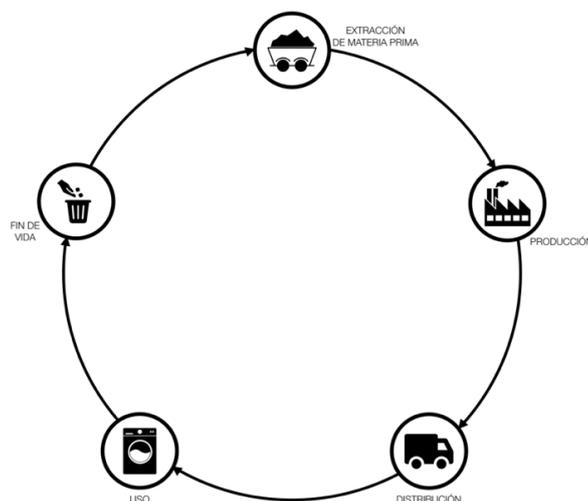


Figura 13: Las etapas del ciclo de vida de un producto (Fuente: elaboración propia a partir de Ihobe)

Para llevar a cabo una interpretación de los impactos ambientales de un producto se completa la metodología de LCA. El LCA es una metodología para evaluar los impactos ambientales asociados a lo largo de todas las etapas del ciclo de vida de un producto, proceso o servicio. De acuerdo con las normas ISO 14040 e ISO 14044, el LCA se lleva a cabo con cuatro fases distintas como se puede ver en la Figura 14 (International Standard Organization 2006); (International Standard Organization 2006). Las fases del LCA son las siguientes:

- La fase de definición del objetivo y el alcance.
- El análisis de inventario de ciclo de vida (a partir de ahora LCI, por sus siglas en inglés “*Life Cycle Inventory*”).
- La evaluación del impacto ambiental (a partir de ahora LCIA, por sus siglas en inglés “*Life Cycle Impact Assessment*”).
- La fase final de la interpretación.

Como aparece ilustrado en la Figura 14 las fases suelen ser interdependientes, ya que habitualmente los resultados de una fase informan de cómo se completan las otras fases.

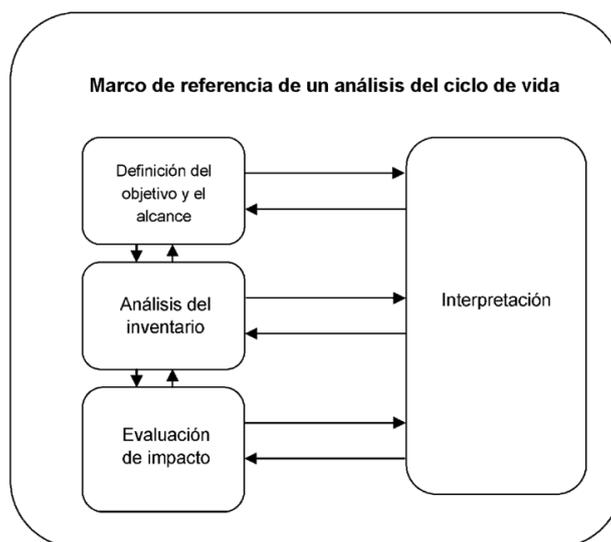


Figura 14: Las fases del LCA definidas en la ISO 14040 e ISO 14044

A continuación se realizará una breve explicación de cada apartado para que se comprenda el contexto en el que se va a trabajar, pero se profundizará sobre dichos aspectos en el Capítulo 5 del presente documento.

El estudio debe comenzar con la declaración del objetivo y el alcance del sistema. En la misma se deberá establecer un contexto del estudio y a quien se le va a comunicar. La ISO 14006 definen dicho con alcance con unos aspectos técnicos y deben ser coherentes con la aplicación prevista. Esta fase incluye los límites del sistema y el nivel de detalle. La profundidad y amplitud del LCA puede diferir considerablemente dependiendo del objetivo de la misma. (International Standard Organization 2006)

El LCI implica la creación de un inventario de flujos que comienzan en la naturaleza y terminan en la misma. Esto se entiende al concretar que los flujos del inventario incluyen entradas de agua, energía y materias primas, y emisiones al aire, tierra y agua. El desarrollo del inventario se realiza mediante la construcción de un modelo del flujo del sistema técnico, alimentado con los datos de entradas y salidas. Los datos de entrada y salida necesarios para la construcción del modelo se recopilan para todas las actividades dentro de los límites del sistema, incluso de la cadena de suministro. (International Standard Organization 2006)

Los datos del sistema definido y del LCI se verán reflejados en los impactos del LCIA. Esta fase del LCA tiene como objetivo proporcionar información adicional para ayudar a evaluar los resultados del LCIA de un sistema del producto a fin de comprender mejor su importancia ambiental. Para ello se debe: seleccionar las categorías de impacto con

las que se va a trabajar y los modelos de caracterización y finalmente la medición del impacto. El factor de caracterización es aquel que se aplica para convertir el resultado del análisis del LCI asignado a la unidad común de los indicadores. (International Standard Organization 2006)

Esto dará como resultado el valor en las categorías de impacto que se hayan seleccionado, a lo largo de cada una de las fases del ciclo de vida. En la fase final de la interpretación se resumen y discuten los resultados del LCI y LCIA como base para las conclusiones, recomendaciones y toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y el alcance definidos (International Standard Organization 2006). La interpretación se basa en una técnica para identificar, cuantificar, verificar y evaluar la información de los resultados del inventario de ciclo de vida y de la evaluación del impacto ambiental.

Una vez estudiada la CE con sus cierres de ciclo y la importancia que tiene el diseño a la hora de crear un producto, se comprende la necesidad de profundizar en la relación entre los cierres de ciclo y el LCA. Para ello se va a profundizar en comprender en su totalidad uno de los cierres de ciclo más relevantes, como es la remanufactura, para después continuar con la integración de un cierre de ciclo junto con el LCA.

4. LA REMANUFACTURA COMO CIERRE DE CICLO

En este apartado se profundiza sobre los diversos aspectos de la remanufactura. Después de la introducción se analiza la definición de la remanufactura para continuar con el proceso y los agentes que actúan en la misma. A partir del punto 4.5. se introducen datos y estadísticas de los beneficios, motivaciones y las barreras que encuentra la remanufactura. En el último punto se analizan los factores de diseño dentro de la remanufactura.

4.1. INTRODUCCIÓN

Un producto con múltiples ciclos de vida (a partir de ahora MLP, por sus siglas en inglés “*Multiple Lifecycle Product*”) debe estar contemplado desde el mismo diseño y la estrategia a desarrollar, teniendo en cuenta la conservación de la energía, materiales y añadiendo valor a la prevención de residuos y la protección ambiental (Lieder y Rashid 2015). La adopción del concepto MLP contiene dichas estrategias y a su vez, podría no crear conflictos con intereses económicos y a su vez traer avances estratégicos beneficiosos (Asif, y otros 2015). Por ejemplo, se estima que la remanufactura de los alternadores y motores de arranque en el sector de la automoción ahorran entre un 88% y 89% de energía comparado con uno de nueva fabricación, respectivamente (Steinhilper 1998). En estudios similares Shuterland y otros han concluido que un motor de coche remanufacturado podría llegar a ahorrar hasta un 90% de energía (Sutherland, y otros 2008). Finalmente Lund y Hauser (Lund y Hauser 2008) declaran que en general, mediante la remanufactura, se puede llegar a ahorrar un 80% de energía y material.

En este contexto de CE, la circularidad de los productos exige un bucle cerrado, donde se dé una logística inversa². Hoy en día existen ciertas incertidumbres en el proceso de devolución de los productos, ya sean de calidad, de cantidad y/o de tiempo, siendo estos los principales inconvenientes en la implantación exitosa de los sistemas de bucle cerrado. Sin embargo, estas incertidumbres son características del paradigma existente de la fabricación industrial, donde los productos no han sido producidos pensando en un bucle cerrado. En este contexto en el que los principales modelos de negocio pueden entrar en conflicto con un sistema de bucle cerrado, se debe hacer hincapié proponiendo desarrollos coordinados en el diseño de producto, la cadena de

² La logística inversa es la gestión de los materiales desde el usuario o consumidor hacia el fabricante o hacia los puntos de recogida, para que sean gestionados por un reutilizador o por el gestor de residuos.

suministros, el modelo de negocio y estrategias de fabricación innovadoras (Rashid, y otros 2013).

Por lo tanto, a la hora de plantear una metodología o soluciones ligadas a cierres circulares se deberán contemplar los siguientes parámetros:

- Los sistemas de cierre circular más adecuados para cada parte del producto.
- La evolución del cambio de consumo energético en los nuevos productos (conservación de la energía).
- Las actualizaciones tecnológicas de la industria.
- Los materiales utilizados no deberán ser tóxicos (ecodiseño).
- Un diseño adecuado para el desmontaje.
- Opciones de reciclaje (o *up-cycling*) de las partes/materiales a desechar.

La rapidez de cambios que se dan en el diseño de algunos productos o las actualizaciones tecnológicas, ha incrementado la producción de varios tipos de producto, como puede ser el caso de las telecomunicaciones. Uniendo lo anterior a la variación constante de la moda se tiene como resultado una gran cantidad de desechos generados por la obsolescencia de los productos. Las consecuencias de esa velocidad de actualización tienen como consecuencia un aumento del impacto ambiental y mayores niveles de contaminación. Estas consecuencias se dan por el aumento de consumo en materias primas y energía. Por lo tanto, es imprescindible tener en cuenta la implementación de la co-responsabilidad y la componente sostenible a lo largo de todo el ciclo de vida del producto y no sólo focalizado en el diseño para el fin de vida (a partir de ahora EoL, por sus iniciales en inglés “*End of Life*”) y el reciclaje de los productos (Aziz, y otros 2015).

A la hora de diseñar un producto pensado en la CE se debe perfilar la diversidad de escenarios aplicables al producto y pensar cuál es el mejor escenario para cada producto (Kama 2014). La diversidad de estos escenarios son el reciclaje, la reutilización, la renovación (software o hardware), la remanufactura o el reaprovechamiento de ciertas partes. El modelo de diseño puede diferir mucho para cada uno de esos escenarios (Kirchherr, Reike y Hekkert 2017). La naturaleza del producto tiene intrínseca las características de diseño y la vida útil de la misma. Cabe destacar la importancia de la variación temporal a la hora de re-manufacturar un producto; esto se debe a que según avanza el tiempo se dan progresos tecnológicos, mayores deterioros, cambios de diseño-moda, etc. (Minjung y Harrison 2016).

4.2. REMANUFACTURA

Es esencial para las empresas manufactureras el desarrollo de nuevos modelos de negocios innovadores y adaptados al contexto de la CE. Esto implica repensar las alianzas que puedan permitir nuevos modelos de negocios colaborativos (Copani y Behnam 2020). En la práctica esto puede significar la incorporación de actividades como la remanufactura, conocida por ser económicamente beneficiosa (Lieder y Rashid 2015); (Atasu, Sarvary y Van Wassenhove 2008).

La remanufactura es el proceso de restaurar un producto descartado y comercializarlo como si fuera nuevo, dándole una nueva vida (Boorsma, y otros 2020). Tiene como objetivo ser mejor opción que un producto de nueva fabricación, tanto desde el punto de vista ambiental como por rentabilidad económica (Guidat, y otros 2014). Debido a la reutilización de ciertas partes se puede producir el mismo producto a un coste menor. En cuanto a los impactos medioambientales adversos, pueden ser paliados gracias a producir menos residuos, reutilizar recursos y consumir menos energía en los procesos productivos normales (Aziz, y otros 2015).

Puede haber productos que debido a sus características intrínsecas no sean aptos para la remanufactura. Otros muchos productos en cambio, aun siendo aptos para la remanufactura, actualmente se desconoce su potencial, teniendo como resultado una pérdida de su efectividad (Aziz, y otros 2015). A excepción de algunos productos de alto valor con bajos cambios tecnológicos, de moda y tendencias en los que la remanufactura está bien establecida (máquinas de movimientos de tierra, turbinas o motores eléctricos); por lo general la remanufactura no está bien asentada (Zlamparet, y otros 2017); (Singh y Ordoñez 2015); (The All-Party Parliamentary Sustainable Resource Group 2014). Por lo tanto, hay sectores que históricamente han trabajado la remanufactura, mientras otros sectores no tienen tanta experiencia en dicha actividad. El sector de automovilístico tiene una amplia experiencia en la renovación de sus productos mediante la remanufactura (Lindhal, y otros 2006). En cambio, en los sectores de los ordenadores o los teléfonos móviles esta actividad se está desarrollando en la actualidad.

La clave para que la remanufactura sea exitosa, puede estar en la innovación de los procesos, en la cadena de suministro inversa y en el cambio de modelo de negocio (por ejemplo, la venta de producto por servicio prestado) (Copani y Behnam 2020). Bras y McIntosh sugieren que “volver a fabricar presenta fundamentalmente un nuevo conjunto de desafíos a los cuales los productores no están preparados para hacer frente.” (Bras y McIntosh 1999); (Hatcher, Ijiomah y Windmill 2011).

La remanufactura adquiere relevancia en una industria enfocada a los servicios. Desde la década de los 90 viene investigándose el campo del PSS. El PSS suele asociarse a la prosperidad económica y la gestión sostenible de los recursos, usando “una mezcla de productos tangibles y servicios intangibles, diseñados y combinados para satisfacer en conjunto las necesidades del consumidor final” (Copani y Behnam 2020); (Tukker y Tischner 2006). Sin embargo, no todos los PSS contribuyen necesariamente a la CE (Blomsma, y otros 2018). El PSS puede provocar una serie de efectos rebote, tales como un mayor consumo debido a un acceso más fácil de los productos o la venta de productos reutilizados a un precio más bajo (da Costa Fernandes, y otros 2020).

Por lo tanto, algunas de las claves para que la remanufactura se pueda instaurar con éxito son (Duberg, y otros 2020):

- Tener un volumen de *cores*³ lo suficientemente grande para que sea rentable.
- El producto debe estar pensado desde el diseño para la remanufactura (a partir de ahora DfRem, por sus siglas en inglés de “*Design for Remanufacturing*”).
- Realizar una transición en el modelo de negocio, hacia uno de servicios.
- Una cadena de suministros inversa bien estructurada.

La EU, en su afán por una transición hacia una CE ha publicado varias directivas para cambiar el ratio de los materiales y la utilización de los productos para reducir su impacto ambiental. Ejemplos tales como Residuos de Aparatos Eléctricos y Electrónicos (WEEE, por sus siglas en inglés “*Waste Electric & Electronic Equipment*”) (Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 2003), Restricción de Uso de Sustancias Peligrosas (RoHS, por sus siglas en inglés “*Restriction of Hazardous Substance Directive*”) (Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 2003), Política Integrada de Producto (IPP, por sus siglas en inglés “*Integrated Product Policy*”) (Comisión Europea 2003) y directivas para responsabilizar al productor como puede ser la de vehículos (Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo 2000).

A pesar de que la remanufactura no es una nueva actividad, todavía existe confusión con los términos relativos a la misma. Es por ello esencial, identificar y clarificar la terminología de los escenarios de recuperación de los productos, tanto en la academia como en la industria (Tabla 6). Por ejemplo, es habitual el uso del término renovación (más conocida como “*refurbishment*”) cuando se quiere decir remanufacturación

³ Artículos recuperados para la remanufactura.

(Lindhal, y otros 2006). La falta de una terminología adecuada contribuirá al empobrecimiento de la investigación.

Tabla 6: Conceptos base y alternativos utilizados tanto en la academia como en la industria.

Conceptos de Modelo	Conceptos académicos e industriales alternativos
Proveedor de la función	Producto, Core
Proveedor de la subfunción	Producto, Parte, Repuesto, Componente, Core, Módulo
Fabricación	Producción
Gestión de la recuperación	Cadena de suministro de ciclo cerrado, Logística inversa
Remanufacturación	Refurbishment, Reprocesamiento, Reacondicionamiento.

4.3. DEFINICIÓN DE LA REMANUFACTURA

Para aclarar el significado de la remanufactura y tener claro a qué se refiere cuando se habla de remanufactura se ha realizado un análisis de las definiciones existentes en torno a la remanufactura. Partiendo de ese análisis, se seleccionará o adecuará la más completa.

Según el **BSI Estándar: BS 8887-2:2009** (British Standard Institute 2009):

La remanufactura es devolver un producto usado a su estado original, con una garantía equivalente o superior a la de un producto nuevo.

NOTA 1: Desde el punto de vista del usuario el producto se considerará como un “producto nuevo”

NOTA 2: Respecto a la remanufactura:

El esfuerzo de la fabricación implica, desmontar el producto, restaurar y sustituir componentes, testear tanto partes individuales, como la totalidad de la misma y asegurar que cumplen con las especificaciones de diseño originales.

Se espera que el producto después de haber sido remanufacturado, al menos responda las especificaciones de actuación originales.

Cualquier garantía posterior deberá como mínimo, igualar la garantía de un producto nuevo.

NOTA 3: Se da por sentado que la remanufactura es aplicada a productos iguales.

En cuanto al *European Association of Automotive Suppliers* (CLEPA) junto con la *Automotive Parts Remanufacturers Association* (APRA) definen la remanufactura de las piezas como (APRA Europe 2010):

Una pieza remanufacturada satisface una función equivalente o mejor que un producto original. Esto se realiza partiendo de una pieza usada (Core), utilizando procesos lineales estandarizados mediante especificaciones técnicas específicas. Una pieza remanufacturada debe tener la misma garantía que una pieza nueva, y debe estar claramente identificada qué pieza y por quién ha sido remanufacturada.

La *US International Trade Commission* da la siguiente definición de la remanufactura (United State International Trade Commission 2012):

La remanufactura es un proceso industrial que recupera bienes en su EoL para acondicionarlos a su estado de trabajo original o mejorado.

La definición de PAS3100 para una parte remanufacturada del sector de la automoción es la siguiente (British Standar Institute 2014):

Pieza que ha sido restaurada para su funcionamiento original teniendo en cuenta la forma, su posición, materiales y la actuación a lo largo de su vida. En la remanufactura se aplica una secuencia de etapas y procesos pre-identificadas para componentes y ensamblajes.

Finalmente y sin desdeñar las definiciones anteriores, se dará por óptima la siguiente definición de la remanufactura definida por *The Center for Remanufacturing and Reuse* (The Centre for Remanufacturing and Reuse (CRR) 2016), debido a que contiene todas las claves de la misma en dos frases:

Este proceso supone el desmontaje, la restauración, la sustitución de componentes y el montaje, realizando las pruebas de chequeo tanto en piezas individuales como en el producto entero para asegurar que cumple con las especificaciones originales. Se espera que el rendimiento del producto después de haber sido remanufacturado, al menos responda las especificaciones de actuación originales.

4.4. EL PROCESO DE LA REMANUFACTURA

A la hora de realizar un producto remanufacturado, es importante contemplar otras variables, como pueden ser la cuota de mercado y la tipología de producto para saber si realmente es rentable remanufacturar dicho producto o se debe focalizar en otras de las estrategias circulares donde aporte mayor beneficio ambiental, social y económico.

El proceso industrial de la remanufactura tiene las siguientes etapas (Figura 11): la recogida del *core*, la diagnosis, la inspección, el desmontaje, la reparación, la sustitución preventiva, el montaje, testear si está bien, la limpieza, la modernización y finalmente la devolución al mercado. Aunque puede que dependiendo del producto pueda variar el orden o no sean necesarias todas las etapas (Boorsma, y otros 2020).

La peculiaridad de la remanufactura reside en el nivel de complejidad y exhaustividad a la cual se llega en el proceso, ya que se realiza un desensamblaje completo de los componentes y se desmonta el producto hasta el mínimo nivel. Este nivel de desensamblaje permite limpiar, inspeccionar, reparar o reemplazar y evaluar cada uno de los componentes independientemente. Todas estas etapas se realizan en un circuito de bucle o ciclo cerrado, tal y como se puede observar en la Figura 15.

En este nivel, la inspección es una etapa clave para seleccionar si se repara alguna de las piezas o si se realiza una sustitución preventiva en aquellos componentes que estén dañados o a punto de fallar. El objetivo de la limpieza es eliminar toda la suciedad que hubiera acumulado la pieza mientras estuvo en funcionamiento, para que ésta (partículas, resinas, lubricantes, etc.) no condicione el óptimo desempeño del producto. Dependiendo de tamaño, la función, particularidades de la pieza, etc. puede llegar a ser un proceso muy complejo.

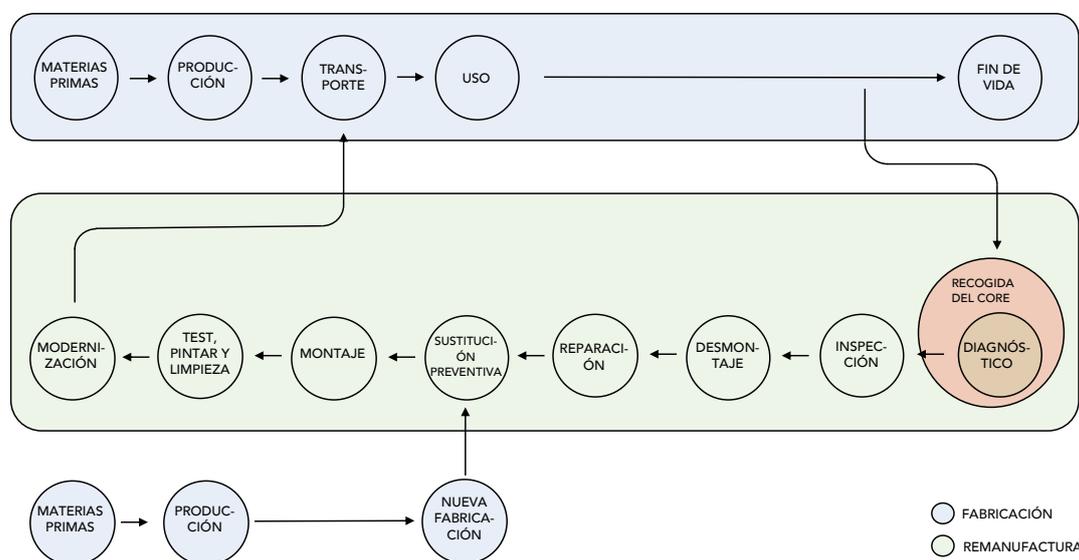


Figura 15: El proceso completo de ciclo cerrado de la remanufactura (elaboración propia).

La modernización del producto se incluye en los procesos de remanufactura. Esta etapa implica incluir alguna mejora respecto al producto original. De esta manera el producto remanufacturado ofrece mayores prestaciones que el producto original. Por ejemplo en

el caso de motores eléctricos, incorporar un aislante mayor de fibra de vidrio que evite el sobrecalentamiento de la bobina sería una mejora sustancial.

Finalmente, el producto se vuelve a ensamblar y se evalúa de acuerdo con las especificaciones del diseño original. De esta manera el producto remanufacturado es “igual” que uno nuevo, con las mismas prestaciones, la misma garantía (o mayor) y puede acceder a la venta en un mercado de primera mano.

Lo anteriormente citado no se puede comprender sin la labor de los usuarios. Existen diferentes alternativas en el que los usuarios puedan depositar los productos en ciertas plataformas de retorno como pueden ser los centros de remanufacturación, la introducción de PSS o el *leasing* del producto (Aziz, y otros 2015).

Por lo tanto, con la remanufactura se consigue dotar de valor a algo que se podía haber considerado inicialmente un residuo. De esta manera se consigue alargar el ciclo de vida de un producto, prolongando así su vida económica y obtener mayor rentabilidad económica y ambiental de la misma, de tal manera que el reto de la remanufactura es convertirse en una alternativa real para la eficiencia de los recursos en la industria manufacturera. Para ello ofrece soluciones basadas en la conservación de los componentes y los materiales del producto, alarga el uso del producto y reduce el uso energético de las mismas, así como las emisiones al aire y al agua (por ejemplo CO₂ y SO₂) (European Commission 2015).

Como se detalla en la Figura 7, la remanufactura entra en juego cuando el producto deja de funcionar o se desecha. Esta forma de trabajar conlleva algunos problemas: como la dudosa calidad de los producto/componentes y la incertidumbre de recuperarlas en un plazo óptimo para su renovación (Asif, Bianchi, y otros 2012).

4.5. AGENTES QUE ACTUAN EN LA REMANUFACTURA

En Europa, en el ámbito de la remanufactura, no se promueven actividades que faciliten la transferencia de conocimiento entre diferentes sectores para una industria remanufacturera fuerte. En cambio, en la industria del reciclaje sí se promueven ese tipo de actividades. De la misma manera, los mayores competidores (EEUU y China) tienen ambos una visión común y estratégica de la remanufacturación, mientras Europa podría perder competitividad frente a esas economías más organizadas. Por lo tanto, la remanufactura es una necesidad real (European Commission 2015). En la

A su vez, en la Tabla 8 se puede observar el reparto de la remanufactura entre países europeos, donde cuatro estados realizan aproximadamente el 70% de la remanufactura:

Alemania, Reino Unido, Francia e Italia. Esto se debe en gran medida a la distribución del sector aeroespacial en Europa: Alemania, Francia y Reino Unido son los principales núcleos de mantenimiento, reparación y revisión global de la industria aeroespacial. A Italia, en cambio, esta tradición remanufacturera le viene debido a su tradición automovilística.

Tabla 7 se pueden observar los principales sectores y actividades de la remanufactura en la EU.

A su vez, en la Tabla 8 se puede observar el reparto de la remanufactura entre países europeos, donde cuatro estados realizan aproximadamente el 70% de la remanufactura: Alemania, Reino Unido, Francia e Italia. Esto se debe en gran medida a la distribución del sector aeroespacial en Europa: Alemania, Francia y Reino Unido son los principales núcleos de mantenimiento, reparación y revisión global de la industria aeroespacial. A Italia, en cambio, esta tradición remanufacturera le viene debido a su tradición automovilística.

Tabla 7: Principales sectores y actividad remanufacturera en la EU, (CE, 2015).

SECTORES	Beneficio (1.000 M€)	Firmas	Trabajadores	Core	Intensidad ⁴
Aeroespacial	12,4	1.000	71.000	5.160.000	11,5%
Automoción	7,4	2.363	43.000	27.282.000	1,1%
EEE	3,1	2.502	28.000	87.925.000	1,1%
Mobiliario	0,3	147	4.000	2.173.000	0,4%
HDOR Equipamiento de máquinas externas	4,1	581	31.000	7.390.000	2,9%
Máquina Herramienta	1,0	513	6.000	1.010.000	0,7%
Marítimo	0,1	7	1.000	83.000	0,3%
Equipamiento médico	1,0	60	7.000	1.005.000	2,8%
Ferrovionario	0,3	30	3.000	374.000	1,1%
TOTAL	29,8	7.204	192.000	132.405.000	1,9%

Es crucial que Europa apueste por la remanufactura de una manera más contundente. En esta era tan competitiva, unido a la promoción de la EC y la importancia del sector industrial en la economía, la reamufactura puede ser una buena aliada para los problemas de empleo generados en la última década. El sector manufacturero es el que más empleo genera y mayor contribuye con el PIB de las naciones industrializadas (en

⁴ Valor total de los envíos de bienes remanufacturados sobre el % de las ventas totales del sector.

la eurozona EU-27, 34 millones de personas contribuyen sobre el 14,5% del PIB total), por lo tanto es un aliado indispensable para el bienestar y el crecimiento. A su vez es un sector que consume una gran cantidad de material y energía y genera una gran cantidad de desechos. En 2010 la EU-28 generó 2.538 millones de toneladas de residuos (Eurostat 2016).

Si se analizan los sectores de mayor incidencia en la generación del residuo, la construcción estaría entre lo más altos con un 36,4% y representado por 923,8M de toneladas, seguido de la industria extractiva con un 25,3% y 642,1M de toneladas. Las manufactureras representaron 261,4M de toneladas, con una participación del 10,3%. Los servicios de agua y residuos generaron 253,8M de toneladas de residuos el 10,0 % y los hogares el 8,5 % con 215,7M de toneladas. El 9,5 % restante correspondió a residuos procedentes de otras actividades económicas, principalmente servicios 4,6 % y energía 3,1% (Eurostat 2016).

Tabla 8: Reparto de la industria remanufactura (en millones de €) entre los países de la EU (EC, 2015).

BENEFICIOS	Benelux ³	Central ⁴	Este ⁵	Francia	Alemania	Italia	Mediterráneo ⁶	Nórdico ⁷	UK e Irlanda	TOTAL
Aeroespacial	389	399	513	2.311	3.814	1.127	816	368	2.698	12.436
Automoción	395	652	692	754	2.370	699	790	273	766	7.393
EEE	111	230	578	355	646	592	311	106	190	3.188
Mobiliario	10	16	52	24	66	66	23	18	34	310
HDOR	160	227	343	633	1.108	541	380	242	509	4.142
Máquina Herramienta	44	45	81	108	336	199	70	53	90	1.026
Marina	11	2	15	3	11	8	13	5	6	76
Equipamiento médico	36	70	104	112	316	61	68	83	121	971
Ferrovionario	11	46	41	22	61	39	48	27	49	343
TOTAL	1.167	1.687	2.420	4.322	8.728	3.333	2.519	1.173	4.463	29.813

Según el manifiesto “*For a Resource Efficient Europe*” (European Commission 2012): “... En un mundo con una creciente presión sobre los recursos y el medio ambiente, la EU no tiene más remedio que realizar una transición hacia una economía regenerativa circular, eficiente en recursos, generando empleo y competitividad. Siendo el principal importador de recursos, debemos depender de nuestra capacidad para obtener un valor añadido y lograr un desacoplamiento total, a través de un cambio sistémico en el uso de los recursos y la recuperación de la economía”.

Según Lund, dependiendo del sujeto responsable de realizar el proceso de remanufactura, se pueden encontrar tres tipos diferentes escenarios de remanufactura (R. Lund 1984); (E. Sundin 2004); (Fernandez Alcalá 2016):

- **FABRICANTES DE EQUIPOS ORIGINALES** (a partir de ahora OEM, por sus iniciales en inglés “*Original Equipment Manufacturer*”): en este caso es el creador original del producto el que se encarga de realizar la remanufactura. Por consiguiente, tendrá acceso a todo lo relacionado con el producto, diseño, especificaciones técnicas para el control de calidad, comercialización, etc.
- **REMANUFACTUREROS CONTRATADOS**: estos centros remanufacturan bajo la contratación del cliente o del OEM, continuando estos siendo propietarios del producto. Aunque tengan acceso a mucha información técnica relativa al producto, no toman parte en la toma de decisiones.
- **REMANUFACTUREROS INDEPENDIENTES**: compiten contra los fabricantes originales con sus productos, comprando productos para remanufacturar y revenderlos posteriormente. Aún sin tener relaciones formales con los OEM, cuentan con información técnica suficiente gracias a la ingeniería inversa y un profundo conocimiento del producto. No pueden acreditar que su producto es como uno original ya que no cuentan con la actualización del OEM. Tienen libertad para operar comercialmente.

Aunque estos sean los principales escenarios y actores, puede ser que alguna empresa remanufacturera incluya una combinación de diferentes agentes (E. Sundin 2004). Se debe contemplar el hecho de que un fabricante original no pensaría en mejorar la remanufacturabilidad de un producto para beneficiar a un remanufacturador independiente (Hatcher, Ijomah y Windmill 2011) sin que él obtenga beneficio alguno.

4.6. BENEFICIOS QUE APORTA LA REMANUFACTURA

Según el estudio escocés “*Circular Economy Evidence Building Programme: Remanufacturing Study*” (Zero Waste Scotland 2015) algunos de los siguientes factores pueden impulsar oportunidades de remanufactura:

- **Económica**: las empresas de remanufactura obtienen mayor beneficio de los márgenes asociados a servicios que de un negocio de “producir y vender”. Por ejemplo, la PSS promueven la remanufactura en vez del recambio.
- **Ahorro de costes**: un producto remanufacturado suele salir más barato que uno nuevo. El coste diferencial puede variar de sector a sector y entre productos similares, pero lo habitual es que un producto remanufacturado requiera entre el 50% y 90% del coste de un nuevo producto.

- **Acceso al producto utilizado:** muchas empresas remanufactureras están limitadas por la oferta (*supply-constrained*) y el aumento de las tasas de recogida permitirán el crecimiento.
- **Reducir el tiempo de entrega:** los productos remanufacturados pueden tener una reducción en el tiempo de elaboración, minimizando las interrupciones debido a un fallo de los sistemas clave.
- **Modelos de negocio alternativos:** esto incluye negocios basados en el alquiler y servicios que conducen a mejores relaciones con los clientes y una mano de obra más cualificada y adaptable. Esto puede conllevar una reconfiguración de la cadena de suministros, para servicios en nuevos modelos de negocio.
- **Disminuir el riesgo de las inseguridades de los recursos:** al mantenerse los productos en su “totalidad” se disminuyen los riesgos asociados a las largas cadenas de suministro.
- **Legislación ambiental:** la directiva de EoL de los vehículos tiene problemas con el reciclaje pero podría encontrar una oportunidad en la remanufactura a la hora de recuperar los materiales y componentes (Paterson, y otros 2018).

A su vez, en el estudio de la literatura hecho por Hatcher, Ijiomah y Windmill concluyen que una empresa es una buena candidata para la remanufactura (y *per sé* para DfRem) cuando se den las siguientes cualidades (Hatcher, Ijiomah y Windmill 2011); (Rizova, Wong y Ijiomah 2020):

- Flujo inverso de los *core* (productos utilizados).
- Demanda para el producto remanufacturado.
- Alto valor de las piezas.
- Estabilidad tecnológica.
- Potencial para ser actualizado.

En cambio los factores que promueven la remanufactura desde la perspectiva del diseño son las siguientes (Rizova, Wong y Ijiomah 2020):

- Para la integración exitosa de la remanufactura en la empresa es muy importante el flujo de información y la retroalimentación entre el equipo de diseño de OEM y la empresa de remanufactura.
- La falta de conocimiento y comprensión por parte del diseñador parte como una barrera para la integración de DfRem. Por lo tanto, es un punto para trabajar y educar al diseñador en la remanufactura, ya que la motivación de este es de gran significado.

- ¿Cómo se pueden incorporar unos modelos de diseño y herramientas útiles desde la perspectiva DfRem? Se debe destacar que coincide con la problemática de implantación que encontró el ecodiseño.
- Debe contemplarse el rediseño de producto desde una perspectiva más amplia que simplemente la remanufactura. Este deberá ir ligado con modelos de negocio viables (PSS) y la cadena de suministros (inversa). En caso de no analizarse y pensarse de manera conjunta, es poco probable el éxito de la remanufactura (Bakker, y otros 2014).

4.7. MOTIVACIONES DE LA REMANUFACTURA

Según un estudio europeo realizado mediante encuestas a fabricantes de la remanufactura (European Commission 2015) las principales motivaciones para realizar la remanufactura son (Figura 16):

- Mayor margen de beneficio.
- Responsabilidad medioambiental.
- Ventaja estratégica.
- Incrementar la cuota de mercado.

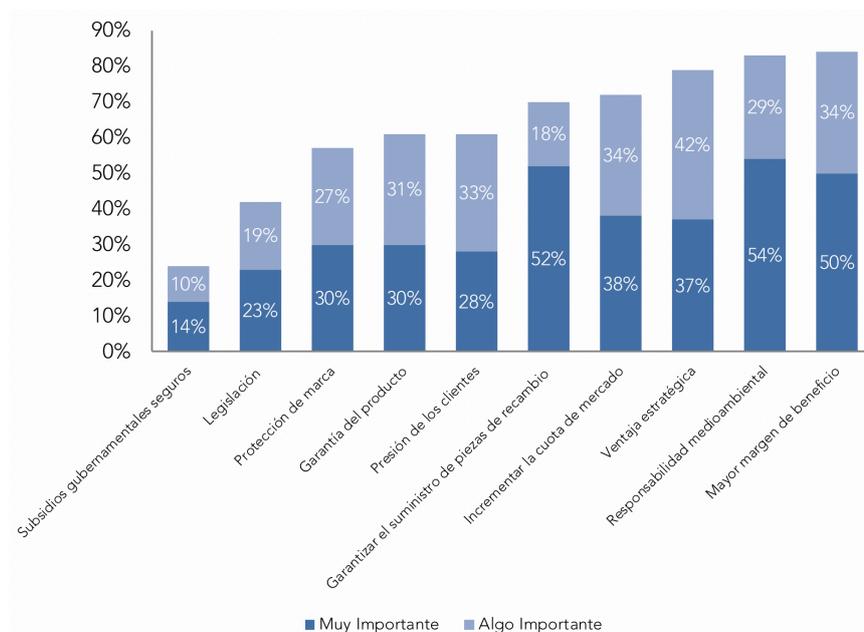


Figura 16: Motivos para aplicar la remanufactura según los participantes. (European Remanufacturing Network (ERN) 2015)

Y en un segundo grado se pueden encontrar las siguientes motivaciones:

- Garantizar el suministro de piezas de recambio.
- Potencial de un precio menor del producto.
- Posibilitar modelos de negocio alternativos.
- Reducir el riesgo de los recursos.
- Presión de los clientes.
- Garantía del producto.
- Reducción de tiempos de espera.

4.8. BARRERAS DE LA REMANUFACTURA

Además de los beneficios, a la hora de diseñar un producto, es indispensable contemplar las barreras que encuentra la remanufactura para llegar a ser una práctica habitual y rentable. En la Figura 17 aparecen los factores competitivos remarcados como extremadamente importantes (United State International Trade Commission 2012) (Eze , Ijiomah y Wong 2020):

- **Falta de información técnica para terceras partes:** los fabricantes del producto no original pueden no tener acceso al conocimiento necesario para remanufacturar productos de manera efectiva.
- **Ambigüedad legal:** hay una falta de claridad sobre lo que implica la remanufactura. No hay guía alguna que aclare como incorporar productos remanufacturados en nuevos productos o si los productos remanufacturados se deben declarar como de “segunda mano”.
- **¿Entraría la remanufactura dentro de la gestión de residuos?** La falta de claridad a la hora de dictar las actividades remanufactureras como gestoras de residuos o parte de ellos, dificulta la labor de los remanufacturadores. Esto es debido a que los requerimientos para el control y los procesos para aquellos productos considerados residuo aumentan barreras administrativas y tienen costes adicionales para el negocio.
- **Competir con productos de menor coste:** este punto es muy citado por los principales sectores de la remanufactura. La venta de productos de calidad inferior merma el mercado a los productos remanufacturados.
- **Escasez de mano de obra cualificada.**

- **Un diseño pobre para la remanufactura:** esto se da principalmente en aquellos productos/sectores donde la remanufactura no va unido con el OEM. La remanufactura puede verse limitado por un diseño inadecuado.
- **Cambios tecnológicos:** de la misma manera que se dan avances tecnológicos y materiales, la remanufactura también necesita avances propios de sus tecnologías para los nuevos aparatos. Esto puede incluir: eficiencia energética, nuevos materiales y la incorporación de más sistemas eléctrico/electrónicos.
- **Costes de logística inversa:** el transporte de grandes productos voluminosos puede aumentar considerablemente el coste de la remanufactura y de esa manera mitigar la opción de remanufactura en ciertos bienes.
- **Coste y disponibilidad de almacenaje:** será necesario contar con una gran cantidad de productos y piezas para la reutilización (stock).
- **Falta de técnicas de descontaminación:** serán necesarios avances tecnológicos de descontaminación para asegurar los productos remanufacturados “como nuevos”.
- **El reconocimiento del cliente.**
- **El volumen y la disponibilidad de los core:** es importante conocer el volumen de *cores* con los que se va a trabajar y el periodo de retorno que tienen.
- **Calidad del producto a remanufacturar:** no sólo es importante estar seguro de que el producto remanufacturado cumpla las calidades indispensables, sino las condiciones en las que llegan los productos pueden condicionar su rentabilidad para que sean remanufacturados o descartados para dicha actividad.
- **Alto coste laboral:** la necesidad de mano de obra cualificada y la cadena de suministros inversa puede encarecer en exceso la remanufactura y no hacerla viable.

Las principales barreras que se pueden encontrar desde el consumidor/facilitador son (Zero Waste Scotland 2015); (Paulson y Sundin 2019):

- **La calidad de los productos remanufacturados:** un producto remanufacturado se suele considerar de “calidad inferior”, perdiendo así el atractivo que podría tener por parte de la industria. Se debe tener en cuenta la escasa conciencia a la hora de comprar.
- **Cambio tecnológico:** la obsolescencia de los viejos equipos es la mayor barrera desde el punto de vista del desempeño y la función; haciendo los productos remanufacturados menos deseables.

- **Baja comprensión por parte de la comunidad empresarial:** la remanufactura puede incorporar un cambio de cultura y/o modelos de negocio. Por lo tanto, será necesario el cambio a través de altos directivos comprometidos.

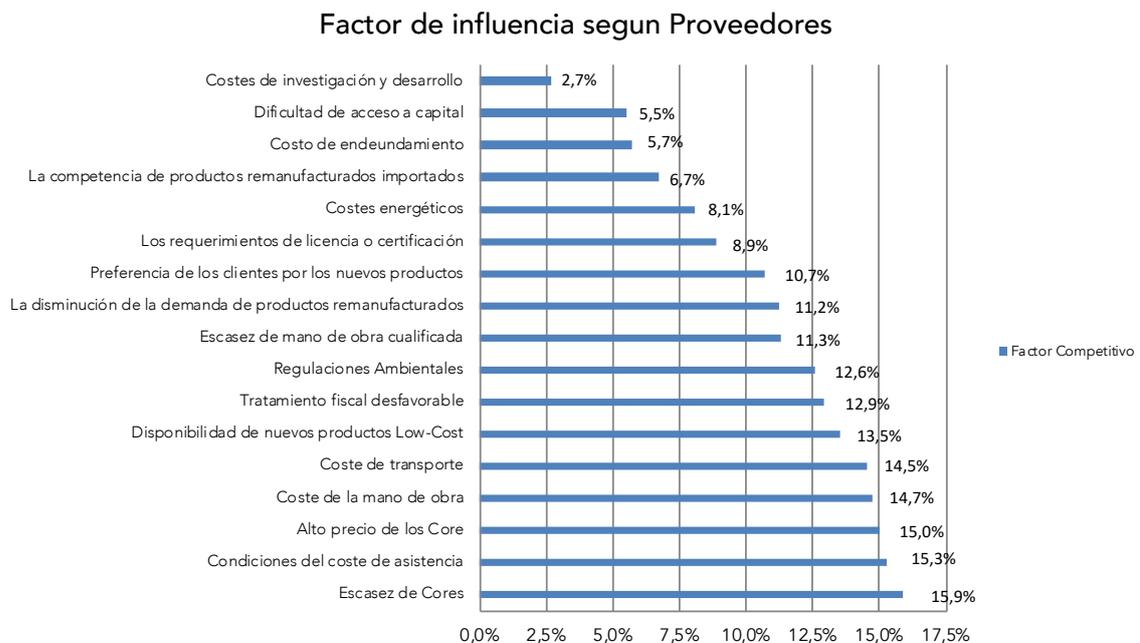


Figura 17: Factores competitivos citados como "extremadamente importante" por los remanufacturadores estadounidenses. (United State International Trade Commission 2012)

En el estudio europeo mencionado sobre la encuesta a fabricantes de la remanufactura, también analizan las barreras que tiene el sector (European Comission 2015). Las principales barreras son:

- Reconocimiento del cliente.
- Volumen y disponibilidad de productos a remanufacturar (core).
- Calidad del producto a remanufacturar.
- Alto coste laboral.

Otras de las barreras que se encuentran:

- Ambigüedad legal sobre el tema de la remanufactura.
- Falta de conocimiento de producto, incluyendo la información técnica del producto a terceras partes.
- Escasez tecnológica.

- Nuevos competidores *low-cost*.
- Escasez de personal cualificado.
- Diseños pobres para la remanufactura.
- Rápida evolución tecnológica.
- Falta de remedio técnicos.

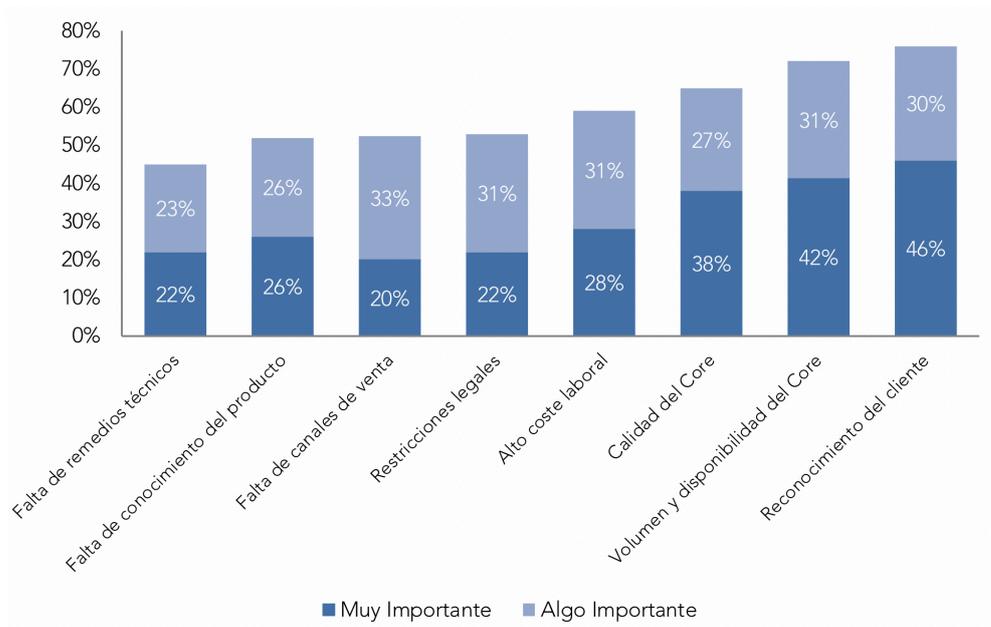


Figura 18: Barreras para aplicar la remanufactura según los participantes (European Remanufacturing Network (ERN) 2015).

Recientes negocios de remanufactura se han encaminado en la introducción de productos reutilizados, remanufacturados y reciclados después de ser retirados o tras su vida útil. Dada las características de este escenario de EoL, hace impredecible la calidad de los productos retornados y la apropiada selección de la cadena inversa permanece incierta hasta la realización de un testeo. La incertidumbre de la calidad y el calendario de las devoluciones, la demanda, el desmontaje, la logística inversa, el tiempo de procesamiento, la cuantía de productos retornados, la falta de inventario y la gestión hacen realmente complicado e impracticable la cadena de suministros inversa. Por lo tanto, este gran grado de incertidumbre exige una solución radicalmente diferente para los sistemas de bucle cerrado. Se debe plantear un enfoque innovador tanto para los modelos de negocio, así como para la cadena de suministros (Rashid, y otros 2013).

Según diversos estudios y análisis de artículos sobre la logística inversa, se han obtenido ciertas problemáticas comunes generadas a lo largo de la cadena de suministro para un proceso de remanufactura (Asif, Bianchi, y otros 2012); (Paterson, Kao, y otros 2018). Estas problemáticas se traducen en:

- El retorno de los productos ocurre por diversidad de razones y diferentes periodos de tiempo.
- Un producto en su EoL es el resultado de una relación compleja a través de años y un patrón de uso.
- Algunos productos nunca vuelven, ya sea por cambiar de región donde existe una legislación y diferentes obligaciones hacen el retorno del producto económicamente inviable.
- La información relativa al producto se pierde.
- La remanufactura es tratado como un negocio separado.
- Los productos no están diseñados para una recuperación eficiente.

Por lo tanto, dentro de una CE un producto diseñado para ser usado en múltiples etapas tiene renacimientos que se obtienen mediante un sistema de fabricación rigurosamente diseñado de ciclo cerrado donde se integran: el diseño del producto, la cadena de suministros del ciclo cerrado, el modelo de negocio y la remanufactura (Aziz, y otros 2015); (Geissdoerfer, Vladimirova y Evans 2018).

4.9. DISEÑO PARA LA REMANUFACTURA

Hay mucho escrito sobre el diseño para la remanufactura y las diferentes estrategias de diseño. Muchas de dichas estrategias están basadas en el principio de diseño para la excelencia (a partir de ahora DfX, por sus siglas en inglés “*Design For Excellence*”). Es relevante conocer los aspectos de diseño y saber cuáles son sus directrices ya que es un condicionante para que la remanufactura sea exitosa. En el Anexo I se pueden consultar las directrices para las distintas opciones de diseño.

Con el fin de diseñar productos que se ajustan a la CE (“productos circulares”), en primer lugar, es importante comprender la forma en la que es posible optimizar la vida útil del producto desde una perspectiva sostenible, sin comprometer la viabilidad del producto (Bakker, y otros 2014). El Diseño para el Ciclo de Vida Múltiple (a partir de ahora DfML, por sus siglas en inglés “*Design for Multiple Lifecycle*”) es una de las aproximaciones para facilitar la implementación de los productos con múltiples ciclo de vida y maximizar el uso de los recursos usados en el desarrollo del producto,

pudiendo así ayudar en la prolongación de la vida del producto (Dunmade 2003). Las siguientes características son las que se deben tener en cuenta para el objetivo de DfML: ensamblaje y desensamblaje, durabilidad y accesibilidad, modularidad, simplicidad, utilización de piezas estandarizadas y consideraciones socioculturales.

A su vez, hay que destacar la importancia del diseño para la actualización (a partir de ahora DfU, por sus siglas en inglés “*Design For Upgradability*”) en los MLPs. El DfU asegura que: el enfoque del diseño permita mejoras de las características del producto, prolonga la vida útil de la misma (Aziz, y otros 2015) y apoyarse en el diseño para la recuperación para una logística inversa de valor (Lindkvist, y otros 2016).

Es probable que en los productos que se remanufacturan sin haber sido diseñados para ese fin, no se aproveche todo su potencial (Haziri y Sundin 2020). Cabe destacar la existencia de propiedades específicas que pueden tener un efecto adverso sobre determinadas etapas del proceso de remanufacturación, tales como el desmontaje o la limpieza. Por ello, las decisiones tomadas durante el proceso de diseño serán determinantes para el grado de remanufacturabilidad de un producto (Hammond, Amezquita y Bras 1998); (Nasr y Thurston 2006); (Hatcher, Ijomah y Windmill 2011).

Por lo tanto, el diseño del producto es trascendental para que la remanufactura sea efectiva. Se debe destacar que a pesar de los esfuerzos realizados, el ecodiseño y sus herramientas no contemplan el desarrollo de sistemas circulares, ni tampoco lo fomentan, ni lo benefician. Las metodologías de LCA consideran principalmente la recuperación del material a través del reciclado, entrando en conflicto, con las principales estrategias de sistemas de bucle cerrado.

Para que un producto sea fiable a la hora de remanufacturarse, es importante contemplar los siguientes aspectos de diseño (Aziz, y otros 2015); (Zhang, y otros 2019):

- Diseño para el desmontaje.
- Diseño modular.
- Ecodiseño.
- Diseño para la actualización.
- Diseño para la evaluación.

Un aspecto crítico para la optimización de la forma y la función de un producto desde la perspectiva del diseño, es el método de unión que se utiliza entre los materiales. Dentro de los métodos de fijación encontramos: pernos, tuercas, tornillos, remaches, grapas, imanes, anillos de retención, uniones adhesivas, soldaduras, engastes, etc. Este es un factor clave, ya que es la puerta para que un producto sea fácil o difícilmente

desmontable, esto tiene como consecuencia facilitar el reciclaje, la reutilización o la remanufactura, o no facilitarla.

La estructura de diseño está muy relacionada con la eficiencia en el proceso de remanufacturar un producto. Los productos, especialmente los complejos, son una tarea difícil a la hora de remanufacturarlos. Esto es debido a la existencia de procesos de desmontaje para separar diferentes materiales y recuperar los componentes reutilizables de una manera no destructiva y rentable. Por lo tanto, la cantidad, la tolerancia de diseño, la forma y la posición de los componentes pueden afectar a varios procesos de remanufactura, tales como la limpieza, la inspección, el reacondicionamiento, etc. En el caso de que un componente este escondido en el interior de un producto, cuando deba ser intercambiado, el acceso al mismo es dificultoso y eso conlleva un incremento de gastos.

Finalmente, se suele aplicar un revestimiento superficial a los productos industriales, otro aspecto crítico que influye directamente a la remanufacturabilidad de un producto. Por lo general, cuando un material ha sido elegido por sus características de diseño, puede entrar en contradicción con las exigencias del revestimiento superficial. El revestimiento debe cumplir con las características de diseño (fatiga, desgaste, corrosión, etc.). Una mala selección del material conllevará un aumento de averías y una mayor carga de trabajo en las operaciones de reparación.

Otros conceptos que no se deben olvidar a la hora del diseño son las tres demandas principales a la hora del desarrollo estratégico de diseño de producto, siendo estas la minimización de las energía y el material utilizado, la maximización de los recursos empleados y la minimización de los impactos ambientales contemplados (Rashid, y otros 2013); (Nasr y Thurston 2006).

Tabla 9: Relación entre los procesos de remanufactura y las estrategias de diseño.

ESTRATEGIA DE DISEÑO	PROCESOS DE REMANUFACTURA										
	Recogida del Core	Diagnos	Inspección	Desmontaje	Reparación	Sustitución (Preventiva)	Montaje	Testeo	Limpieza	Modernización	Venta (1ª Mano)
1 Diseño para la recogida (del core)											
2 Diseño para la mantenibilidad											
3 Diseño para la desmontaje											
4 Diseño para la limpieza											
5 Diseño para la montaje											
6 Diseño para la durabilidad											
7 Diseño para la modularidad											
8 Diseño para la actuabilidad											

No todos los productos son adecuados para ser remanufacturados, ya sea por no ser rentables o no sea la opción ambiental preferible. Una empresa será una buena candidata a la remanufactura cuando sus productos posean ciertas cualidades, como puede ser la estabilidad tecnológica, el alto valor de las piezas, la facilidad en la obtención de *cores* y la demanda del producto remanufacturado (Hatcher, Ijomah y Windmill 2011); (Duberg, y otros 2020).

De acuerdo con Pialot y Millet (Pialot y Millet 2014), los productos han de ser descartados durante su vida útil y diferencian la “vida útil física” del “valor de vida útil”. La vida útil física es tener en cuenta el producto hasta que se averíe, lo cual va unido con su fiabilidad. En cambio, el valor de la vida útil es el tiempo que transcurre hasta que un producto es desechado por que su desempeño funcional o por la propia apariencia (obsolescencia de diseño) no satisface al usuario. Por lo tanto, se puede concluir que la producción de actualización (*upgradability*) es uno de los modelos válidos para que los fabricantes puedan obtener soluciones efectivas a la hora de diseñar los productos, con una buena calidad y medioambientalmente respetuosos (Aziz, y otros 2015).

Upgradability desde la perspectiva de la remanufactura es definida como el potencial de un producto para ser efectiva y eficientemente actualizado (Xing, Abhary y Luong 2006). En cambio, la actualización del producto se refiere a los productos cuya funcionalidad puede ser actualizada, con la intención de extender la vida útil del producto (Umemori, y otros 2001).

Por lo tanto, el diseño de actualización es la llave para el diseño inverso, ya que puede reducir el volumen de producción y consumo de un producto, manteniendo la calidad y los beneficios en la empresa (Shimomura, Umeda y Tomiyama 1999). Como complemento a la remanufactura, el diseño de la actualización puede considerarse como una aproximación al ecodiseño, pudiendo promover la reducción de los materiales utilizados y la energía utilizada en el proceso de la reducción del impacto ambiental durante el ciclo de vida del producto (Charter y Gray 2008); (Aziz, y otros 2015).

A su vez, puede ocurrir que algunos principios de DfRem entren en conflicto directo con cuestiones tales como la fabricación o el montaje. Mientras esto continúe así, DfRem será visto como un valor menor, en términos de tiempo y coste. Asimismo, los diseñadores desconocen la estrategia de diseño para la remanufactura (Hatcher, Ijomah y Windmill 2011); (da Costa Fernandes, y otros 2020).

Según los casos estudiados por Hatcher, Ijomah y Windmill las compañías no consideran el DfRem como una de las prioridades en el proceso de diseño, ya que factores como la funcionalidad, el coste y la manufacturabilidad tiene mayor relevancia

(Hatcher, Ijomah y Windmill 2012). Además, cuando el remanufacturador es una empresa contratada o independiente el flujo de información entre el equipo de diseño de OEM y la empresa de remanufactura es relevante para una integración satisfactoria del DfRem.

Cuando el OEM está comprometido e involucrado con la remanufactura se podrían obtener los siguientes beneficios (Hatcher, Ijomah y Windmill 2011):

- Mejorar la eficiencia de la actividad existente, por ejemplo, reduciendo los desechos materiales o los tiempos de desensamblaje, para una mayor rentabilidad de la operación.
- O bien, la preparación para futuros cambios legislativos relacionados con el EoL, exigiendo una mayor responsabilidad a los fabricantes originales. Los productos de hoy serán los residuos de mañana, y una empresa que planee una mejora de dicha gestión podrá obtener una ventaja competitiva.

De no estar comprometido, lo más probable es que el OEM no priorice aspectos de DfRem. Aun siendo un producto remanufacturable, sin haber contemplado dichas estrategias de diseño, dificultará a empresas independientes remanufacturar el producto. Por lo tanto, es importante concienciar a las empresas de la importancia del diseño para una remanufactura eficaz.

5. LÍMITES DEL SISTEMA Y MARCO PARA LA REMANUFACTURA EN EL LCA

En este capítulo se delimitará el inicio y el final para los ciclos de uso de la remanufactura y el marco comparativo. Para ello se realiza una introducción al LCA y se estudian los límites del sistema y el marco comparativo para un producto remanufacturado frente a uno de nueva fabricación. A su vez se analizan los métodos de asignación de diversas metodologías (Ecoinvent, Environdec, ILCD y PEF) para delimitar los ciclos de uso de productos remanufacturados. Dentro de cada método se adaptan las teorías de asignación a la remanufactura.

5.1. INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (LCA)

La sostenibilidad viene definida por los siguientes tres componentes: ambiental, social, y económico. Este triple balance de la sostenibilidad se adapta a la perspectiva de ciclo de vida en las siguientes metodologías: el LCA, el LCA social (a partir de ahora SLCA, por sus siglas en inglés “*Social Life Cycle Assessment*”) y el ciclo de vida de costes (a partir de ahora LCC, por sus siglas en inglés “*Life Cycle Cost*”) respectivamente. La suma de todas es el LCA sostenible (a partir de ahora LCSA, por sus siglas en inglés “*Life Cycle Sustainability Assessment*”) como se observa en la Figura 19 (Lozano 2008); (van de Meer 2020).

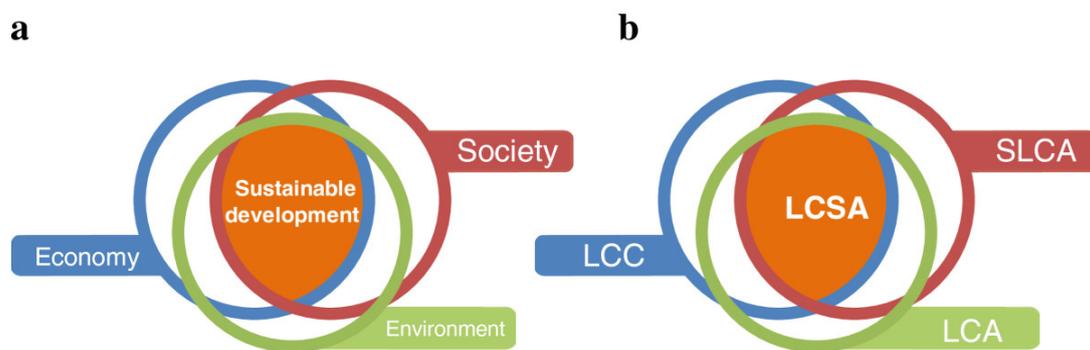


Figura 19: Imagen basada en Rodríguez Lozano por Erwin M. Schau, Traverso, y Finkbeiner.

LCA: es el único método de análisis estandarizado internacionalmente. Como todo sistema de análisis el LCA tiene algunas limitaciones, por ejemplo, la gran dificultad de incluir elementos de evaluación de riesgos. Se podría decir que existen dos diferencias sustanciales en el campo de la evaluación ambiental: la de los componentes peligrosos (es decir, los impactos potenciales) y el componente riesgo (es decir, los impactos reales

por la probabilidad de ocurrencia). Sin embargo, el LCA pertenece al primero de los casos. Por ejemplo alguno de los impactos ambientales más importantes como la pérdida de la diversidad o el efecto en tiempo real de los gases de efecto invernadero no puede cuantificarse directamente (Klöpffer 2008).

LCC: esta metodología resume todos los costes asociados con el ciclo de vida de un producto que abarca directamente a uno o más de los actores (por ejemplo: el proveedor, el fabricante, el usuario o el gestor en el EoL) de ese ciclo de vida. (Klöpffer 2008). Por lo tanto, el LCC contempla todo el ciclo de vida y es un pilar consecuente de la sostenibilidad (Sundin y Lee 2012). A pesar de ser el sistema más antiguo de las tres metodologías contempladas, el LCC aun no está estandarizado.

SLCA: Kloepferr en 2008 sugería que la parte social aún tenía que desarrollarse (Klöpffer 2008) y desde entonces los SLCA no han evolucionado en exceso. Este sistema evalúa los impactos sociales en los trabajadores, las comunidades locales, los consumidores, la sociedad y todos los demás actores de la cadena de valor afectados por la producción y el consumo de productos en cuestión (van de Meer 2020).

Esta investigación se centra principalmente en la componente ambiental, analizada desde una perspectiva del ecodiseño y el LCA. El ecodiseño introduce la componente ambiental en el diseño y el desarrollo de un producto. Además el ecodiseño se equipara con los aspectos habituales del diseño. Estos aspectos habituales son: la funcionalidad, la durabilidad, los costes, el tiempo, la comercialización, la estética, la ergonomía y la calidad. Esta forma de diseño es uno de los complementos a la hora de desarrollar productos basados en un desarrollo sostenible.

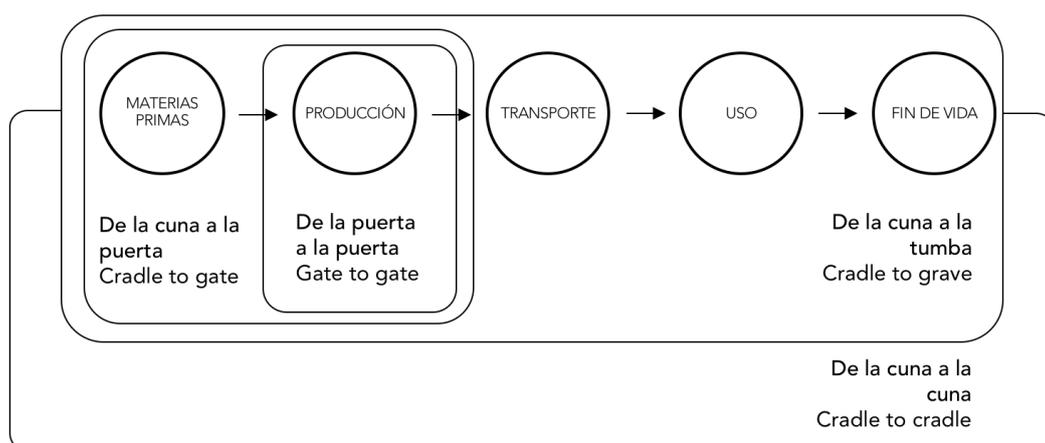


Figura 20: Diferentes límites del sistema y objetivos de alcance de los LCA (elaboración propia).

Desde otro punto de vista, el ecodiseño es un enfoque de gestión que acompañado con el LCA, dirige al producto hacia la reducción del impacto ambiental a lo largo de todo su ciclo de vida (Pigosso, Zanette y Filho 2018). Como ya se ha dicho, el LCA es un enfoque de contabilidad y gestión ambiental que considera todos los aspectos del uso de recursos y las emisiones ambientales asociadas en un sistema, ya sea analizado desde *cradle to grave* o desde *cradle to door* (Curran 2008). La metodología LCA es una de las más utilizadas en el ecodiseño para realizar evaluaciones ambientales de productos y servicios.

El procedimiento del LCA viene definido ampliamente por la norma ISO 14040 (International Standard Organization 2006). Este procedimiento proporciona información cuantitativa para permitir mejores elecciones que conduzcan a un planeta y una sociedad más sostenible.

Por lo tanto, la incorporación del pensamiento de ciclo de vida (o *life cycle thinking* en inglés) dentro de una organización implica: integrar las perspectivas de ciclo de vida en la estrategia general, la planificación y los procesos de la organización; y tener en cuenta las consideraciones ambientales, sociales y económicas (Toniolo, y otros 2020). Esto conlleva que una organización centrada en el ciclo de vida, piensa más allá de la componente puramente económica (D. C. Pigosso, y otros 2010). Esta perspectiva conlleva tener una visión mucho más amplia del producto. Al contemplar el ciclo de vida de todo el producto (desde *cradle to grave* o desde *cradle to cradle*) se tiene una conciencia, conocimiento y un contacto mayor con toda la cadena, además de conocer el impacto ambiental en cada una de las fases del producto.

Cradle to grave es un modelo configurado desde el sistema industrial, focalizado en un diseño lineal. Esto significa que el ciclo de vida de un producto se basa en la extracción de los recursos, estos se transforman para fabricar los productos que se venderán y una vez finalizada su vida útil, son retirados a algún tipo de “tumba”. Dicha tumba normalmente suele ser o un vertedero o una planta de incineración (McDonough y Braungart 2002). Según la definición de la ISO 14040 (International Standard Organization 2006), el LCA se estudia a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto *cradle to grave*, es decir, desde la adquisición de la materia prima, pasando por la producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final.

En cambio, el concepto de *cradle to cradle* plantea que todo producto esté pensado desde el origen de sí mismo para que todos sus componentes puedan volver a ser utilizados. Es por ello, que en el concepto de *cradle to cradle* se plantean estrategias que contengan los cierres circulares; de tal forma, que todo material incorporado a un producto puede volver a utilizarse reincorporándolo a la economía.

En el Capítulo 4 ya se han definido las fases necesarias a la hora de realizar el estudio de un LCA. Además de las fases, hay una serie de conceptos que se deben tener en cuenta a la hora de realizar un LCA. Las siguientes definiciones sirven para comprender diferentes aspectos de un LCA:

- **Unidad funcional:** Desempeño cuantificado de un sistema del producto para su uso como unidad de referencia.
- **Límite del sistema:** Conjunto de criterios que especifican cuales de los procesos unitarios son parte de un sistema del producto.
- **Proceso unitario:** Elemento más pequeño considerado en el análisis del inventario del ciclo de vida para el cual se cuantifican datos de entrada y salida.
- **Calidad de los datos:** Característica de los datos que se relaciona con su capacidad para satisfacer los requisitos establecidos.
- **Criterio de corte:** Especificación de la cantidad de flujo de materia o de energía o del nivel de importancia ambiental asociado a los procesos unitarios o al sistema del producto para su exclusión del estudio.
- **Categoría de impacto:** Clase que representa asuntos ambientales de interés, a la cual se pueden asignar los resultados del análisis del inventario del ciclo de vida.
- **Indicador de categoría de impacto:** Representación cuantificable de una categoría de impacto.
- **Asignación:** distribución de los flujos de entrada o de salida de un proceso o un sistema del producto, entre el sistema del producto bajo estudio y uno o más sistemas del producto diferentes.
- **Flujo elemental:** materia o energía que entra al sistema bajo estudio, que ha sido extraído del medio ambiente sin una transformación previa por el ser humano; o materia o energía que sale del sistema, que es liberado al medio ambiente sin una transformación posterior por el ser humano.
- **Flujo de referencia:** medidas de las salidas de los procesos, en un sistema del producto determinado, requerida para cumplir la función expresada mediante la unidad funcional.
- **Flujo de producto:** productos que entran o salen de un sistema del producto hacia otro.
- **Flujo intermedio:** flujo de producto, de materia o de energía, que ocurre entre procesos unitarios del sistema del producto bajo estudio.
- **Sistema de producto:** conjunto de procesos unitarios con flujos elementales y flujos de producto, que desempeña una o más funciones definidas, y que sirve de modelo para el ciclo de vida de un producto.

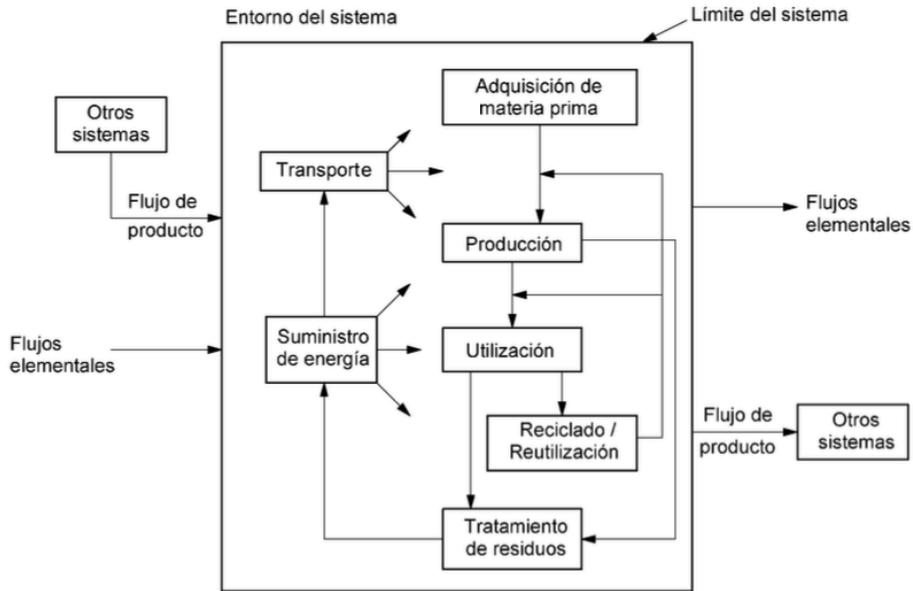


Figura 21: Ejemplo de un sistema del producto para el LCA (International Standard Organization 2006)

El LCA modela el ciclo de vida de un producto como su sistema del producto, el cual desempeña una o más funciones definidas. En la Figura 21 se ve el ejemplo de un sistema del producto caracterizado debido a su función. A su vez, el sistema de producto está subdividido en un conjunto de procesos unitarios, como se puede observar en la Figura 22.

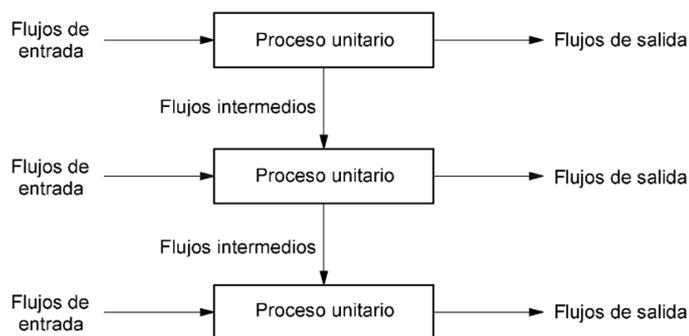


Figura 22: Ejemplo de un conjunto de procesos unitarios dentro de un sistema del producto (International Standard Organization 2006).

Tal como se ha definido, habitualmente el LCA considera el ciclo de vida completo de un producto: extracción de la materia prima, producción de energía y materia, la fabricación, el uso y el tratamiento al final de la vida útil. Eso no quiere decir que no puedan realizarse LCAs más acotados, como puede ser el caso de *gate to gate*, el cual analiza el proceso de fabricación. Hay que tener claro que el LCA trata los aspectos e impactos ambientales de un sistema del producto. Los aspectos e impactos económicos y sociales generalmente están fuera del alcance de estos estudios.

A la hora de realizar el estudio, el LCA se basa en el enfoque relativo, estructurado alrededor de una unidad funcional. Esa unidad funcional es la unidad de referencia para todos los análisis subsecuentes. El alcance de un LCA delimita la profundidad de la misma, en la cual se debe definir la amplitud, la profundidad y el nivel de detalle del estudio, siendo estos suficientes para alcanzar el objetivo establecido (Roßmann, y otros 2020). Los puntos que suele incluir el alcance son los siguientes:

- El sistema del producto a estudiar.
- Las funciones del sistema de producto o, en el caso de estudios comparativos, los sistemas.
- La unidad funcional.
- Los límites del sistema.
- Los procedimientos de asignación.
- Las categorías de impacto seleccionadas.
- Requisitos relativos a los datos, suposiciones, limitaciones y requisitos iniciales de la calidad de los datos.

De todo lo mencionado hasta ahora hay tres principales claves a la hora de ahondar un LCA: la unidad funcional, los límites del sistema y la calidad de los datos. Es destacable que esta investigación contemplará, a su vez, la asignación.

El propósito fundamental de una unidad funcional es proporcionar una referencia a la cual se relacionan las entradas y salidas. Se necesita esta referencia para asegurar que los resultados del LCA son comparables. El carácter comparativo de los resultados de los LCA es particularmente crítico cuando se están evaluando sistemas diferentes, dado que hay que asegurar que estas comparaciones se hacen sobre una base común.

El LCA se realiza definiendo los sistemas de producto como modelos que describen los elementos clave de los sistemas físicos. Los límites del sistema definen los procesos unitarios a ser incluidos en el sistema. Idealmente, el sistema del producto se debería modelar de tal manera que las entradas y las salidas, en sus límites, sean flujos elementales; a no ser, que dichas entradas y salidas no produzcan cambios significativos

en las conclusiones generales del estudio. A la hora de realizar un estudio se deben definir los criterios a utilizar para establecer los límites del sistema. Estos criterios son importantes para el grado de confianza en los resultados y la posibilidad de alcanzar su objetivo.

La calidad de los datos también tiene que ver con el grado de confianza del estudio, estos deben especificar en términos generales, las características de los datos necesarios para el estudio. Asimismo, el tipo de asignación define cómo se distribuyen los flujos de entrada o de salida de un proceso o un sistema de producto entre diferentes sistema. En esta investigación este último punto tiene su relevancia, debido a la comparativa que se realiza entre un producto de nueva fabricación y el primer ciclo de un producto remanufacturado. La asignación será la que marque los límites del sistema, dentro de un producto basado en la CE.

5.2. LÍMITES DEL SISTEMA PARA LA REMANUFACTURA EN EL LCA

La remanufactura, frente al reciclaje de materiales o la fabricación de nuevos productos, es considerada como una de las opciones de EoL más sostenible, pero la realidad es que no existe un proceso estandarizado para realizar cálculos ambientales de un producto remanufacturado (Sundin y Lee 2012). Un producto remanufacturado retiene el valor de los materiales del producto a lo largo de diferentes ciclos de vida.

Hoy por hoy, tras analizar diferentes casos, se puede afirmar que no hay un consenso a la hora de realizar un estudio de LCA de un producto remanufacturado. El límite del sistema en un LCA debe ajustarse para representar y reflejar la situación práctica y realista de lo que se está estudiando. Como han analizado Sundin y Lee (Sundin y Lee 2012), hay diferentes formas de realizar la evaluación ambiental de la remanufactura, especialmente en la realización de un estudio. Principalmente existen 5 variables a la hora de marcar los límites del sistema de un ciclo de vida en un caso de remanufactura:

1. Comparando 1 ciclo de vida de fabricación con 1 ciclo de vida de remanufactura. El enfoque es estrictamente una comparativa en el empleo de la remanufactura en vez de un escenario de fabricación. No está incluida la perspectiva de ciclo de vida (Kerr y Ryan 2001); (Sutherland, y otros 2008).
2. La comparación de todo el ciclo de vida con la remanufactura o el reciclaje, sustituyendo la etapa de fabricación por la etapa de recuperación, con la de dos ciclos de nueva fabricación (Lindahl, Sundin y Östlin 2016); (Four Elements Consulting, LLC 2008); (Kara, Carbon Impact of Remanufactured Products

- (Photovoltaic Panels) 2008); (Kara, Footprint Analysis of New and Remanufactured Inkjet Cartridges (HP21&HP22 New vs. Remanufactured) 2014); (Boustani, y otros 2010).
3. Comparando 1 ciclo de vida de fabricación con 1 ciclo de remanufactura y 1 ciclo de reciclaje. Se consideran 2 estrategias de EoL con 1 ciclo de fabricación para saber cuál de las opciones es más ambiental (Sundin y Tyskeng, Inverse Manufacturing at Electretrolux or Recycling at Local Facilities? -A comparison from Environmental and Economic Perspective 2003).
 4. Se realiza una simplificación de todo el ciclo de vida, comparando 1 ciclo de vida de un nuevo producto + 1 ciclo de vida del producto remanufactura con 2 ciclos de vida de productos de nueva fabricación. (Goldey, y otros 2010)
 5. La comparación del diferente número de veces que el producto está siendo remanufacturado (Gell 2008).

Entre las opciones mencionadas, la más utilizada es la segunda, en la que se comparan dos ciclos de nueva fabricación con un ciclo de nueva fabricación y un primer ciclo de remanufactura, tal y como se puede observar en la Figura 23. A la hora de realizar una comparativa, se debe equiparar para que un producto remanufacturado se compare con uno de nueva fabricación. Para ello se debe definir una unidad funcional acorde a los límites del sistema (físicos y temporales).

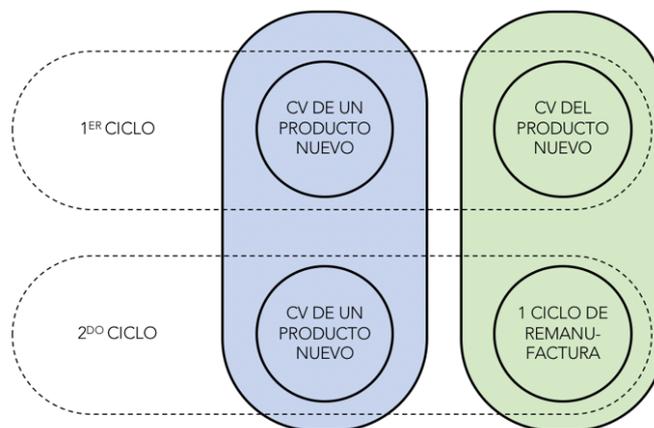


Figura 23: El marco de dos ciclos comparativos entre uno nuevo (azul) y otro remanufacturado (verde) (elaboración propia).

Por lo tanto, como las metodologías de LCA suelen estar generadas desde una perspectiva de *cradle to grave*, realizar el estudio de un producto de nueva generación con

su EoL de reciclaje, incineración o depósito en vertedero no hay inconveniente alguno (Paterson, y otros 2018). Las fases de dicho sistema se pueden ver en la Figura 24.

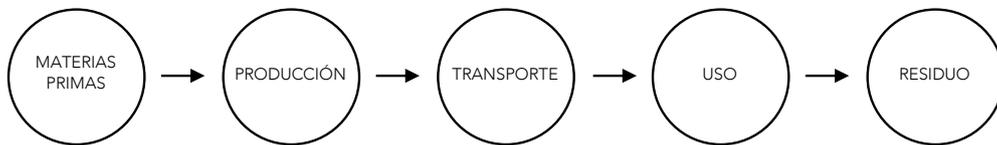


Figura 24: Sistema de un LCA de *cradle to grave* (elaboración propia).

En cambio, realizar una delimitación de ciclos desde una perspectiva de *cradle to cradle*, como puede ser un MPL de remanufactura de la Figura 25, se complejiza entre otras razones debido a que cada metodología difiere en los métodos de asignación. Esto quiere decir que para cada ciclo de uso, el fin de un ciclo y el comienzo de otro es diferente. En la Figura 25 la parte superior correspondería a la parte de la *cradle to grave* y la inferior corresponde el cierre de ciclo (*cradle to cradle*).

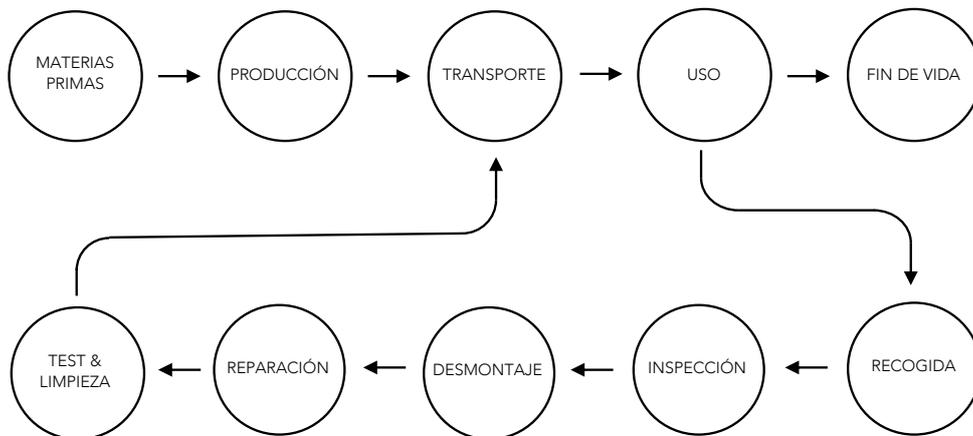


Figura 25: Sistema de un LCA *cradle to cradle* de remanufactura (elaboración Propia).

En un sistema de *cradle to grave*, es sencillo delimitar el EoL. Los productos terminan o en un vertedero, incinerados o reciclados, en su mayor medida. Es por ello que se da por finalizado su ciclo en ese sistema y si entran en otro sistema como material reciclado, será mezclado con otra gran cantidad de productos quedando este diluido en el sistema.

En cambio para un producto de *cradle to cradle*, el fin de ciclo se puede llegar a contemplar entre la fase de recogida (posterior al uso) y la salida anterior al transporte

del siguiente ciclo. Sin embargo, delimitar el punto del sistema entre los diferentes ciclos de uso no es tan sencillo.

Por lo tanto, el ciclo de vida completo de un producto remanufacturado de dos ciclos de uso contiene las siguientes fases:

- Obtención de la materia prima.
- Fabricación.
- Distribución 1.
- Venta.
- Uso.
- Distribución 2 (para ser remanufacturado).
- Remanufactura (con sus pasos correspondientes).
- Distribución 3.
- 2^{do} Uso.
- EoL (reciclaje, incineración o vertedero).

Esta representación es un ciclo de vida completo, sin diferenciar ciclo de uso alguno. Aunque a la hora de realizar una comparativa equitativa entre un producto nuevo y otro remanufacturado, la unidad funcional debe variar. En este caso, al analizar un producto (por ejemplo un servomotor de uso industrial) se comparará el ciclo de vida de un motor remanufacturado de dos ciclos de uso, con el ciclo de vida de dos motores de nueva fabricación. Este estudio no entraña mayores dificultades, debido a que el caso del ciclo remanufacturado se podrá entender como el ciclo de vida expandido de un producto.

Sin embargo, al querer realizar un estudio comparativo entre un ciclo de uso, puntual, de la remanufactura y un motor de nueva fabricación, es necesario saber dónde delimitar el inicio y el final de dicho ciclo. Para poder dar respuesta a esta cuestión, se van a estudiar diversas metodologías y analizar estas desde la perspectiva de los métodos de asignación. El análisis realizado se adapta para generar un marco de *cradle to cradle* (en nuestro estudio, a la remanufactura). Los sistemas analizados son los siguientes: Ecoinvent, Environdec, ILCD y PEF.

5.3. MÉTODOS DE ASIGNACIÓN

Es esencial establecer un marco a la hora de realizar unos cálculos de LCA: delimitar los límites del sistema y la asignación de carga, a los componentes de los diferentes

ciclos. Dependiendo de los límites que se hayan definido, los resultados variarán a la hora de comparar un producto de nueva fabricación y uno de MLP. Por lo tanto, es indispensable conocer las diversas opciones para la asignación de cargas y poder delimitar así los límites de los ciclos. Para ello se van a estudiar diferentes metodologías, las cuales contienen diferentes perspectivas de la asignación de cargas. La temporalidad de las metodologías analizadas debe ser contemplada, para poder así comprender cómo se adaptan a las complejidades surgidas y cómo dan respuesta a una realidad basada en la CE.

La ISO 14006 define la asignación como “la distribución de los flujos de entrada o de salida de un proceso o un sistema del producto entre el sistema del producto bajo estudio y uno o más sistemas del producto diferentes” (International Standard Organization 2006).

En el manual “*ILCD Handbook, International Reference Life Cycle Data System*” se aconseja la asignación económica como método de referencia para la mayoría de los casos de asignación en un LCA detallado. Otra opción podría ser la asignación física. Estos conceptos se profundizarán en el procedimiento de asignación de dos pasos del ILCD (European Comision - Joint Reserch Centre - Institute for Environmetal and Sustainability 2010).

Diferentes investigaciones proponen diferentes enfoques de asignación relacionados con productos reciclados, como puede ser la perspectiva basada en el mercado propuesto por Vogtländer et al. (Vogtländer, Brezet y Hendricks 2001) o enfocado a la calidad del material (Kim, Hwang y Lee 1997). El estándar para el LCA ISO 14044:2006 describe este problema de manera general. Dicho estándar ofrece un marco conceptual que sirva de guía a los diseñadores en sus procesos de modelado del EoL (Allacker, y otros 2014); (Mirzaie, Thuring y Allacker 2020).

5.3.1. Método de asignación según Ecoinvent

De las metodologías a analizar se va a constatar que Ecoinvent, *per se*, no es una metodología. En realidad, es una de las bases de datos más utilizada a la hora de realizar un LCA. Sin embargo, para estudiar los métodos de asignación resulta interesante tener en cuenta esta base de datos debido a que contempla diferentes escenarios de estudio, bajo diversas asignaciones de carga. A su vez sirve para comprender diferentes tipologías de escenario para desarrollar un LCA (como son el atribucional frente al método resultante).

Por lo tanto Ecoinvent tiene incorporados tres sistemas de asignación (Ecoinvent 2017):

- “*Allocation, Recycled Content*” (Asignación, Contenido de Reciclado).
- “*Allocation, Default*” (Asignación Predeterminada).
- “*Consequential*” (Resultante).

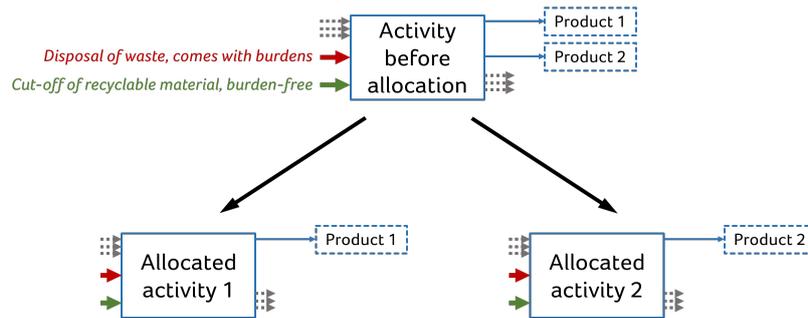


Figura 26: Cómo llegan las cargas a los materiales secundarios en un sistema de asignación Cut Off (Ecoinvent 2017).

El modelo de sistema “Asignación, Contenido de Reciclado” o “*Cut Off*” (regla de corte) se basa en el enfoque de que la producción primaria de materiales siempre se asigna al usuario primario de un material. Si un material es reciclado, el productor primario no recibe crédito por el suministro de materiales reciclables. La consecuencia es que los materiales están disponibles sin carga para los procesos de reciclaje y los materiales secundarios (reciclados) solo soportan los impactos de los procesos de reciclaje. Además, los productores de residuos no reciben ningún crédito por el reciclaje o la reutilización de los productos resultantes de cualquier tratamiento de residuos (Ecoinvent).

El modelo del sistema “Asignación, Predeterminada” contiene dos opciones metodológicas:

- En una utiliza el suministro medio de productos, como se describe en los conjuntos de datos de actividad del mercado.
- En la otra utiliza la división (asignación) para convertir conjuntos de datos multiproducto a conjuntos de datos de un solo producto.

Los flujos se asignan con relación al “valor real”, que es el ingreso económico corregido por algunas imperfecciones y fluctuaciones del mercado (Ecoinvent 2017).

Tabla 10: Resumen del modelo de asignación Cut Off.

ASIGNACIÓN CUT OFF POR CLASIFICACIÓN (CONTENIDO RECICLADO)	
CARGAS AMBIENTALES	(ejemplo)
La producción primaria de materiales se asigna siempre al USUARIO de un material.	
Si un material es reciclado, el productor primario no recibe CRÉDITO.	El papel reciclado sólo soporta los impactos de la recolección de papel usado y el proceso de reciclaje de convertir el papel usado en papel reciclado. Esto es, está libre de toda carga de actividades forestales y del procesamiento requerido para la producción primaria de papel.
Por lo tanto los materiales reciclables están disponibles sin carga para los PROCESOS de materiales secundarios (reciclados)	
y sólo soportan los IMPACTOS de los procesos de reciclaje.	
Los productores de residuos NO reciben CRÉDITO alguno por el reciclaje o la reutilización de los productos resultantes de cualquier tratamiento de residuos.	El calor generado desde la incineración de residuos sólidos municipales puede ser utilizado en casas u oficinas, y por lo tanto tiene su valor. No obstante, la incineración es asignada en su totalidad al tratamiento de residuos, por lo tanto las cargas recaen sobre el productor de residuos. El calor viene sin carga.

La asignación predeterminada se basa en la asignación en el punto de sustitución (a partir de ahora APOS, por sus siglas en inglés “Allocation at the Point of Substitution”). El modelo APOS sigue el enfoque atribucional, en el que las cargas se atribuyen proporcionalmente a procesos específicos. En este caso, siempre que sea posible se realizará una asignación física, de lo contrario se hará una asignación APOS en el que un proceso/tratamiento de reciclaje que dé como resultado un producto comercializable, el impacto dependerá del momento en el que el producto tiene valor en el mercado.

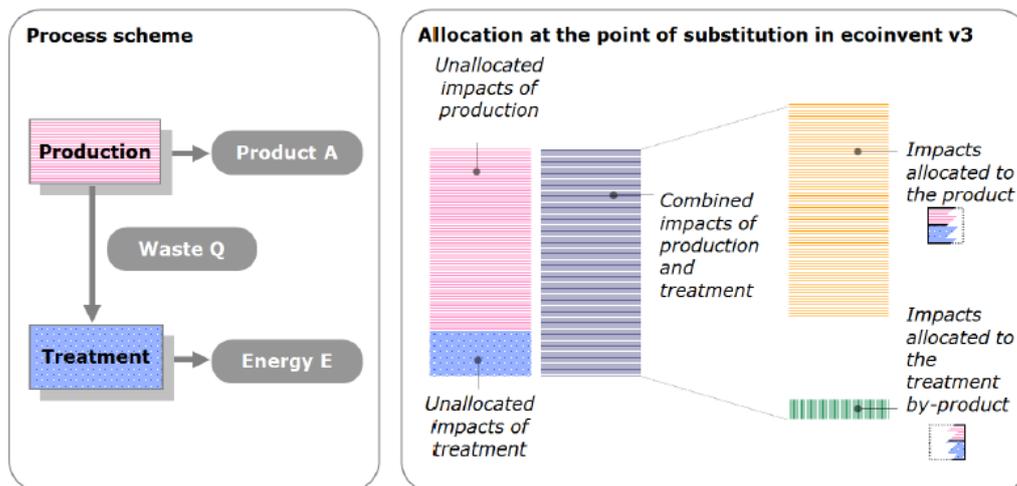


Figura 27: Asignación en el punto de sustitución (Ecoinvent 2017).

El modelo del sistema “Resultante” maneja estas dos opciones metodológicas de manera diferente:

- Utiliza la oferta de productos sin restricciones, basadas en los conjuntos de datos de la actividad del mercado, así como la información incluida a nivel tecnológico.
- Utiliza la sustitución (expansión del sistema) para convertir conjuntos de datos de multiproductos en un solo producto.

El modelo “Resultante” es un modelo del sistema destinado a reflejar las consecuencias de las decisiones a pequeña escala a largo plazo, teniendo en cuenta las restricciones que son aplicables a esta escala y el horizonte temporal. El modelo resultante considera cambios a largo plazo y la regla para el nivel tecnológico de proveedores no restringidos depende de la tendencia del mercado (Ecoinvent 2017).

Por lo tanto un modelo resultante:

- Evalúa los cambios.
- El uso de la sustitución tiene importantes efectos sobre los resultados de producciones con subproductos significativos.
- Utiliza proveedores marginales:
 - Puede reflejar una mejora o ser más impactante que los proveedores promedio (atribucionales).
- El consumo de subproductos crea demanda de producción primaria.

5.3.1.1. Atribucional vs. Resultante

El LCA suele desarrollarse para productos/servicios individuales pero de unos años hacia aquí ha existido un cambio en la aplicación a contextos de decisión a una escala mayor. Una de la razón de este cambio es el hecho de haber descubierto del uso del LCA a grandes productos e infraestructuras, como puede ser una planta de energía.

Por lo tanto se ha ampliado el uso del LCA de productos “convencionales” (una cafetera, un frigorífico, etc.) a productos “no convencionales” (plantas de energía, carreteras, barcos, etc.) mucho más voluminosos y complejos. Esto conlleva la necesidad de realizar un cambio de concepto a la hora de plantear los límites del sistema y la asignación.

El método de un LCA basado en la atribución se centra la descripción de los flujos físicos ambientales relevantes hacia y desde un producto o proceso; mientras que la evaluación resultante describe cómo los flujos ambientales relevantes cambiarán en

respuesta a posibles decisiones. El caso atribucional es más estático, mientras que el resultante es más dinámico (Finnveden, y otros 2008).

Las diferencias entre el LCA atribucional y el LCA resultante son las elecciones hechas en el objetivo y el alcance de los pasos del proceso general del LCA definidos por la ISO 14006.

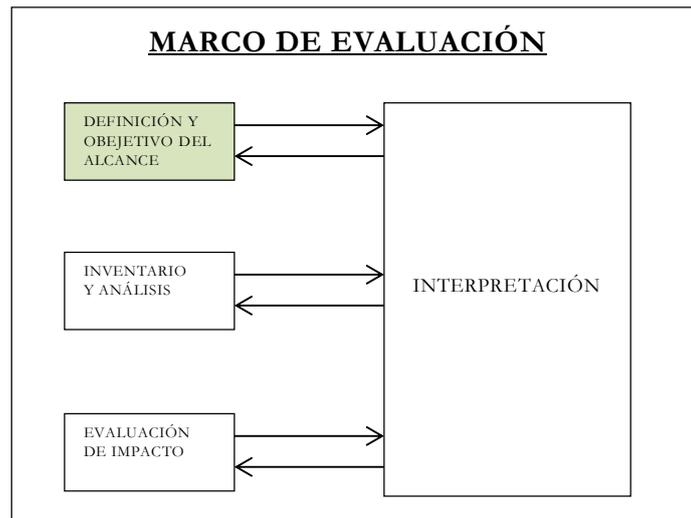


Figura 28: Marco de Evaluación de un LCA (ISO 14006)

En el LCA resultante, los límites del sistema se definen típicamente para incluir las actividades que contribuyen a las consecuencias ambientales de los cambios realizados, independientemente de si estos cambios se encuentran dentro o fuera del sistema *cradle to grave* que se está investigando. Como resultado, el proceso de expansión del sistema (para evitar o tratar el problema de asignación en sistemas multiproducto) es una parte inherente de los estudios LCA resultante.

El resultado de ampliar la definición de lo que se considera un producto, a productos como las centrales eléctricas genera una serie de diferencias relativas al LCA atribucional:

- **COMPLEJIDAD:** debido a que el LCA resultante incluye conceptos económicos adicionales como costes de producción marginales, elasticidad de demanda y oferta, modelos dinámicos (en lugar de los modelos lineales y estáticos de los LCA tradicionales), etc. es conceptualmente más complejo y los resultados obtenidos son altamente sensibles a suposiciones. La falta de

identificación de supuestos implícitos inadecuados, conllevaría un análisis de poca calidad.

- **DATOS:** el LCA atribucional utiliza datos medios (datos que representan la carga ambiental media para producir un producto o servicio en el sistema) para realizar el estudio; en cambio el LCA resultante utiliza datos marginales que representan los efectos de un pequeño cambio en la producción de bienes o servicios. El hecho de concentrarse en datos marginales restringe el conjunto de datos requeridos, ya que los indicadores que no cambian como resultado de la intervención no tienen que conocerse, lo que no ocurre en un LCA atribucional. En cambio, el desafío en el LCA resultante está justificando plenamente que los indicadores particulares no se verán afectados y por lo tanto pueden ser ignorados en el análisis.
- **PERIODO TEMPORAL Y MODELOS:** Centrarse en datos marginales significa que se utilizan diferentes escalas temporales futuras de impacto. El LCA atribucional (en gran parte) se centra sólo en los impactos históricos sobre una vida entera de los productos. Los efectos a corto plazo futuros podrían incluir cambios en la capacidad de producción actual, mientras los efectos a largo plazo pueden implicar cambios en la naturaleza real de la capacidad de producción.

Por ejemplo, el uso reducido de un material o una energía en la producción de un producto puede afectar la oferta y la demanda de estos insumos, y puede conducir a mecanismos de retroalimentación positiva y negativa que impactarán en el futuro uso de los recursos. Tales cambios (bien conocidos y modelados en economía) requerirán el uso de modelos alternativos a los modelos lineales y estáticos que se utilizan en el LCA atribucional.

Por lo tanto, realizar un LCA resultante requiere:

- Definir el alcance y propósito del análisis en relación con la decisión que se va a tomar.
- Enumerar las consecuencias ambientales previsibles de la decisión que sean potencialmente pertinentes.
- Determinar cuál (en el caso que haya) de las consecuencias deben cuantificarse.
- Identificar qué herramientas o enfoques son adecuados para analizar y cuantificar las consecuencias.
- Analizar y describir las consecuencias separadas.

5.3.1.2. La asignación según Ecoinvent adaptado a la remanufactura

Como se ha dicho anteriormente Ecoinvent no es una metodología, sino una base de datos. Aunque sí define diferentes tipos de asignación, se va a excluir el modelo resultante debido a que este se centra en productos “no convencionales” los cuales no están incluidos en esta investigación. En cambio como se comprobará, el modelo “*cut off*” es equiparable a la asignación PPP de Environdec y el predeterminado al definido por ILCD.

5.3.2. Método de asignación según Environdec

Environdec es la entidad reguladora de las declaraciones ambientales de producto certificadas (a partir de ahora EPD[®], por sus iniciales en inglés “*Environmental Product Declaration*”). Una EPD[®] es una declaración que entrega información sobre los datos ambientales de ciclo de vida de un producto o servicio, en conformidad con la norma internacional ISO 14025 (Environdec 2008).

En el marco del Sistema Internacional EPD[®] se deben establecer selecciones metodológicas específicas sobre el manejo de los residuos. Cuestiones como los límites del sistema aguas arriba y aguas abajo, la asignación de reciclaje en bucle abierto, la asignación de múltiples insumos y el periodo de tiempo deben ser considerados cuando el LCA se aplica a los sistemas de gestión de desechos sólidos.

Los desechos en su sentido más amplio, incluyen materiales desechados, productos químicos usados, desechos, aguas residuales y productos desgastados que suelen estar sujetos a:

- Incineración de residuos.
- Tratamiento de residuos o aguas residuales.
- Compostaje.
- Deposición.
- Reciclaje.
- Reutilización.

Por lo tanto, es importante tener un principio general de asignación para cada opción y estos deben contener los siguientes puntos básicos de partida:

- El impacto ambiental vinculado al tratamiento de residuos que no sea utilizado por ningún usuario posterior recae en el generador de residuos, por lo tanto, los residuos no se consideran como recurso.
- El impacto ambiental relacionado con el procesamiento de los residuos que generan un recurso de uso posterior recae en el usuario del recurso resultante.

Estos principios definidos dentro del Anexo de las EPD® (Environdec 2008) han sido establecidos en base al Principio de quien Contamina Paga (a partir de ahora PPP, por sus siglas en inglés “*The Polluter-Pays-Principle*”).

El PPP fue adoptado por OECD16 (Organization of Economic Cooperation and Development (OECD) 1972) en 1972 como principio económico para asignar los costes del control de la contaminación. Según el PPP de la OECD, “*el principio debe utilizarse para asignar los costes de las medidas de prevención y control de la contaminación para fomentar el uso racional de los escasos recursos ambientales y evitar distorsiones en el comercio y las inversiones internacionales. Asumirán los gastos de ejecución de las medidas mencionadas previamente y decididas por las autoridades para garantizar que el medio ambiente se encuentra en un estado aceptable. En otras palabras, el coste de estas medidas debe reflejarse en el coste de los bienes y servicios que causan contaminación en la producción y/o el consumo*”.

Se obtiene la siguiente definición del PPP desde Environdec (Environdec 2008):

El PPP designa la responsabilidad de transportar el próximo impacto ambiental para los sistemas de productos individuales y separa los sistemas de productos interconectados en el punto del ciclo de vida donde su MV es menor, relacionando al negocio un enfoque sobre la diferenciación de los impactos ambientales.

Por lo tanto, este enfoque une los diferentes sistemas de productos en los que los desechos (en su totalidad o en cierta medida), se procesan para convertir en entradas para productos (posteriores). Se considera que la delimitación entre dos sistemas de productos es el punto donde el residuo tiene su “MV más bajo”. Eso significa que quien genera el residuo debe llevar consigo el impacto ambiental completo hasta el punto en el ciclo de vida donde se transporta el residuo a un vertedero/chatarrero o hasta la puerta de una planta de tratamiento de residuo.

El usuario posterior de los residuos tiene que soportar el impacto ambiental de procesamiento y refinamiento de los residuos, pero no el impacto ambiental causado en los ciclos de vida “anteriores”. En la Figura 29 se puede observar la ilustración del enfoque del método. Esta suele estar alienada con las responsabilidades jurídicas y financieras de un generador de residuo.

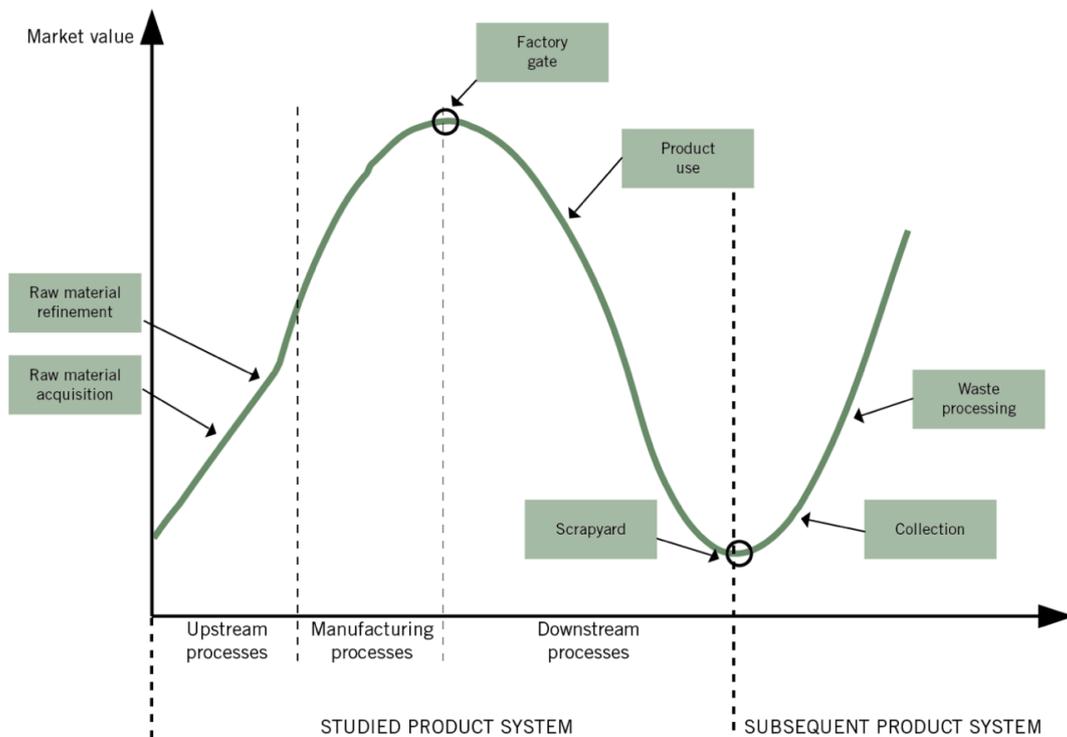


Figura 29: Asignación de los límites del sistema según PPP (Environdec 2008)

En la Figura 30 figuran las consecuencias para los diferentes tipos del manejo de desecho, el tratamiento de productos descargados y los flujos de salida que se reutilizan o reciclan.

A veces, resulta complicado decidir si un flujo material de entrada debe ser considerado como un residuo o el subproducto de un proveedor, es decir, si debe existir algún impacto ambiental asignado a ese material o no. Environdec lo diferencia de la siguiente manera:

- Para el caso en que los residuos/subproductos constituyen una parte sustancial de los ingresos globales del generador de residuos, deben considerarse un subproducto y debe asignarse algún impacto ambiental.
- Para el caso en que los residuos/subproductos no constituyen una parte sustancial de los ingresos totales del generador de residuos, deben considerarse residuos y tratarse de acuerdo con los principios del método de asignación PPP.

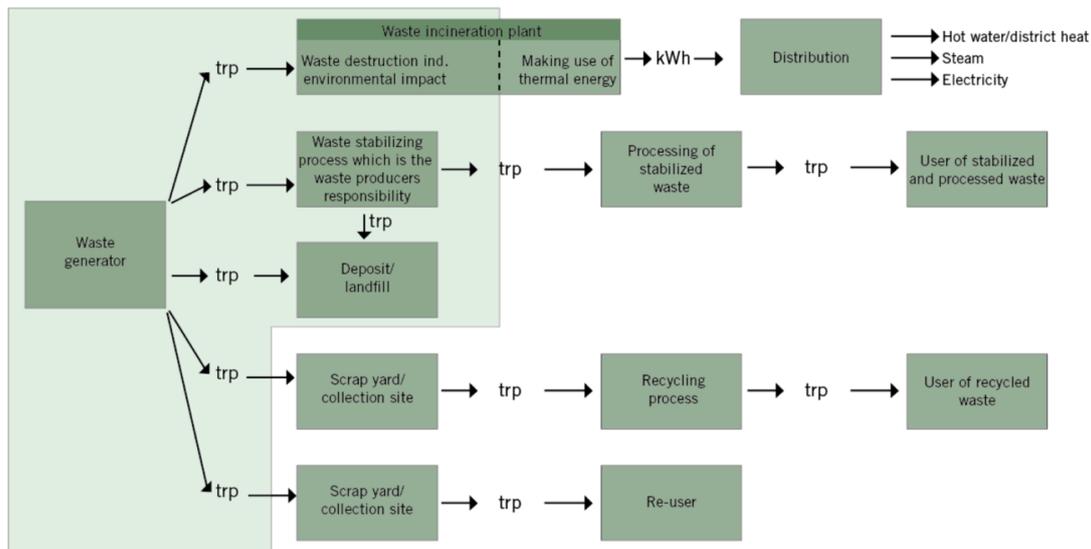


Figura 30: El método PPP ilustrado para las diversas opciones de tratamiento de residuo. El área marcada de verde claro indica el impacto ambiental relativo al generador de residuo (Environdec 2008)⁵.

Por consiguiente, el flujo generado por los residuos de un proveedor que puedan ser tratados sin afectar el proceso del generador de dicho residuo, estará libre de carga ambiental para el usuario; es decir, no se asignará carga ambiental del proceso de una industria, que se haya emitido a un receptor.

Se va a analizar como ejemplo el serrín de un aserradero que constituye el 7% de los ingresos totales del aserradero (ya que podría ser solicitado como biocombustible para plantas de combustión). Por otro lado, el serrín de una industria de muebles podría representar menos del 1% de los ingresos totales, ya que los muebles son productos altamente procesados y más caros. En el primer caso el serrín debe considerarse un subproducto, mientras que en el segundo caso el serrín se considera un residuo.

Realizando un análisis más profundo de cada una de las opciones de EoL planteado en base a PPP, se ven diferencias sustanciales en las mismas:

- **INCINERACIÓN DE RESIDUOS:** la incineración de residuos da como resultado un servicio de destrucción del residuo y productos tales como vapor, agua caliente y electricidad. Los impactos ambientales de la recolección y transporte de los residuos a la planta de la incineración así como los impactos causados por el propio proceso de incineración se asignan al generador de residuos. En cambio, los equipos y procesos necesarios para hacer uso del

⁵ El termino “trp” del texto significa transport.

calor producido (en caso de generarse), por ejemplo para producir calor o electricidad de distrito, se asigna a la parte que se beneficia de estos productos.

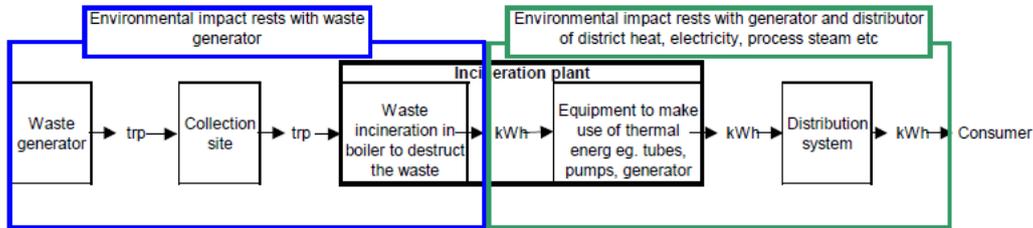


Figura 31: El método de asignación PPP relacionado con la incineración y la generación energética (Environdec 2008)

- **TRATAMIENTO DE RESIDUOS Y AGUAS RESIDUALES:** el impacto ambiental del transporte de desechos o aguas residuales a una planta para su tratamiento o estabilización así como los impactos causados por el proceso de tratamiento en sí, finalizando en un depósito/vertedero como lodo o descargas de efluentes de agua residuales, recaen sobre el generador del residuo. Sin embargo en el caso que los residuos estabilizados se refinen para su uso (p.e. fertilizantes), el impacto ambiental vinculado a la transformación posterior de los residuos se asigna al usuario de los residuos procesados.
- **DEPOSICIÓN:** el impacto ambiental del transporte de los residuos al depósito/vertedero recae en el generador de los residuos. Por lo tanto no se necesita asignación. Debe tenerse en cuenta la dificultad de estimar el impacto ambiental derivados de las fugas de depósito/vertedero.
- **COMPOSTAJE:** el impacto ambiental del transporte de residuos a una planta de compostaje recae sobre el generador de residuos, así como el impacto ambiental resultante del propio proceso de compostaje. En caso de que el material compostado o sus emisiones sean procesados/refinados posteriormente con fines comerciales/beneficios, los impactos ambientales resultantes se asignan a la parte que se beneficia de esos productos.
- **RECICLAJE:** se considera que los materiales utilizados sujetos al reciclaje abandonan el sistema del producto en estudio libre de cargas ambientales durante el ciclo de vida, es decir, los impactos ambientales de la producción se asigna al sistema de producto en estudio. El procesamiento posterior de los materiales se asigna al siguiente sistema del producto donde se utilizarán los materiales reciclados como material de entrada.

- **REUTILIZAR:** el impacto ambiental del transporte del producto enviado a un centro de recolección recae en el productor del producto, es decir, los residuos que se reutilizan abandonan el sistema del producto sin cargas ambientales. Todos los impactos ambientales a partir de ese punto se asignan al reutilizador.

Tabla 11: Resumen del método de asignación PPP.

MÉTODO DE ASIGNACIÓN EL QUE PRODUCE PAGA (PPP, Polluter Pays Principle)	
CARGAS AMBIENTALES	(ejemplo)
<p>[Def.] El PPP designa la responsabilidad de transportar el próximo impacto ambiental para los sistemas de productos individuales y separa los sistemas de productos interconectados en el punto del ciclo de vida donde su valor de mercado es menor, relacionando al negocio un enfoque sobre la diferenciación de los impactos ambientales.</p>	
<p>El impacto ambiental vinculado al tratamiento de residuos que no sea utilizado por ningún usuario posterior recae en el generador de residuos, por lo tanto, los residuos no se consideran como recurso</p>	
<p>El impacto ambiental relacionados con el procesamiento de los residuos que generan un recurso de uso posterior recae en el usuario del recurso resultante.</p>	
<p>A veces es difícil decidir si un flujo de entrada de material debe ser considerado como un residuo o el subproducto de un proveedor, es decir si debe haber algún impacto ambiental asignado a ese material o no:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si los residuos/subproductos constituyen una parte sustancial de los ingresos globales del generador de residuos/subproductos, deben considerarse un subproducto y debe asignarse algún impacto ambiental. - Si los residuos/subproductos no constituyen una parte sustancial de los ingresos globales del generador de residuos/subproductos, deben considerarse residuos y tratarse de acuerdo con los principios del método de asignación 	<p><i>E serrín de un aserradero que constituye el 7% de los ingresos totales del aserradero (ya que podría ser solicitado como biocombustible para plantas de combustible). Por otro lado, el serrín de una industria de muebles podría representar menos del 1% de los ingresos totales, ya que los muebles son productos altamente procesados y más caros. En el primer caso el serrín debe considerarse un subproducto, mientras que en el segundo caso el serrín se considera un residuo.</i></p>
<p>Por consiguiente, un flujo de residuos de un proveedor que pueda usarse sin afectar el proceso del generador de residuos está libre de carga ambiental para el usuario, es decir, no se asignará carga ambiental del proceso de una industria que se hubiera emitido a un receptor.</p>	

5.3.2.1. La asignación según Environdec adaptado a la remanufactura

En el caso de Environdec, la asignación se apropia del principio PPP. Este principio se basa en que quién genera el residuo debe llevar consigo el impacto ambiental completo. Esto incluye el punto en el ciclo de vida dónde se transporta el residuo a un vertedero o hasta la puerta de una planta de tratamiento.

Por lo tanto, basándose en la asignación de Environdec el límite del ciclo de uso de la remanufactura está delimitado por el transporte hasta la planta dónde se vaya a realizar el proceso de remanufactura. A partir de la introducción en esa planta comenzará el siguiente el ciclo de uso. En la Figura 32 el punto de recogida delimita el fin de un

ciclo de uso y el comienzo del siguiente ciclo. Es decir, una vez se haya realizado la recogida del core comenzará el segundo ciclo.

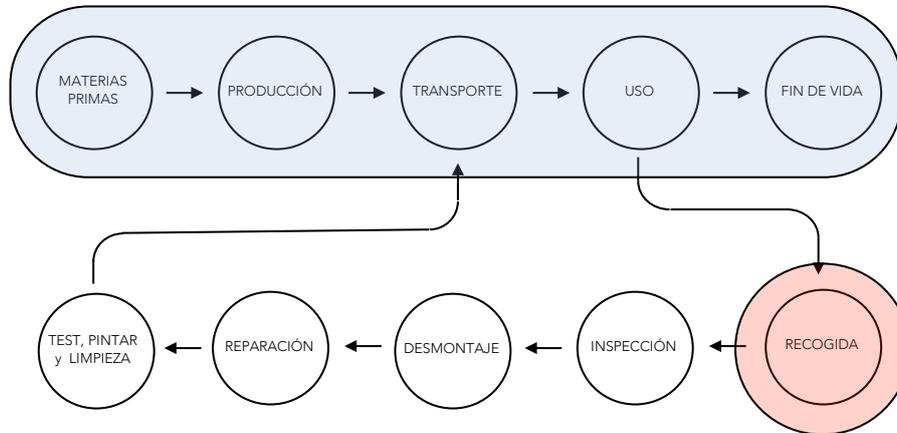


Figura 32: El punto rojo delimita el fin del primer ciclo según el estudio de Environdec (elaboración propia).

5.3.3. Método de asignación según ILCD (modelo atribucional)

Desde el Manual ILCD se detalla el proceso del reciclaje dentro del modelo atribucional. Aunque este modelo este pensado principalmente para el reciclaje, no se descarta su aplicación en procesos tales como la reutilización o la recuperación energética, teniendo su apartado n el Anexo C: “Reutilización, Reciclaje y Recuperación Energética” (European Comision - Joint Reserch Centre - Institute for Environmetal and Sustainability 2010).

El modelo ILCD plantea algunas cuestiones relativas al reciclaje dentro de un modelo de atribución:

- Dónde trazar el límite del sistema entre el primer ciclo de vida y los ciclos de vida posteriores.
- Cómo aplicar el procedimiento de asignación de dos etapas del ILCD a estos casos.

Por lo tanto, será necesaria la siguiente información para responder a las preguntas planteadas anteriormente:

- Cuál es el MV de los residuos o productos en el EoL.
- En caso de ser inferior a cero (el valor del mercado): existe algún bien secundario valioso generado durante el tratamiento y, en caso afirmativo, en qué etapa de procesamiento.

- En cualquier caso, cuáles son sus características físicas y su MV.

De todo ello se diferencian dos casos, uno en el que el valor del mercado es menor a cero y otro cuando ese valor es superior a cero.

5.3.3.1. Casuística 1: valor del mercado superior a cero

Cuando el valor en el mercado del desecho del producto es superior a cero en su punto de origen del residuo, desde una perspectiva de LCA será un co-producto y la multifunción se debe resolver mediante asignación. Esto se realiza aplicando el procedimiento de los dos pasos (analizado en profundidad en el capítulo 7.9.3 de ILCD Handbook (European Comision - Joint Reserch Centre - Institute for Environmetal and Sustainability 2010)). Como paso especial, se debe identificar el proceso de co-producción: esto es, el paso del proceso que ha producido un producto técnicamente muy similar al desecho.

El proceso del reciclaje es diferente al caso general de la multifuncionalidad, debido a que el bien secundario no sólo es una co-función del sistema sino que se recicla una y otra vez (cada vez en cantidades/calidades inferiores, debido a las pérdidas de cada bucle). Por lo tanto se tienen muchos co-productos, respectivamente una gran cantidad de usos secundarios disponibles, tras la primera ronda de reciclaje. Todo esto debe ser considerado en la identificación del inventario para el bien secundario.

Al aplicar estrictamente el modelo de atribución, asignado por causalidad física, estos bienes secundarios, pueden reciclarse de manera diferente y tienen diferentes inventarios: algunos sólo tienen un ciclo de reciclaje, mientras otros, tal vez no. Para llegar a un inventario medio, los diferentes inventarios de diferentes cantidades de diferentes bienes secundarios reciclados deben integrarse mediante un promedio. Esto se requiere en la práctica, debido a que habitualmente no se sabe el número de ciclos de un producto secundario y las cuestiones se suelen relacionar con el promedio del producto no con el ciclo específico.

Primer Paso: Cantidad Total de Usos

Cuando se recicla un producto en el EoL, se obtiene una fracción del material original, piezas o energía como producto secundario e incorporado a un nuevo producto. Cuando el producto fabricado a partir de este bien secundario también se recicla, se obtiene de nuevo una fracción más pequeña del material original, la pieza o la energía que es incorporado en un tercer producto.

Dada la reciclabilidad y las pérdidas durante el reciclaje, las porciones de los bienes secundarios en el mercado se suelen calcular de manera diferente. Se puede resumir para representar la cantidad total de una unidad de material que efectivamente ha sido utilizado, una vez se pierde el material en bucles indefinidos de reciclaje: esta cantidad total de uso “u” es la suma de la cantidad de uso primario “p” más la cantidad obtenida después de la primera ronda de reciclaje, más la cantidad obtenida después de la segunda ronda de reciclaje, etc.

Se va a profundizar lo mencionado mediante el siguiente ejemplo:

Si se tiene un envase de 1 [kg] fabricando del material X de la ruta primaria y se puede reciclar el envase con un índice de reciclado del 90%, la cantidad total de usos de los materiales primarios es de $1\text{kg}+0,9\text{kg}+0,81\text{kg}+0,729\text{kg}$, etc.

Por lo tanto, se puede calcular a partir del número total de “n” veces que el material original, pieza o energía se recicla y por el índice de reciclaje “r” de cada paso.

Para los dos primeros bucles de reciclaje se obtiene “u’”, en consecuencia:

$$u' = p + p * r + p * r^2$$

u’= cantidad total de uso

p= cantidad primaria

r= la media de la tasa de reciclaje [0...1), incorporando tanto las eficiencias de recolección como las eficiencias de procesamiento.

Con “n” como número total de bucles, y simplificando la serie matemática, la cantidad total se usos después de n bucles es:

$$U = \sum_{i=0}^n (p * r^i) = p * \frac{(1 - r^{n+1})}{(1 - r)}$$

U= cantidad total de uso

i= número del bucle del reciclaje

n= número total de bucles de reciclaje

En el ejemplo citado anteriormente con $p=1[\text{kg}]$ y una tasa de reciclabilidad del 95% ($r=0,95$) después de un número indefinido de n bucles se obtiene una cantidad total de uso de $20[\text{kg}]$ (en este caso $U=p/(1-r)$).

Segundo Paso: el inventario de ciclo de vida total sobre la cantidad total de uso

El LCI total sobre la cantidad de uso total es la suma de los inventarios de la producción primaria “p” (hasta el nivel de calidad de los productos desechos/EoL útil), todos los bucles de reciclaje “R” y toda la gestión de residuos de las fracciones no recicladas y otras pérdidas “W”.

Los procesos de reciclaje repetidos y el desecho contribuyen al inventario total. Por lo tanto, este inventario total incluye todos los procesos hasta el nivel de calidad de la materia prima, del portador de la energía o de la parte que se obtiene posteriormente mediante el reciclado, además de todas las etapas de reciclaje y tratamiento de residuos.

En cambio no incluye los procesos de la fabricación y uso de los productos fabricados a partir de ese material, pieza o energía transportada debido a que estos procesos no están relacionados físicamente con la producción del material reutilizado/reciclado/recuperado posterior, el transporte energético o la pieza.

Por lo tanto se obtiene la siguiente ecuación:

$$I = p * (P + W + R * \frac{(r - r^{n+1})}{(1 - r)})$$

I=LCI total de la cantidad total de uso unitario inicial de MMPP, pieza o energía

P= LCI de la producción primaria por unidad de material, pieza o energía transportada.

R= LCI del esfuerzo para la reutilización/reciclaje/recuperación por unidad de material, pieza o energía transportada.

W= LCI de la gestión del residuo final por unidad de material descartado, pieza o energía transportada.

Paso Final: Inventario medio por unidad y corrección de valor

Ahora se determinará el criterio de asignación física para determinar la asignación de estos inventarios *cradle to door* del material, la pieza o la energía entre las dos co-funciones. En este caso, el criterio es simplemente de masa, ya que la cantidad del material, la pieza o la energía transportada que se requiere físicamente para ambas co-funciones obviamente es la misma. A partir de aquí se podrá obtener el inventario medio “e” por unidad de material, pieza o energía transportada, dividiendo el LCI total de cantidad total de uso “I” por la cantidad total de uso “U”.

$$e = \frac{I}{U} = \frac{p * (P + W + R * \frac{(r - r^{n+1})}{(1 - r)})}{p * \frac{(1 - r^{n+1})}{(1 - r)}}$$

e = LCI medio por unidad de material, pieza o energía transportada

La fórmula puede simplificarse en:

$$e = \frac{(P + W) * (1 - r) + R * (r - r^{n+1})}{(1 - r^{n+1})}$$

Con un número de bucles indefinidos la expresión r^{n+1} se aproxima a 0 (como $r(0...1)$), la fórmula final queda simplificada en:

$$e = (P + W) * (1 - r) + R * r$$

Obsérvese que esto supone la igualdad técnica entre el material primario producido y el material reutilizado/reciclado/recuperado, la pieza o la energía transportada. En caso de discrepancias (p.e. para muchos casos de polímeros reciclados), se debe introducir un factor corrección. Se puede entender que este factor corrige la no-equivalencia total de la calidad técnica del material primario producido. Esto se da especialmente en productos complejos de EoL, ya que esto también capta el esfuerzo adicional para por ejemplo aislar diferentes materiales o piezas. Este factor de correlación debe ser la relación de precio de mercado del material secundario/primario, pieza o energía transportada.

5.3.3.2. Casuística 2: valor del mercado inferior a cero

En el caso donde el desecho no pueda venderse directamente, no será un co-producto, sino un residuo. Pero se pueden diferenciar dos tipos de casos:

- Los casos en los que no se produce ningún producto de valor en el proceso de tratamiento (aquellos que van directamente a vertedero, incineración sin recuperación de energía, etc.), se modelarán todas las etapas del tratamiento de residuos y el inventario se asignará en su totalidad al primer sistema que ha generado el desecho.
- Los casos en los que en el proceso de tratamiento se produce un producto valioso (p.e. electricidad generada en la incineración de residuos o un bien secundario tras algunas etapas adicionales de limpieza y tratamiento, etc.), este bien secundario es un co-producto y como tal contiene una asignación. Esto

nos conduce a la siguiente cuestión, cuál es la carga que debe llevar este bien secundario.

Se argumenta que todos los procesos de tratamiento necesarios hasta que el desecho tratado este logrando un MV de cero, están dentro de la responsabilidad del primer sistema (es decir los pasos de los procesos P_1 a P_{n-1} de la Figura 33). Esto es debido a que los residuos o productos de EoL son generados por el primer sistema, mientras que un desecho no puede soportar por sí mismo ninguna carga de tratamiento. Además, se considera inapropiado atribuir todos los procesos de tratamiento procedentes de residuos al bien secundario producido eventualmente.

Por lo tanto, una asignación de carga a los bienes secundarios se puede admitir sólo en la etapa en el que se produce un bien secundario valioso P_n .

En dicho proceso se aplicará el siguiente procedimiento:

En primer lugar modelar los procesos de gestión/tratamiento del desecho hasta que los residuos tratados atraviesen el límite de “valor cero del mercado” (véase la Figura 33). Posteriormente, el procedimiento de la asignación de dos etapas se aplicará en este punto del proceso.

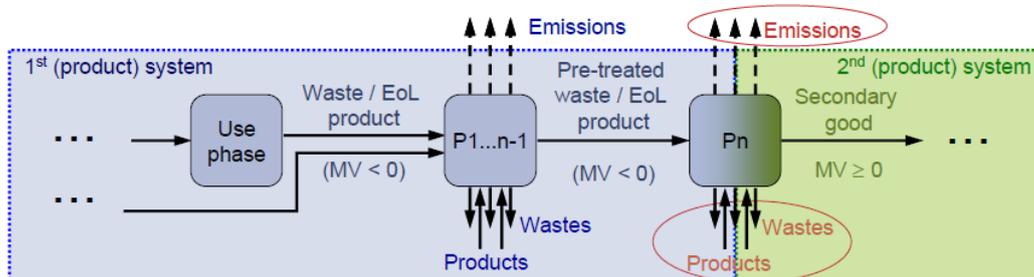


Figura 33: Asignación de productos desechos/EoL, cuando en el proceso de gestión se obtiene como resultado un producto valioso (ILCD).

En la Figura 33 se observa que si el proceso de gestión resulta en algún producto valioso (bien secundario) además de la asignación del bien, el inventario de la etapa del proceso de tratamiento P_n en la que el residuo crea la frontera del MV (de $MV < 0$ a $MV > 0$) se distribuirá entre los dos ciclos de vida: las emisiones, residuos y productos/consumibles circundantes se comparten entre el desecho pre-tratado (es decir, entre el primer sistema) y el bien secundario (es decir, el segundo sistema).

Se puede observar que para el caso “el precio de mercado es inferior a cero”, se debe realizar una doble asignación: primero entre los co-productos del sistema primario y en

segundo lugar, y además, entre el desecho pre-tratado que entra en el proceso P_n (entre el 1^{er} y 2^{do} ciclo de vida) y el bien secundario que lo deja.

Para ambas asignaciones, se aplica el mismo procedimiento de dos etapas analizado en el capítulo 7.9.3 de ILCD Handbook (European Comision - Joint Reserch Centre - Institute for Environmetal and Sustainability 2010):

- **1^{er} criterio de determinación de causalidad física:** en el caso de obtener durante la etapa del proceso un producto valioso (bien secundario), los valores del inventario correspondiente se asignan entre el 1^{er} ciclo de vida y el bien secundario.
- **2^{do} criterio de valor de mercado:** el inventario restante exclusivo de la etapa del proceso que produce un producto valioso (bien secundario) se asigna con el criterio de MV entre el bien secundario y el (potencialmente pre-tratado) desecho que entra en este paso del proceso, es decir el primer ciclo de vida.

Tabla 12: Resumen del modelo de asignación marcado por el ILCD.

MÉTODO DE ASIGNACIÓN SEGÚN ILCD (Atribucional)
CARGAS AMBIENTALES
<i>Se detalla el proceso del reciclaje dentro del modelo atribucional. A pesar de detallarse el caso del reciclaje, no se descarta aplicación en otros procesos como la reutilización o la recuperación energética.</i>
Se diferencian dos casos, uno en el que el MV es >0 y otro en el que el MV<0.
Cuando el VM del producto es >0 quiere decir que no es un residuo sino un co-producto y la multifunción se debe resolver mediante asignación (procedimiento de los dos pasos , analizarlo).
Cuando el VM del producto es <0 existen dos opciones: - en el que el mediante el tratamiento no se produce un producto de valor, y - en el que se produce un producto de valor tras el tratamiento.
Cuando un producto tiene un MV de cero, las cargas ambientales se atribuyen al primer sistema, debido a que el EoL es generado por el 1 ^{er} sistema. Se considera inapropiado atribuir todos los procesos de tratamiento a bienes secundarios producidos eventualmeten.
Una asignación de carga de bienes secundarios se podrá admitir cuando se produce un bien secundario valioso. El inventario de la etapa del proceso de tratamiento donde se cruza el MV (de MV<0 a MV>0) se distribuirá entre los dos ciclos de vida.

5.3.3.3. Procedimiento de dos etapas

El procedimiento de dos etapas es la manera de aplicar la asignación cuando el MV del desecho es superior a cero en su punto de origen. Aplicando la perspectiva del LCA este desecho podrá ser un co-producto y por ello, la multifunción se debe resolver mediante asignación, aplicando el procedimiento de los dos pasos. (European Comision - Joint Reserch Centre - Institute for Environmetal and Sustainability 2010)

El procedimiento de los dos pasos se centra en dos principios, la causalidad física y el valor económico, pudiendo resumirse estos dos principios:

1. Las **Relación Causal Determinante** es la identificación y la aplicación entre cada flujo no-funcional y las co-funciones del proceso. En la medida de lo posible se debe usar el enfoque de la subdivisión virtual, para asignar flujos a las co-funciones.
2. Los flujos aplicados mediante el **Criterio de Asignación General**. En este caso, los flujos que no pueden asignarse mediante el primer caso se deben asignar utilizando un segundo criterio de Asignación General, siendo el MV de las co-funciones en la condición específica y en el momento que abandonan el proceso.

Causalidad Física Determinante

Para los bienes y servicios esta asignación contiene principalmente tres componentes: la causalidad, la física y la determinante.

Tabla 13: Componentes de la Causalidad Física Determinantes

La Causalidad	La Causalidad Física	La Causalidad Física Determinante
Se refiere a la cuestión de si la existencia y la cantidad de un flujo no-funcional es causada por la co-función específica.	Significa que esta causa deba ser físicamente determinable, incluyendo una propiedad de flujo físico exhaustivo (por ejemplo: contenido de energía, masa, volumen, longitud/distancia, n° de horas, cantidad de piezas...).	Se refiere al hecho de que a menudo existen varias relaciones físicas causales de las que sólo una o una combinación de dos está determinando las existencias y la cantidad de un flujo no-funcional

La causalidad física determinable se identifica respondiendo a la pregunta “¿existe una función específica que el flujo no-funcional realiza para uno o más de los co-productores y puede cuantificar el alcance de esta función a través de un criterio físico?” y “de ser así, ¿hay otros flujos no funcionales que ocurren cuantitativamente, o en parte, como consecuencia directa o indirecta del flujo físico no funcional inicialmente identificado?”

Es importante resaltar que aparte de lo que a menudo se encuentra en la práctica, no hay necesidad de aplicar el mismo criterio de causalidad física a todos los flujos no-funcionales.

Segundo Criterio (General) “Valor Económico” o QFD

A aquellos flujos que no puedan ser asignados por el primer criterio, se les puede aplicar un segundo criterio general: la asignación de la co-funciones y comparticiones de productos multifuncionales.

Para casos excepcionales en los que los productos multifuncionales no son lo suficientemente similares a la unidad funcional (por ejemplo una impresora-fax-fotocopiadora y una impresora-fax-fotocopiadora-escáner), puede considerarse la aproximación mediante la utilización de la función de calidad (a partir de ahora QFD, por sus siglas en inglés “*Quality Function Deployment*”) para asignar piezas del inventario que no tienen funciones comunes y que los productos comparados sean suficientes.

El QFD debe usarse para la asignación mediante el precio de mercado, en el caso de que la causalidad física no se pueda solventar mediante la multifuncionalidad. Habitualmente se aplica en la etapa de producción; para la etapa de uso, el precio de mercado así como el coste del servicio debería servir (sin embargo se excluyen los costes de personal/del tiempo de operaciones, ya que dificultará considerablemente la determinación).

5.3.3.4. La asignación según ILCD adaptado a la remanufactura

El modelo ILCD es un modelo atribucional. A la remanufactura se le atribuye la lógica de que el MV es inferior a cero. Para esta casuística, en el que el tratamiento produce un producto valioso, todos los procesos necesarios hasta que el desecho tratado esté logrando un MV de cero están dentro de la responsabilidad del 1^{er} sistema. Una vez se valoriza el producto, a este se le aplicará la asignación de las dos etapas (variación entre causalidad física y MV), igual que en el caso de APOS de Ecoinvent. En el caso de un producto remanufacturado el core se mantiene en el sistema, esto conlleva que la mayoría de los flujos de materiales no se reparte a lo largo de diferentes sistemas.

Por lo tanto, basándose en la asignación de ILCD el límite del ciclo de uso de la remanufactura se debe determinar cuándo el producto obtiene MV el producto remanufacturado. Ese instante vendrá dado a lo largo de la reparación o en el instante de cerciorar la óptima calidad del producto. En Figura 34 la franja verde delimita el fin de un ciclo de uso y el inicio del siguiente.

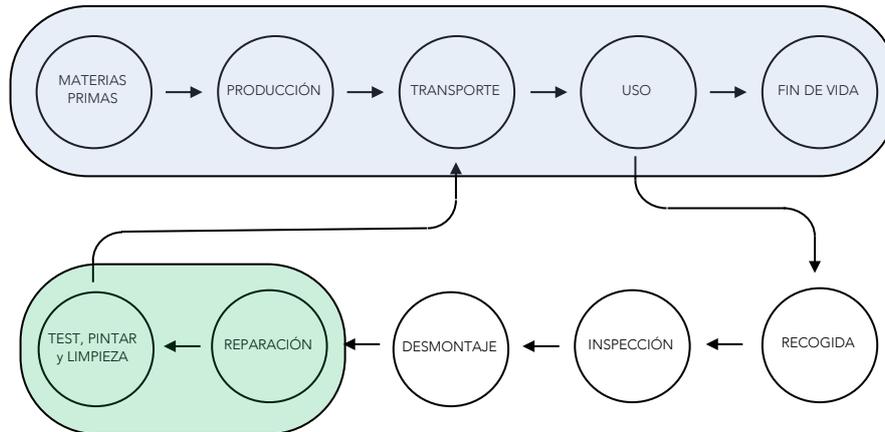


Figura 34: En el instante de obtener $MV > 0$ (zona verde) finalizará el primer ciclo según el estudio de ILCD (elaboración propia).

5.3.4. Tratamiento de la multifuncionalidad según la HUELLA AMBIENTAL (formula de referencia para el EoL)

El tema de la multifuncionalidad y el tratamiento de la misma en situaciones de reciclado están reflejados en las recomendaciones la Comisión del 9 de abril del 2013 “sobre el uso de los métodos comunes para medir y comunicar el comportamiento ambiental de los productos y las organizaciones a lo largo de su ciclo de vida” (Comisión Europea 2013).

El tratamiento de la multifuncionalidad de los productos es particularmente complicado en situaciones de reutilización o valorización energética de uno (o más) productos, ya que los sistemas tienden a volverse bastante complejos.

Para ello se plantea la fórmula que figura a continuación para el uso de los recursos y de emisiones resultantes por unidad de análisis, el cuál:

- Es aplicable al reciclado en ciclo abierto y al reciclado en ciclo cerrado.
- Se puede considerar la reutilización del producto evaluado; este proceso se modeliza de manera similar al reciclado.
- También se puede contemplar el ciclo de degradación, es decir, las diferencias de calidad entre el material secundario (material reciclado o reutilizado) y el material primario (material virgen).
- La valorización energética está incluida.

- Asigna los impactos y beneficios derivados del reciclado, a partes iguales, al productor que utiliza el material reciclado y al productor que produce el producto reciclado: asignación 50/50.

Deben recopilarse los valores cuantitativos de los parámetros pertinentes a fin de aplicar la fórmula indicada a continuación para estimar el perfil global de uso de los recursos y de emisiones por unidad de análisis. Siempre que sea posible, esos valores deberían determinarse sobre la base de los datos asociados a los procesos realmente afectados. Sin embargo, puede que esto no siempre sea posible/viable y que deban buscarse los datos recurriendo a otras fuentes (Comisión Europea 2013).

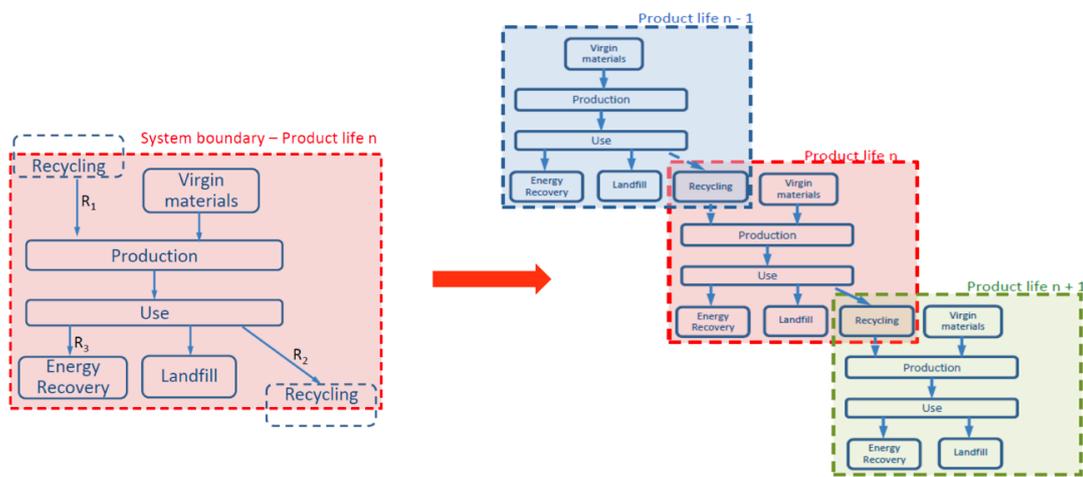


Figura 35: Límites del sistema en el ciclo de vida n y la interacción con los ciclos colindantes (EC)

El perfil de uso de los recursos y de emisiones por unidad de análisis se calcula aplicando la siguiente fórmula:

$$\left(1 - \frac{R_1}{2}\right) \times E_V + \frac{R_1}{2} \times E_{recycled} + \frac{R_2}{2} \left(E_{recyclingEoL} - E_V^* \times \frac{Q_S}{Q_P}\right) + R_3 \left(E_{ER} - LHV \times X_{ER,heat} \times E_{ES,heat} - LHV \times X_{ER,elec} \times E_{ES,elec}\right) + \left(1 - \frac{R_2}{2} - R_3\right) E_D - \frac{R_1}{2} \times E_D^*$$

Esta fórmula puede agruparse en cinco bloques:

$$VIRG_{IN} + REC_{IN} + REC_{OUT} + ER_{OUT} + DISP_{OUT}$$

Esos bloques se interpretan como sigue (a continuación se explican los distintos parámetros):

- $VIRG_{IN} = \left(1 - \frac{R_1}{2}\right) \times E_V$; representa el perfil de uso de los recursos y de emisiones de la adquisición y tratamiento previo de material virgen.

- $REC_{IN} = \frac{R_1}{2} \times E_{recycled}$; representa el perfil de uso de los recursos y de emisiones asociado a las entradas de material reciclado y es proporcional a la fracción de las entradas de materiales que ha sido reciclada en un sistema previo.
- $REC_{OUT} = \frac{R_2}{2} \left(E_{recyclingEoL} - E_V^* \times \frac{Q_S}{Q_P} \right)$; representa el perfil de uso de los recursos y de emisiones del proceso de reciclado (o reutilización), del que se deduce el crédito por entradas de material virgen evitadas (teniendo en cuenta todo posible ciclo de degradación).
- $ER_{OUT} = R_3 \left(E_{ER} - LHV \times X_{ER,heat} \times X_{ES,heat} - LHV \times X_{ER,elec} \times X_{ES,elec} \right)$; representa el perfil de uso de los recursos y de emisiones obtenido del proceso de valorización energética del que se han deducido las emisiones evitadas por la sustitución de la fuente de energía.
- $DISP_{OUT} = \left(1 - \frac{R_2}{2} - R_3 \right) E_D - \frac{R_1}{2} \times E_D^*$; representa el perfil de uso de los recursos y de emisiones neto resultante de la eliminación de la fracción de material que no ha sido reciclada (o reutilizada) en la etapa de EoL o que ha sido transferida a un proceso de valorización energética.

Donde:

- E_V = emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes de la adquisición y el tratamiento previo de material virgen. Si no se dispone de tal información, deberían utilizarse datos genéricos obtenidos de las fuentes de datos genéricos indicadas en la sección 5.8.
- E_V^* = emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes de la adquisición y el tratamiento previo de material virgen supuestamente sustituido por materiales reciclables:
 - En caso de reciclarse en ciclo cerrado: $E_V^* = E_V$
 - En caso de reciclarse en ciclo abierto: $E_V^* = E'_V$ representa las entradas de material virgen que corresponden al material virgen sustituido realmente mediante reciclado en ciclo abierto. En caso de no contar con dicha información, deberían formularse suposiciones sobre qué material virgen se ha sustituido, o deberían utilizarse medias de datos que deberían obtenerse de las fuentes de datos genéricos indicadas en puede suponerse que $E_V^* = E_V$, equiparándolo a un reciclado de ciclo cerrado.

- $E_{recycled}$ = emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes del proceso de reciclado del material reciclado (o reutilizado), incluidos los procesos de recogida, clasificación y transporte. Si no se dispone de tal información, deberían utilizarse datos genéricos obtenidos de las fuentes de datos genéricos indicadas en la sección 5.8 (Comisión Europea 2013).
- $E_{recyclingEoL}$ = emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes del proceso de reciclado en la etapa de EoL, incluidos los procesos de recogida, clasificación y transporte. En caso de no poseer dicha información, deben utilizarse datos genéricos obtenidos de las fuentes de datos genéricos indicadas en la sección 5.8 (Comisión Europea 2013).

Nota: En situaciones de reciclado en ciclo cerrado, $E_{recycled} = E_{recyclingEoL}$ y $E_V^* = E_V$

- E_D = emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes de la eliminación de residuos en la etapa de EoL del producto analizado (p. ej., depósito en vertederos, incineración, pirolisis). En caso de no poseer dicha información, deben utilizarse datos genéricos obtenidos de las fuentes de datos genéricos indicadas en la sección 5.8.
- E_D^* = emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes de la eliminación de residuos (p. ej., depósito en vertederos, incineración, pirolisis) en la etapa de EoL del material del que procede el contenido reciclado. En caso de no poseer dicha información, deben utilizarse datos genéricos obtenidos de las fuentes de datos genéricos indicadas en la sección 5.8 (Comisión Europea 2013).
 - Cuando solo se realice el reciclado en ciclo cerrado: $E_D^* = E_D$
 - Cuando solo se realice el reciclado en ciclo abierto: $E_D^* = E_D'$ representa la eliminación del material del que se extrae el contenido reciclado. Si no se dispone de tal información, deberían formularse suposiciones sobre cómo se habría eliminado tal material en caso de no haberse reciclado. En caso de no poseer dicha información, suponer que $E_D' = E_D$.
- E_{ER} = emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes del proceso de valorización energética. En caso de no poseer dicha información, utilizar datos genéricos obtenidos de las fuentes de datos genéricos indicadas en la sección 5.8 (Comisión Europea 2013).

- $E_{ES,heat}$ y $E_{ES,elec}$ = emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) que habrían resultado de la fuente de energía específica sustituida, calor y electricidad, respectivamente. En caso de no poseer dicha información, utilizar datos genéricos obtenidos de las fuentes de datos genéricos indicadas en la sección 5.8 (Comisión Europea 2013).
- R_1 [adimensional] = «contenido de material reciclado (o reutilizado)», es la proporción de material de las entradas en la producción que ha sido reciclado en un sistema previo ($0 \leq R_1 \leq 1$). En caso de no poseer dicha información, obtener información estadística completa y actualizada periódicamente sobre los índices de reciclado y otros parámetros pertinentes de fuentes como Eurostat.
- R_2 [adimensional] = «fracción de material reciclada (o reutilizada)», es la proporción del material en el producto que será reciclada (o reutilizada) en un sistema ulterior. Por tanto, R_2 tomará en consideración las ineficiencias en los procesos de recogida y reciclado (o reutilización) ($0 \leq R_2 \leq 1$). En caso de no poseer dicha información, obtener información estadística completa y actualizada periódicamente sobre los índices de reciclado y otros parámetros pertinentes de fuentes como Eurostat.
- R_3 [adimensional] = proporción de material en el producto que se utiliza para la valorización energética (por ejemplo, incineración con valorización energética en la etapa de EoL ($0 \leq R_3 \leq 1$)). En caso de no poseer dicha información, obtener información estadística completa y actualizada periódicamente sobre los índices de reciclado y otros parámetros pertinentes de fuentes como Eurostat.
- LHV = poder calorífico inferior (p.ej., J/kg) del material presente en el producto que se utiliza para la valorización energética. Este valor debe determinarse con un método de laboratorio apropiado. Si no fuera posible o factible, deberían utilizarse datos genéricos (véanse, por ejemplo, el documento «*ELCD Reference elementary flows*») (flujos elementales de referencia de la ELCD) y la base de datos de la ELCD en la rúbrica «*EoL treatment / Energy recycling*» (tratamiento de EoL / reciclado de energía).
- $X_{ER,heat}$ y $X_{ER,elec}$ [adimensional] = eficacia del proceso de valorización energética ($0 < X_{ER} < 1$) tanto para el calor como para la electricidad, es decir, proporción entre contenido de energía de las salidas (p. ej., producción de calor o electricidad) y contenido de energía del material presente en el producto que se utiliza para la valorización energética. Por tanto, X_{ER} deberá tener en cuenta

las ineficiencias del proceso de valorización energética ($0 \leq X_{ER} < 1$). En caso de no poseer dicha información, utilizar datos genéricos (véase, por ejemplo, la rúbrica de «*EoL treatment / Energy recycling*» (tratamiento de EoL / reciclado de energía) de la base de datos de la ELCD).

- Qs = calidad del material secundario, es decir, calidad del material reciclado o reutilizado (véase la nota infra).
- Qp = calidad del material primario, es decir, calidad del material virgen (véase la nota infra).

Qs / Qp es un índice adimensional que sirve de aproximación para determinar las diferencias de calidad entre el material secundario y el material primario («ciclo de degradación»). De acuerdo con la jerarquía de multifuncionalidad de la huella ambiental (véase la sección 5.10 (Comisión Europea 2013)), se evaluará la posibilidad de determinar una relación física subyacente pertinente como base para el índice de corrección de calidad (el factor de limitación deberá ser determinante). Si esto no es posible, se utilizará otra relación, por ejemplo el valor económico. En ese caso se asume que el precio de los materiales primarios respecto al de los secundarios sirve como indicador de la calidad. En tal situación, Qs / Qp correspondería a la proporción entre precio de mercado del material secundario (Qs) y precio de mercado del material primario (Qp). Los precios de mercado de los materiales primarios y secundarios pueden consultarse en línea. Las RCHAP deberán especificar los aspectos de calidad que hayan de considerarse respecto a los materiales primarios y secundarios.

5.3.4.1. La asignación según PEF adaptado a la remanufactura

Finalmente, el modelo PEF utiliza una asignación 50/50. Aquí la cuestión principal reside dónde se inicia a contabilizar la asignación y dónde se debe finalizar, es decir, cuál es la franja de la asignación 50/50. En la ecuación se detallan las emisiones para un material reciclado/reutilizado, para las que se incluyen los procesos de recogida, clasificación y transporte.

Por lo tanto, basándose en la asignación 50/50 el límite del ciclo de uso de la remanufactura se determinará incluyendo el transporte a la planta y todos los procesos posteriores de la remanufactura. El transporte al siguiente punto de uso corresponderá al próximo ciclo. El impacto debe repartirse entre el fin de un ciclo de uso y el inicio del siguiente viene delimitado por la franja amarilla de la Figura 36.

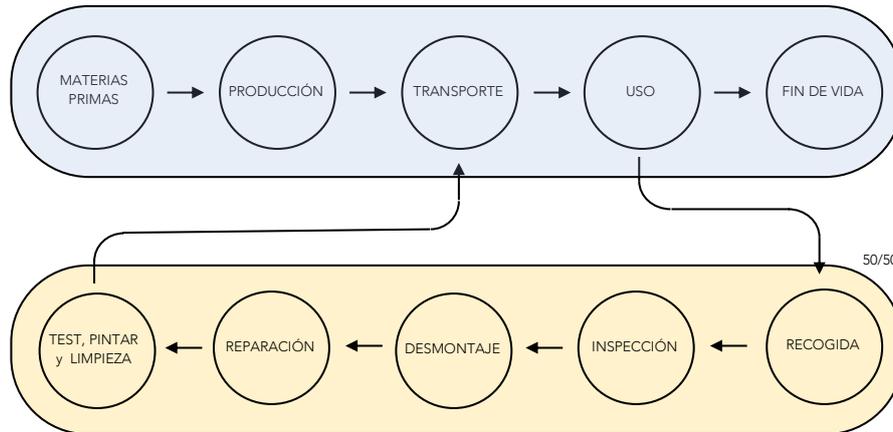


Figura 36: El impacto ambiental correspondiente al espacio de amarillo será el que se repartan los ciclos correspondientes, según la PEF (elaboración propia).

CAPITULO 6 SUJETO A CONFIDENCIALIDAD POR EL AUTOR

7. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

7.1. CONCLUSIONES

En el Capítulo 2 de la presente tesis doctoral se han descrito los objetivos y las hipótesis de la investigación. En este apartado se analiza el nivel de cumplimiento de las hipótesis y los objetivos descritos.

Con el primer objetivo se pretende “demostrar que un producto industrial remanufacturado es, ambientalmente hablando, más sostenible que uno de nueva fabricación”. Este objetivo se ha cumplido, al menos, para el estudio de LCA realizado en el caso del servomotor. En dicho caso se ha demostrado que el impacto de los productos remanufacturados es menor que para uno de nueva fabricación.

Mediante el segundo objetivo de la investigación se pretendían “delimitar los sistemas de un producto remanufacturado, marcando el inicio y el final de cada uno de los ciclos. Es decir, tanto para el primer ciclo, como para los ciclos intermedios y el ciclo final”. Debido al análisis realizado de las diversas metodologías de asignación se ha conseguido delimitar el inicio y el fin de ciclo para un producto remanufacturado. Finalmente se han realizado tres tipologías de delimitación (asignación) diferentes. A la hora de generar un marco definitivo habría que decantarse por una de ellas.

El objetivo final era el de “realizar un estudio comparativo de LCA entre un producto remanufacturado y uno de nueva fabricación”. Y se ha cumplido realizando el estudio de LCA de un servomotor de Fagor Automation y la remanufactura del mismo modelo de motor de su unidad de negocio Motorlan – Fagor Automation, especializados en reparación y remanufactura de motores y servomotores.

A su vez se van a analizar una a una las hipótesis designadas, estudiando su nivel de cumplimiento:

HIPÓTESIS 1: Un producto remanufacturado reduce el impacto ambiental frente a uno de nueva fabricación. Esa reducción se fundamenta mediante el estudio de los indicadores ambientales según el método de evaluación de impacto CML-IA baseline, por ejemplo: potencial del calentamiento global, acidificación, eutrofización, toxicidad humana,...

Se ha demostrado que un producto remanufacturado reduce el impacto ambiental mediante el indicador CML-IA frente a uno de nueva fabricación, al menos para el caso del servomotor. Mediante el estudio del servomotor se ha visto que a lo largo de tres ciclos el impacto total de un servomotor

remanufacturado es un 3,56% frente a los de nueva generación. Además obviando la fase de uso (transversal a todos los ciclos), dicha reducción se aumenta hasta un 60,92%. De todo ello se puede concluir que un servomotor remanufacturado tiene un impacto ambiental menor que un servomotor de nueva fabricación.

HIPÓTESIS 2: La cantidad de ciclos de uso de un producto remanufacturado (esto es, la cantidad de veces que se reincorpora renovado al mercado) influye en la reducción del impacto ambiental.

Así es, se ha demostrado que cuanto más veces se remanufacture un producto (en este caso un servomotor), más reduce su impacto ambiental, aunque cada mejora obtenida frente a los ciclos anteriores es menor. De aquí se deduce que llegará un momento en el que lo ideal será desechar el productor remanufacturado y volver a por uno nuevo.

Además hay que destacar que este producto tiene una gran dependencia de la fase de uso. Esto significa que en caso de que se mejoren mucho las eficiencias energéticas de los servomotores, debe volver a analizarse la progresión de la mejora de los productos remanufacturados frente a los nuevos servomotores fabricados.

Finalmente contemplar que los materiales intrínsecos del servomotor remanufacturado puede que en un momento dado no respondan de manera óptima y debería estudiarse a lo largo de cuántos ciclos podría ser remanufacturado, obteniendo óptimos resultados.

HIPÓTESIS 3: El impacto ambiental de los ciclos de remanufactura varía dependiendo de si es un primer ciclo, un ciclo intermedio o el ciclo final.

Se ha demostrado que el impacto ambiental de cada uno de los ciclos (para el servomotor remanufacturado) es diferente. Cabe resaltar que debido a la fuerte dependencia de la fase de uso (impacto ambiental superior al 90%), estas diferencias son mínimas. El resultado del impacto obtenido es muy similar en todos los ciclos, variando entre un 32% y un 34%.

Al extrapolar este análisis sin la fase de uso, dichas diferencias son mucho mayores, obteniendo un impacto medio del 89,21% para el primer ciclo y un 3,68% para el ciclo final.

HIPÓTESIS 4: El impacto ambiental comparativo entre un producto de nueva fabricación y uno remanufacturado, variará dependiendo del ciclo con el que se realice la comparativa.

Así es, se ha visto que el impacto ambiental varía a lo largo de los ciclos entre los remanufacturados y los de nueva fabricación. En todas las metodologías de

asignación utilizadas el primer ciclo de un producto de nueva fabricación es menor que el de uno remanufacturado. Aunque esa mejora es mucho menor que las mejoras posteriores obtenidas para un servomotor remanufacturado.

7.2. LÍNEAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Las principales líneas de investigación que han quedado abiertas tras el desarrollo de la presente tesis doctoral son las siguientes:

- Con el marco delimitado en la investigación continuar realizando una comparativa de LCA con diversos productos. De tal manera que se pueda concluir la mejora ambiental de un producto remanufacturado frente a uno de nueva fabricación.
- Corroborar los estudios/resultados con productos que no tengan una dependencia tan marcada de la fase de uso y el consumo de energía.
- Mediante la realización de una cantidad mayor de estudios comparativos decidir cuál de las metodologías de asignación es la más adecuada para la remanufactura. Otra opción puede ser estudiar y generar el marco para delimitar de una manera consensuada el punto de los cambios de ciclo dentro de la remanufactura. A su vez, esto puede ampliarse a los diferentes cierres circulares de la CE.
- Incluir factores del deterioro del producto según se van ampliando los ciclos del producto remanufacturado.

BIBLIOGRAFÍA

- Allacker, K., F. Mathieux, S. Manfredi, N. Pelletier, C. De Camillis, F. Ardente, y R. Pant. 2014. «Allocation solutions for secondary material production and end of life recovery: Proposal for product policy initiatives.» *Resour Conserv Recy* (88): 1-12.
- Amaya, J., P. Zwolinski, y D. Brissaud. 2010. *Environmental benefits of parts remanufacturing: the truck injector case*. Anhui, China: 17th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering.
- Amezquita, T., R. Hammond, y B. Bras. 1995. «Characterizing the Remanufacturability of Engineering Systems.» (Proceedings of ASME Advances in Design Automotion) (271-278).
- Amezquita, T., y B. Bras. 1996. «Lean remanufacturing of an Automobile clutch.» (Firs International Workinf Seminar on Reuse).
- Andersen, Maj Munch, y Arnold Tukker. 2006. *Perspectives on Radical Changes to Sustainable Consumption and Production (SCP)*. Workshop of the Sustainable Consumption Research Exchange, Copenhagen: SCORE!
- APRA Europe. 2010. *APRA Europe*. Último acceso: 13 de 06 de 2016. <http://www.apra-europe.org/main.php?target=newsarchiv&contentid=2075>.
- Asif, Farazee M.A., Amir Rashid, Carmine Bianchi, y Cornel M. Nicolescu. 2015. «System Dynamics models for decision making in product multiple lifecycles.» *Resources, Conservation and Recycling* 20-33.
- Asif, Farazee M.A., Carmine Bianchi, Amir Rashid, y Cornel Mihai Nicolescu. 2012. «Performance analysis of the closed loop supply chain.» *Journal of Remanufacturing*.
- Atasu, A., M. Sarvary, y L.N. Van Wassenhove. 2008. «Remanufacturing as a Marketing Strategy.» *Management Science* 1731–1746.
- Aziz, N.A., D.A. Wahab, R. Ramli, y C.H. Azhari. 2015. «Modeling and optimisation of upgradability in the design of multiple life cycle products: a critical review.» *Journal of Cleaner Production* 282-290.
- Bakker, Conny, Feng Wang, Jaco Huisman, y Marcel den Hollander. 2014. «Products that go round: exploring product life extension throught design.» *Journal of Cleaner Production* 10-16.
- Bauer, Tom, Peggy Zwolinski, Nabil Nasr, y Guillaume Mandil. 2020. «Characterization of circular strategies to better design circular industrial systems.» *Journal of Remanufacturing* 161–176.

- Benyus, Jainie M. 1997. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Nueva York: William Morrow and Company.
- Biondi, Vittorio, Fabio Iraldo, y Sandra Meredith. s.f. «Achieving Sustainability through Environmental Innovation; the role of SMEs.» *International Journal of technology Management* 24: 612-626.
- Bistagnino, Luigi. 2011. *Systemic Design*. Torino: Slow Food.
- Blomsma, Fenna, Louise Kjaer, Daniela Pigosso, Tim McALoone, y Stafford Lloyd. 2018. «Exploring circular strategy combinations - towards understanding the role of PSS.» *25th CIRP Life Cycle Engineering (LCE)* 752-757.
- Boorsma, Nina, Ruud Balkenende, Conny Bakker, Tanya Tsui, y David Peck. 2020. «Incorporating design for remanufacturing in the early design stage: a design management perspective.» *Journal of Remanufacturing*.
- Boustani, A., S. Sahni, S.C. Graves, y T.G. Gutowski. 2010. «Appliance Remanufacturing and Life Cycle Energy and Economic Savings.» (MITI).
- Bras, B., y M. McIntosh. 1999. «Product process and Organizational design for remanufacture -an overview of research.» *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* (15): 167-178.
- British Standar Institute. 2009. «Design for manufacture, assembly, disassembly and end-of-life processing (MADE).» *BS 8887-2:2009 - Terms and Definition*. Southam: British Standar Institute technical product specification committee.
- . 2014. «PAS 3100:2014 Remnufactured automotive parts.» *Specification for a process control system*. London: BSI.
- Capra, Fritjof. 1996. *The Web Of Life*. Nueva York: Anchor Book.
- Carson, Rachel. 1962. *Silent Spring*. Boston: Houghton Mifflin.
- Charter, M., y C. Gray. 2008. «Remanufacturing and Product Design.» *International Journal of Product Development* (6): 375-392.
- Comisión Europea. 2015. «Cerrar el Circulo: un plan de acción de la UE para la Econmía Circular.» Bruselas.
- Comisión Europea. 2019. «El Pacto Verde Europeo.» Bruselas.
- Comisión Europea. 2020. «Nuevo Plan de acción para la economía circular por una Europa más limpia y más competitiva.» Bruselas.
- Comisión Europea. 2003. «Política Integrada de Producto.» Bruselas.

- Comisión Europea. 2013. «Recomendación de la Comisión sobre el uso de métodos comunes para medir y comunicar el comportamiento ambiental de los productos y las organizaciones a lo largo de su ciclo de vida.» Bruselas.
- Copani, Giacomo, y Sarah Behnam. 2020. «Remanufacturing with upgrade PSS for new sustainable business models.» *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 245-256.
- Curran, M.A. 2008. *Encyclopedia of Ecology, Volume 4, 2016, Pages 359-366*. Academic Press.
- da Costa Fernandes, Sania, Daniela C.A. Pigosso, Tim C. McAloone, y Henrique Rozenfeld. 2020. «Towards product-service system oriented to circular economy: A systematic review of value proposition design approaches.» *J. Cleaner Prod.* 120507.
- Directiva del Parlamento Europeo y del Consejo. 2000. «Directiva 2000/53/EC del 18 de septiembre de 2000 sobre Fin de Vida de los vehículos.» n° pp. 34-42. Bruselas.
- . 2003. «Directiva 2002/95/EC de 27 de enero de 2003 sobre Restricción de sustancias peligrosas.» Bruselas.
- . 2003. «Directiva 2002/96/EC de 27 de enero de 2003 sobre Residuos de Aparatos Eléctricos Electrónicos.» Bruselas.
- . 2005. «Directiva 2005/32/EC del 6 de julio de 2005 sobre el marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos que utilizan energía.» Bruselas.
- . 2008. «Directiva 2008/98/CE de 19 de noviembre de 2008 sobre los residuos.» Bruselas.
- . 2009. «Directiva 2009/125/CE del 21 de octubre de 2009 sobre el marco para el establecimiento de requisitos de diseño ecológico aplicables a los productos relacionados con la energía.» Bruselas.
- Duberg, Johan Vogt, Gustav Johansson, Erik Sundin, y Jelene Kurilova-Palisaitiene. 2020. «Prerequisite factors for original equipment manufacturer remanufacturing.» *Journal of Cleaner Production*.
- Dunmade, Israel. 2003. «Design for Multi-lifecycle: A sustainable design concept applied to an agroindustrial development project.» *Int. J. Eng. Res. Appl.* 1413-1418.
- Ecoinvent. 2017. *Ecoinvent*. Último acceso: 2017.
<http://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/apos-system-model/allocation-at-the-point-of-substitution.html>.

- . 2017. *Ecoinvent*. Último acceso: 14 de Febrero de 2020.
<http://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/system-models-in-ecoinvent-3.html>.
- . 2017. *Ecoinvent*. Último acceso: 14 de Febrero de 2020.
<http://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/consequential-system-model/substitution-consequential-long-term.html>.
- . 2017. *Ecoinvent*. Último acceso: 14 de febrero de 2020.
<http://www.ecoinvent.org/database/system-models-in-ecoinvent-3/cut-off-system-model/allocation-cut-off-by-classification.html>.
- Ellen MacArthur Foundation. 2015. *Towards a Circular Economy: Business Rationale For an Accelerated Transition*. Ellen MacArthur Foundation.
- Ellen MacArthur Foundation. 2012. *Towards The Circular Economy / Vol.1*. Ellen MacArthur Foundation.
- Environdec. 2008. «EPD Supporting Annexes For Environmental Product Declarations, Version 1.0.» Stockholm: EPD.
- . 2020. <https://www.environdec.com>. Último acceso: 09 de junio de 2020.
<https://www.environdec.com/es/>.
- . 2019. «PCR: AC and DC gear motors for automation systems.» *PRODUCT CATEGORY CLASSIFICATION: UN CPC 46111 AND 46112*. EPD, 03 de 12.
- European Comision - Joint Reserch Centre - Institute for Environmetal and Sustainability. 2010. *ILCD Handbook, International Reference Life Cycle Data System*. Luxembourg: European Union.
- European Comission. 2015. *Remanufacturing Market Stydy (A report Partners of: ERN)*. Bruselas: European Comission.
- European Comission. 2017. «SMEs, resource efficiency and green markets.» (European Comission).
- European Commission -Joint Reserch Centre- Institue for Environment and Sustainability. 2014. «Workshop on End of Life (EoL) formulas in the context of the Environmental Footprint pilot phase.» *The Environmental Footprint baseline formula for End of life*.
- European Commission. 2012. «Manifesto For a Resource-Efficient Europe.» Bruselas: European Commission.
- European Remanufacturing Network (ERN). 2015. *Remanufacturing Market Study*. European Comission.

- Eurostat. 2014. *Energy, transport and environment indicators*. Luxembourg: Eurostat Pocketbook.
- . 2016. *Eurostat Statistic Explained*. Último acceso: 9 de Noviembre de 2020. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics/es#Generaci.C3.B3n_total_de_residuos.
- Eze, Salomon, Winifred Ijomah, y T.C. Wong. 2020. «Remanufacturing: a potential sustainable solution for increasing medical equipment availability.» *Journal of Remanufacturing* 141-159.
- Fatimah, Yun Aritaful, Wahidul Biswas, Ilyas Mazhar, y Mohammad Nazrul Islam. 2013. «Sustainable manufacturing for Indonesian small- and medium-sized enterprises (SMEs): the case of remanufactured alternators.» *Journal of Remanufacturing* (3:6): 1-11.
- Fernandez Alcalá, Jose Maria. 2016. «El Ecodiseño en el Marco de la Economía Circular.» *Experimenta* (71): 106-112.
- Ferrannini, Andrea, Elissa Barbieri, Mario Biggeri, y Marco R. Di Tommanso. 2020. «Industrial policy for sustainable human development in the post-Covid19 era.» *World Development*.
- Finnveden, Göran, Michael Z. Hauschild, Tomas Ekvall, Jeroen Guinée, Reinout Heijungs, Stefanie Hellweg, Annette Koehler, David Pennington, y Sangwon Suh. 2008. «Recent developments in Life Cycle Assessment.» *Journal of Environmental Management* 91 (2009): 1-21.
- Four Elements Consulting, LLC. 2008. *LaserJet Cartridge Life Cycle Environmental Impact Comparison Refresh Study*. Seattle: Hewlett-Packard Company.
- Frosh, R.A., y N.E. Gallopoulos. 1989. «Strategies for manufacturing.» *Scientific American* 261 (3): 144-152.
- Geissdoerfer, Martin, Doroteya Vladimirova, y Steve Evans. 2018. «Sustainable business model innovation: A review.» *J. Cleaner Prod.* 401-416.
- Geissdoerfer, Martin, Paulo Savaget, Nancy M.P. Bocken, y Erik Jan Hultink. 2017. «The Circular Economy – A new sustainability paradigm?» *J Cleaner Prod.* 757-768.
- Gell, M. 2008. *Carbon Footprints and Ecodesign of Toner Printer Cartridges*. UK Cartridge Remanufacturers Association.
- Go, T.F., D.A. Wahab, y H. Hishamuddin. 2015. «Multiple Generation Life-Cycles for Product Sustainability: The Way Forward.» *Journal Of Cleaner Production* 16-29.

- Goldey, E. U., R. Kuester, T.A. Mummert, y D. Okrasinski. 2010. «Lifecycle assessment of the environmental benefits of remanufactured telecommunications product within a "gree" supply chain.» *Sustainable Systems and Technology (ISSST), 2010 IEEE International Symposium* 1-6.
- Guidat, T., A.P. Barquet, H. Widera, H. Rozenfeld, y G. Seliger. 2014. «Guidelines for the definition of innovative industrial product-service systems (PSS) business models for remanufacturing.» *Proceedings of the 6th CIRP Conference on Industrial Product-Service Systems* 193-198.
- Guide, V. Daniel, y Luk N. Van Wassenhove. 2008. «The Evolution of Closed-Loop Supply Chain Research.» *Operations Research* 10-18.
- Gutowski, T.G., S. Sahni, A. Boustani, y S.C. Graves. 2011. «Remanufacturing and Energy Savings.» *Environmental and Energy Savings* 45: 4540-4547.
- Hübner, Renate. 2012. «Ecodesign: reach, limits and challenges 20 years of ecodesign - Time for a critical reflection.» *Forum Ware International I* 25-38.
- Hammond, R., T. Amezcuita, y B. Bras. 1998. «Issues in the automotive parts remanufacturing industry - A discussion of results from surveys Performed among remnufacturers.» *International journal of Engineering Design and Automation* (4): 27-46.
- Hatcher, G.D., W.L. Ijomah, y J.F.C. Windmill. 2011. «Design for remanufacture: a literature review and future research needs.» *Journal of Cleaner Production* 19: 2004-2014.
- Hatcher, G.D., W.L. Ijomah, y J.F.C. Windmill. 2012. «Integration design for remanufacture into the design process: the operational factors.» *Journal of Cleaner Production* 200-208.
- Haziri, Louise Lindkvist, y Erik Sundin. 2020. «Supporting design for remanufacturing - A framework for implementing information feedback from remanufacturing to product design.» *Journal of Remanufacturing* 57-76.
- Hunkeler, D., K. Lichtenvort, y G. Rebitzer. 2008. «Environmental Life Cycle Costing.» *CRC Press*.
- Hutchins, M.J., y J.W. Sutherland. 2008. «An exploration of measures of social sustainability and their application to supply chain decisions.» *Journal of Cleaner Production* 16 : 1688-1698.
- IDSAs. 1992. «12 Facts of Ecological Design.» *IDSAs (Industrial Designers Society of America)*.
- Ihobe. 2007. *Ingeniería del diseño ecológico de productos industriales*. Gobierno Vasco.

- Ihobe. 2000. *Manual práctico de Ecodiseño. Operativa de implantación en 7 pasos*. Bilbao: Gobierno Vasco.
- Ijomah, W., C. McMahon, G. Hammond, y S. Newman. 2007. «Development of robust design-for-remanufacturing guidelines to further the aims of sustainable development.» *Journal Of Production Research* (45): 4513-4536.
- Ijomah, W.L. 2010. «The application of remanufacturing in sustainable manufacture.» *Waste and resource Management* (163): 157-163.
- International Standard Organization. 2006. «ISO 14040:2006 - environmental management - life cycle assessment - principles and framework.»
- . 2006. «ISO 14044:2006 - environmental management - life cycle assessment - requirements and guidelines.»
- Intlekofer, K., B. Bras, y M. Ferguson. 2010. «Energy Implication of Product Leasing.» *Environmental Science & Technology* 44 (12): 4409–4415.
- Jackson, Tim, y Robin Webster. 2016. *Limits Revisited: a review of the limits to growth debate*. London: APPG.
- Jagtap, Santosh, y Tobias Larsson. 2019. «Resource-Limited Societies, Integrated Design Solutions, and Stakeholder Input.» *She Ji: The Journal of Design, Economics, and Innovation* 285-303.
- Kama, Kärq. 2014. «Circling the economy: resource-making and marketization in EU electronic waste policy.» *Area* 47.
- Kara, Hüdaí. 2008. *Carbon Impact of Remanufactured Products (Photovoltaic Panels)*. Centre of Remanufacturing & Reuse (CRR).
- Kara, Hüdaí. 2014. *Footprint Analysis of New and Remanufactured Inkjet Cartridges (HP21&HP22 New vs. Remanufactured)*. Centre of Remanufacturing & Reuse.
- Karlsson, Reine, y Conrad Luttröpp. 2006. «EcoDesign: what's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers in this special issue.» *J. Cleaner Prod.* 1291-1298.
- Keoleian, G., y D. Menerey. 1993. *Cycle design guidance manual - environmental requirements and the product system*. United States Environmental Protection Agency.
- Kerr, W., y C. Ryan. 2001. «Eco-efficiency gains from remanufacturing A case study of photocopier remanufacturing at Fuji Xerox Australia.» *Journal of Cleaner Production* 9: 78-81.
- Kharas, Homi, y Kristofer Hamel. 2018. *World Economic Forum*. Último acceso: 16 de noviembre de 2020. <https://www.weforum.org/agenda/2018/10/a-global-tipping-point-half-the-world-is-now-middle-class-or-wealthier/>.

- Kim, Seungdo, Taeyoun Hwang, y Kun M. Lee. 1997. «Allocation for Cascade Recycling System.» *Int. J LCA* (2): 217-222.
- Kirchherr, Julian, Denise Reike, y Marko Hekkert. 2017. «Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions.» *Resour. Conserv. Recycl.* 221-232.
- Klöpffer, W. 2008. «Life cycle sustainability assessment of products.» *Journal of Life Cycle Assessment* 13: 89-95.
- Korhonen, Jouni, Cali Nuur, Andreas Feldmann, y Seyoum Eshetu Birkie. 2018. «Circular economy as an essentially contested concept.» *J Clean Production* 544-552.
- Lee, Cheul-Kyu, Jae-Young Lee, Yo-Han Choi, y Kun-Mo Lee. 2014. «Application of the integrated ecodesign method using the GHG emission as a single indicator and its GHG recyclability.» *Journal of Cleaner Production* 112: 1692-1699.
- Lee, Sir Yee, Jiayao Hu, y Ming Kim Lim. 2020. «Maximising the circular economy and sustainability outcomes: An end-of-life tyre recycling outlets selection model.» *International Journal of Production Economics*.
- Lieder, Michael, y Amir Rashid. 2015. «Toward circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing.» *Journal of Cleaner Production* 36-51.
- Lindahl, M., E. Sundin, y J. Östlin. 2016. «Environmental issues with the remanufacturing industry.» *13th CIRP international conference on Life Cycle Engineering* 447-452.
- Lindhal, M., E. Sundin, J. Östin, y M. Björkman. 2006. «Concepts and Definitions for Product Recovery.» *Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development* 123-138.
- Lindkvist, Louise, Natalia Alonso Movilla, Erik Sundin, y Peggy Zwolinski. 2016. «Investigating Types of Information from WEEE Take-Back Systems in Order to Promote Design for Recovery.» *Sustainability Through Innovation in Product Life Cycle Design* 3-16.
- Lofthouse, Vicky. 2006. «Ecodesign tools for designers: defining the requirements.» *Journal Of Cleaner Production* 1386-1395.
- Lozano, Rodrigo. 2008. «Envisioning Sustainability three-dimensionally.» *Journal of Cleaner Production* 1838-1846.
- Lund, R. 1984. *Remanufacturing: the Experience of the United States and Implications for Developing Countries*. Washington D.C.: World Bank.

- Lund, R.T., y W. Hauser. 2008. *Remanufacturing: Operating Practices and Strategies*. Boston: Boston University.
- Lyle, J.T. 1996. *Regenerative design for sustainable development*. John Wiley & Sons Incorporated.
- Ma, Shu-hua, Zong-guo Wen, Ji-ning Chen, y Zhi-Chao Wen. 2013. «Mode of Circular Economy in China's iron and steel industry: a case study in Wu'an city.» *Journal of Cleaner Production* 64: 505-512.
- Margallo, M., R. Domínguez-Ramos, y A. Aldaco. 2019. «Incorporating life cycle assessment and ecodesign tools for green chemical engineering: A case study of competences and learning outcomes assessment.» *Education for Chemical Engineers* 89-96.
- McDonough, William, y Michael Braungart. 2002. *Cradle to Cradle*. Farrar, Straus and Giroux.
- Meadows, Donella H., Dennis L. Meadows, Jorgen Randers, y William W. Behrens III. 1972. *The Limits To Growth*. New York: Universe Books.
- Mentink, Bas. 2014. «Circular Business Model Innovation.» Delft: TU Delft.
- Minjung, Kwak, y Kim Harrison. 2016. «Modeling the Time-Varying Advantages of a Remanufactured Product: Is "Reman" better than "Brand New"?» *Journal of Mechanical Design* 138.
- Miranda de Souza, Vitor, y Milton Borsato. 2015. «Combining Stage-State™ model using Set-Based concurrent engineering and sustainable end-of-life principles in a product development assessment tool.» *Journal of Cleaner Production* (Journal of Cleaner Production) 3222-3231.
- Mirzaie, Sahar, Mihaela Thuring, y Karen Allacker. 2020. «End-of-life modelling of buildings to support more informed decisions towards achieving circular economy targets.» *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2122–2139.
- Mollison, B., y D. Holmgren. 1978. *Permaculture One: A perennial agriculture for human settlements*. Corgi.
- Nasr, N., y M. Thurston. 2006. «Remanufacturing: A Key Enabler to Sustainable Product Systems.» *Proceedings of CIRP International Conference on Lifecycle Engineering* 8-15.
- OECD. 2017. «Enhancing the contributions of SMEs in a global and digitalised economy.» (OECD).
- Olabe, Antxon. 2016. *Crisis Climática Ambiental*. Barcelona: Galaxia Gutenberg.

- Organization of Economic Cooperation and Development (OECD). 1972. «Guiding Principles concerning International Economic Aspects of Environmental Policies.» OECD, Paris.
- Ormazabal, Marta, Vanessa Prieto-Sandoval, Rogerio Puga-Leal, y Carmen Jaca. 2018. «Circular Economy in Spanish SMEs: Challenges and opportunities.» *Journal of Cleaner Production* (185): 157-167.
- Paterson, D.A., Wilifred Ijiomah, y J. Windmill. 2016. «An analysis of end-of-life terminology in the carbon fiber reinforced plastic industry.» *Int. J. Sustain. Eng.* 30-140.
- Paterson, David A.P., Bhih-Chuan Kao, Winifred L. Ijiomah, y James F.C. Windmill. 2018. «Incorporating remanufacturing into the end-of-life vehicles directive: current presence and the waste problem.» *Journal of Remanufacturing* 23-37.
- Paterson, David A.P., Winifred L. Ijiomah, y James F.C. Windmill. 2017. «End-of-life decision tool with emphasis on remanufacturing.» *Journal of Cleaner Production* 653-664.
- Pauli, Gunter. 2011. *The Blue Economy: 10 Years, 100 Innovations, 100 Millions Jobs*. Barcelona: Tusquets Editores [Colección: Metatemas].
- Paulson, Fredrik, y Erik Sundin. 2019. «Challenges When Including Sustainability Aspects in Product Development at Two Large Manufacturing Companies in Sweden.» *Technologies and Eco-innovation towards Sustainability* 229-243.
- Pearce, David W., y R. Kerry Turner. 1990. *Economics of Natural Resources and the Environment*. London: Harvester Wheatsheaf.
- Pialot, O., y D. Millet. 2014. «Why Upgradability should be Considered for Rationalizing Materials?» *21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering* 379-384 .
- Pigosso, Daniela C.A., Evelyn T, Zanette, Americo Guelere Filho, Aldo R. Ometto, y Henrique Rozenfeld. 2010. «Ecodesign methods focused on remanufacturing.» *J. Cleaner Prod.* 18: 21-31.
- Pigosso, DC, ET Zanette, y AG Filho. 2018. «Ecodesign methods focused on remanufacturing.» *J. Cleaner Prod.* 21-31.
- Rashid, Amir, Faraeze M.A. Asif, Peter Krajnik, y Cornel Mihai Nicolescu. 2013. «Resource Conservative Manufacturing: an essential change in business and technology paradigm for sustainable.» (Journal of Cleaner Production).
- REM Associates of Princeton. 2002. «Methodology of calculating inventory carrying costs.» REM Associates of Princeton.
- REVLOG - The European Working Group on Reverse Logistic. 1999.

- Rizos, Vasileiros, Arno Behrens, Terri Kafyeke, y Martin Hirschnitz-Garbers. 2015. «The Circular Economy: Barriers and Opportunities for SMEs.» *CEPS* (412).
- Rizova, Mirena Isaeva, T.C. Wong, y Winifred Ijiomah. 2020. «A systematic review of decision-making in remanufacturing.» *Computers & Industrial Engineering*.
- Roßmann, Maximilian, Matthias Stratmann, Nadine Rötzer, Philipp Schäfer, y Mario Schmidt. 2020. «Comparability of LCAs — Review and Discussion of the Application Purpose.» *Progress in Life Cycle Assessment 2019* 213-225.
- Rogers, D., y R.S. Tibben-Lembke. 1998. *Going backwards: Reverse logistics trend and practices*. Abrelpe.
- Ruiz-Pastor, Laura, Elena Mulet, Vicente Chulvi, y Marta Royo. 2020. «Effect of the application of circularity requirements as guided questions on the creativity and the circularity of the design outcomes.» *J. Cleaner Prod.*
- Sabaghi, Mahdi, Christian Mascle, y Pierre Baptiste. 2015. «Evaluation of Products at design phase for an efficient disassembly at end-of-life.» *Journal of Cleaner Production* 177-186.
- Schau, E.M., M. Traverso, y M. Finkbeiner. 2012. «Life cycle approach to sustainability assessment: a case study of remanufactured alternators.» *Journal of Remanufacturing* 1-14.
- Seaver, W.B. 1994. «Design Consideration for remanufacturability, recyclability and reusability of user interface modules.» *IEEE* 241-245.
- Seitz, M., y P. Wells. 2006. «Challenging the implementation of Corporate Sustainability: the case of automotive engine remanufacturing.» *Business Process Management* 12 (6): 822-836.
- Severo, Eliana Andrea, Julio Cesar Ferro De Guimaraes, y Mateus Luan Dellarmelin. 2020. «Impact of the COVID-19 pandemic on environmental awareness, sustainable consumption and social responsibility: Evidence from generations in Brazil and Portugal.» *J. Cleaner Prod.*
- Shimomura, Y., Y. Umeda, y T. Tomiyama. 1999. «A proposal of upgradable desing.» *Proceeding of First International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing* 1000-1004.
- Shu, L., y W. Flowers. 199. «Application of a design-for remanufacture Framework to the Selection of product life-cycle and joining methods.» *Robotics and Computer Integrated Manufacturing* (15): 179-190.
- Singh, Jagdeep, y Isabe Ordoñez. 2015. «Resource recovery from post-consumer waste: important lessons for the upcoming circular economy.» *Journal of Cleaner Production* 342-353 .

- Sitcharangsie, Sakraan, Winifred Ijomah, y T.C. Wong. 2019. «Decision makings in key remanufacturing activities to optimise remanufacturing outcomes: A review.» *Journal of Cleaner Production* 1465-1481.
- Skou Andersen, Mikael. 2006. «An introductory note on the environmental economics of the circular economy.» *Sustainability Science volume* 133-140.
- Smith, V.A., y G.A. Keoleian. 2004. «The Value of Remanufactured Engines (Life-Cycle environmental and economic perspective).» *Massachusetts Institute of Technology and Yale University* 8: 193-221.
- Stahel, W.R., y G. Reday-Mulvey. 1981. *Jobs for tomorrow: The potential for substituting manpower for energy*. Vantage Press Nueva York.
- Stahel, Walter R. 2013. *The business Angle of a Circular Economy -higher competitiveness, higher resources security and material effincency*. In: *A New Dynamic*. Ellen MacArthur Foundation.
- Stahel, Walter R. 1998. «Products Durability and re-take after use.» *The Durable Use of Consumer Products* 29-44.
- Steinhilper, R. 1998. *Remanufacturing: the Ultimate Form of Recycling*. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Sundin, E., y B. Bras. 2005. «Making Functional Sales Environmentally and Economically beneficial through product remanufacturing.» *Journal Of Cleaner Production* (13): 913-925.
- Sundin, E., y S. Tyskeng. 2003. «Inverse Manufacturing at Electretrolux or Recycling at Local Facilities? -A comparison from Environmental and Economic Perspective.» *Proceedings of Ecodesign 2003*.
- Sundin, Eric. 2004. *Produt and Process Design for Successful Remanufacturing*. Linköping: Linköspings universitet .
- Sundin, Erik, y Hui Mien Lee. 2012. «In what way is remanufacturing good for the environment?» *Design for Innovative Value Towards a Sustainable Society* 552-557.
- Sutherland, J.W., D.P. Adler, K.R. Haapla, y V. Kumar . 2008. «A comparasion of Manufacturing and Remanufacturing energy intensitieswith application to diesel engine production.» *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 57: 5-8.
- Sverdrup, Harald Ulrik, Deniz Koca, y Kristin Vala Ragnarsdottir. 2013. «Peak Metals, Minerals, Energy, Wealth, Food and Population: Urgent Policy for a Sustainable Society.» *Journal of Environmental Science and Engineering* 189-222.

- The All-Party Parliamentary Sustainable Resource Group. 2014. *Remanufacturing: Towards a Resource Efficient Economy*. London: All-Party Parliamentary Sustainable Resource Group.
- The Centre for Remanufacturing and Reuse (CRR). 2016. *The Centre for Remanufacturing and Reuse (CRR)*. Último acceso: 23 de 05 de 2016.
<http://www.remanufacturing.org.uk/what-is-remanufacturing.php>.
- Thomas, J. -S., y J. -P. Birat. 2013. «Methodologies to measure the sustainability of materials - focus recycling aspects.» *Metallurgical Research & Technology* 110: 3-16.
- Toniolo, Sara, Roberta Chiara Tosato, Fabio Gambaro, y Jingzheng Ren. 2020. «Chapter 3 - Life cycle thinking tools: Life cycle assessment, life cycle costing and social life cycle assessment.» En *Life Cycle Sustainability Assessment for Decision-Making*, de Jingzheng Ren y Sara Toniolo, 39-56. Elsevier.
- Trianni, A., y E. Cagno. s.f. «Dealing with barriers to energy efficiency and SMEs: Some empirical evidences.» *Energi* 37 (1): 494-504.
- Tukker, Arnold, y Ursula Tischner. 2006. «Product-services as a research field: past, present and future. Reflections from a decade of research.» *Journal Of Cleaner Production* (14): 1552-1556.
- Umemori, Y., S. Kondoh, Y. Umeda, Y. Shimonura, y M. Yoshiola. 2001. «Design for upgradable products considering future uncertainty.» *Proceedings of Ecodesign: Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing* 87-92.
- UNEP. 2020. *UNEP Circularity Platform*. Último acceso: 01 de junio de 2020.
<https://buildingcircularity.org>.
- United State International Trade Commission. 2012. *Remanufactured Goods: An Overview of the U.S. and Global Industries, Markets and Trade*. Washington DC: USITE.
- van de Meer, Yvonne. 2020. «Life Cycle Sustainability Assessment.» *Decent Work and Economic Growth*.
- Vargas, Gustavo, y Unai Tamayo. 2019. «Biomimetic economy: human ecological-economic systems emulating natural ecological systems.» *Social Responsibility Journal*.
- Vogtländer, Joost G., Han C. Brezet, y Charles F. Hendricks. 2001. «Allocation in Recycling System.» *Int. J LCA* (6): 344-355.
- Warsen, J., M. Laumer, y W. Momberg. 2011. «Comparative Life Cycle Assessment of Remanufacturing and New Manufacturing of a Manual Transmission.»

- Glocalized solutions for sustainability in manufacturing: proceedings of the 18th CIRP international conference of life cycle engineering* 67-72.
- World Commission on Environment and Development. 1987. *Our Common Future: Brundtland Report*. Oxford: Oxford University Press.
- Xing, K.e., K. Abhary, y L. Luong. 2006. «PURE: a fuzzy model for product upgradability and reusability for remanufacture.» *Manufacturing the Future Concepts Technologies and Visions* 309-336.
- Yanbin, D., H. Cao, F. Liu, C. Li, y X. Chen. 2011. «An integrated method for evaluating the remanufacturability of used machine tool.» *Journal of Cleaner Production* 20: 82-91.
- Yang, S.S., S.K. Ong, y A.Y.C Nee. 2016. «A Decision Support Tool for Product Design for Remanufacturing.» *CIRP: 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use* 40: 144-149.
- Zero Waste Scotland. 2015. «Circular Economy Evidence Building Programme: Remanufacturing Study.»
- Zhang, Xiufen, Sguyou Zhang, Lichun Zhang, Junfang Xue, Rina Sa, y Hai Liu. 2019. «Identification of product's design characteristics for remanufacturing using failure modes feedback and quality function deployment.» *J. Cleaner Prod.* 117967.
- Zhu, Qinghua, Yong Geng, y Kee-hung Lai. 2011. «Environmental Supply Chain Cooperation and Its Effect on the Circular Economy Practice-Performance Relationship Among Chinese Manufacturers.» *Journal of Industrial Ecology* 405-419.
- Zlamparet, Gabriel Ionut, Winifred L. Ijiomah, Yu Miao, Abhishek Kumar Awasthi, Xianlai Zeng, y Jinhui Li. 2017. «Remanufacturing strategies: A solution for WEEE problem.» *Journal of Cleaner Production* 126-136.
- Zunft, J., y B. Fröhlig. 2009. «Energy from waste – Zukunftsmärkte Europa.» *Fachtagung thermische Abfallbehandlung* (14).

ANEXO I: ESTRATEGIAS DE DISEÑO Y SUS DIRECTRICES

DISEÑO PARA LA REUTILIZACIÓN Y LA REMANUFACTURA

Tabla 23: Estrategia y directrices de diseño para la reutilización y la remanufactura

CRITERIO PRINCIPAL	DIRECTRIZ
Fácil de clasificar	1 Reducir la variedad de productos y piezas
	2 Proporcionar características distintivas claras que permitan un reconocimiento sencillo
	3 Proporcionar etiquetas, textos, y código de barras legibles, que no desaparezcan durante la vida útil del producto
Fácil de desensamblar	1 Evitar cierres permanentes que requieran una eliminación destructiva
	2 En caso de ser necesaria una eliminación destructiva, procurar que el núcleo no sea dañado
	3 Reducir el número de elementos de cierres propensos al daño y a la rotura durante la retirada
	4 Aumentar la resistencia a la corrosión de los cierres
	5 Reducir el número de elementos de cierres
	6 Reducir el número de fijaciones a presión
	7 Reducir el número de cierres que no estén a la vista
	8 Estandarización de cierres, mediante la reducción del número de diferentes tipos y diferentes tamaños
Fácil de limpiar	1 Proteger las partes y las superficies contra la corrosión y la suciedad
	2 Evitar las características del producto o piezas que puedan ser dañadas durante el proceso de limpieza o hacerlos extraíble
	3 Minimizar características geométricas que atrapan contaminantes durante la vida útil
	4 Evitar las cavidades capaces de quedarse con los residuos durante las operaciones de limpieza
	5 Evitar la contaminación causada por el desgaste
Fácil de inspeccionar	1 Minimizar el tiempo de inspección
	2 Reducir la cantidad de pruebas y herramientas de inspección necesarias y el nivel de sofisticación requerido
	3 Proporcionar una buena documentación de los test y las especificaciones
Fácil de sustitución de piezas	1 Minimizar el tiempo requerido para volver a montar el producto
	2 Prevenir daños durante la fase de inserción

	3	Proporcionar una buena documentación de las especificaciones y manual de instalación
Fácil de reensamblar	1	Minimizar el tiempo requerido para volver a montar el producto
	2	Consultar las directrices marcadas en la Tabla 5 de Boothroyd and Dewhurst (1991)
	3	Proporcionar una buena documentación de las especificaciones y manual de instalación
Componentes reutilizables	1	Diseñar una plataforma para la reutilización y módulos reutilizables
	2	Seleccionar materiales para garantizar la fiabilidad y la durabilidad del producto
	3	Hacer componentes lo suficientemente robustos como para reutilizar sin repuesto
	4	Evitar materiales tóxicos
Estandarización	1	Estandarizar y utilizar piezas y materiales comunes
	2	Estandarizar y utilizar cierres comunes
	3	Estandarizar y utilizar interfaces comunes
	4	Estandarizar y utilizar herramientas comunes

DISEÑO PARA EL MONTAJE

Tabla 24: Estrategia y directrices diseño para el montaje.

CRITERIO PRINCIPAL	DIRECTRIZ	
Menor trabajo de montaje	1	Reducir al mínimo el número de componentes mediante la incorporación de múltiples funciones en partes individuales
	2	Modularizar varias partes en subconjuntos individuales
	3	Minimizar el uso de cierres
	4	Realizar una secuencia de montaje eficiente con la menor cantidad de etapas posible
Fácil de manejar	1	Dejar la superficie libre para la sujeción
	2	Realizar el montaje en espacios abiertos, no en espacios confinados. Nunca hay que enterrar las piezas importantes.
	3	Estandarización para evitar la variedad de piezas
	4	Maximizar partes simétricas
	5	Diseño de propiedades geométricas o similares de peso en caso de no ser simétricas

	6	Eliminar partes enrolladas
	7	Codificar piezas con colores que son diferentes pero de forma similar
	8	Evitar que alguna parte se adhiera
	9	Proporcionar funciones de orientación en los casos no simétricos
	10	Diseñar las características de acoplamiento, para una fácil inserción
Fácil inserción	1	En el montaje insertar las nuevas partes desde arriba
	2	Insertar desde la misma dirección o con pocas alternativas. El montaje nunca debe requerir giros.
Fácil de montar	1	Maximizar la accesibilidad del montaje
	2	Proporcionar alineaciones características
	3	Los cierres deben ir fuera de la construcción
	4	Diseñar las piezas para emparejar a lo largo de la línea de montaje
	5	Los canales profundos deben ser anchos para proporcionar acceso a las herramientas de sujeción. Es mejor que no haya canales de este tipo.
	6	Proveer planos uniformes y de fácil amarre
	7	Espacio adecuado para permitir las herramientas de fijación
Reducir la variabilidad	1	Utilizar subconjuntos y piezas estándares
	2	Minimizar la cantidad de tipo de cierres

DISEÑO PARA EL DESMONTAJE

Tabla 25: Estrategia y directrices diseño para el desmontaje.

CRITERIO PRINCIPAL	DIRECTRIZ	
Menor trabajo de desmontaje	1	Combinar elementos, crear un diseño modular
	2	Usar materiales compatibles
	3	Limitar la variabilidad de los materiales
	4	Unificar los materiales nocivos en subconjuntos
	5	Facilitar el acceso a las partes peligrosas, valiosas o reusables
Configuración de producto predecible	1	Ligero y robusto, minimizar las partes frágiles
	2	Evitar la combinación de envejecimiento y materiales corrosivos

	3	Proteger los subconjuntos de la suciedad y la corrosión
Facilidad para el desensamblaje	1	Crear juntas accesibles y visibles, evitando articulaciones ocultas
	2	Usar cierres en lugar de pegamento. Utilizar aquellos que tengan facilidad de eliminación o destrucción.
	3	Minimizar el número de juntas y conexiones
	4	Utilizar la mayor cantidad de cierres iguales
	5	Proporcionar un acceso fácil a los puntos de separación, fractura o corte
	6	Evitar múltiples direcciones y movimientos complejos a la hora de desensamblar
	7	Posicionar los elementos centrales en una base
	8	Evitar introducir metal en las zonas plásticas
Fácil de manejar	1	Dejar la superficie libre para la sujeción
	2	Evitar zonas no rígidas
	3	Encerrar las sustancias venenosas en unidades selladas.
	4	Diseño para un desensamblaje automático
	5	Evitar la necesidad de procedimiento especializados para el desensamblaje
	6	Evitar largos procedimientos de desensamblaje
Fácil de separar	1	Evitar el acabado secundario (pintura, revestimiento, cromado)
	2	Marcar o diferenciar materiales por colores para una fácil y óptima separación de los materiales
	3	Evitar piezas y materiales que puedan dañar la máquina (tritadora)
Reducir la variabilidad	1	Utilizar subconjuntos y piezas estándares
	2	Minimizar la cantidad de tipo de cierres
Materiales	1	Minimizar el uso de materiales diferentes
	2	Usar materiales reciclables
	3	Eliminar materiales tóxicos o peligrosos

DISEÑO MEDIOAMBIENTAL (DfE)

Tabla 26: Estrategia y directrices diseño para el medioambiente.

ASPECTO DE LA DIRECTRIZ	DIRECTRIZ		REFERENCIAS
Directrices para la Estructura del Producto	1	Diseñar el producto para que sea multifuncional o crear partes multifuncionales	Otto and Wood, 2001

	2	Reducir al mínimo número de piezas	Al-Okush and Caudill, 1999; Graedel and Allenby, 1995; Black and Dekker, 2003; Otto and Wood, 2001.
	3	Evitar resortes separados, poleas o arneses. En su lugar, insertar estas funciones en partes	Otto and Wood, 2001
	4	Hacer un diseño lo más modular posible, con las funciones separadas	Al-Okush and Caudill, 1999; Graedel and Allenby, 1995; Bevilaqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001
	5	Diseñar una plataforma de reutilización y módulos reutilizables	Bevilaqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001.
	6	Situar las piezas no reciclables en un subsistema que puedan eliminarse rápidamente	Bevilaqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001.
	7	Situar las piezas de alto valor en un lugar accesible, con un optimizado dirección de extracción	Otto and Wood, 2001
	8	Diseñar las piezas con estabilidad para el desmontaje	Al-Okush and Caudill, 1999; Graedel and Allenby, 1995; Black and Dekker, 2003; Otto and Wood, 2001.
	9	Reducir el tiempo de desensamblaje del producto	Al-Okush and Caudill, 1999; Graedel and Allenby, 1995; Black and Dekker, 2003; Otto and Wood, 2001.
	10	En las piezas plásticas, evitar insertar acoples o refuerzos metálicos	Otto and Wood, 2001
	11	Los puntos de acceso y rotura deben ser evidentes	Otto and Wood, 2001
	12	Especificar las partes remanufacturadas	Bevilaqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001.
	13	Especificar los contenedores reutilizables para el transporte marítimo o consumibles internos del producto	Bevilaqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001.

	14	Diseñar distintivos de apagado para los diferentes subsistemas de un producto para cuando no esté en uso	Al-Okush and Caudill, 1999; Graedel and Allenby, 1995; Black and Dekker, 2003; Otto and Wood, 2001.
	15	Implementar la puesta en común y la capacidad de actualización de los componentes	Al-Okush and Caudill, 1999; Graedel and Allenby, 1995
Directrices para la Selección del Material	1	Evitar materiales regulados y restringidos	Al-Okush and Caudill, 1999; Black and Dekker, 2003; Otto and Wood, 2001.
	2	Minimizar el número de diferentes tipos de materiales	Fuji Xerox; Otto and Wood, 2001
	3	Para las partes añadidas, estandarizar con el mismo o una compatible	Al-Okush and Caudill, 1999; Graedel and Allenby, 1995; Otto and Wood, 2001
	4	Eliminar materiales incompatibles	Bevilaqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001.
	5	Marcar el tipo de material en todas las piezas	Al-Okush and Caudill, 1999; Graedel and Allenby, 1995; Bevilaqua et al., 2012; Otto and Wood, 2002
	6	Usar materiales que puedan ser reciclados, por lo general lo más puros posibles (sin aditivos)	Al-Okush and Caudill, 1999; Black and Dekker, 2003; Graedel and Allenby, 1995; Otto and Wood, 2001; Bevilaqua et al., 2012; Fuji Xerox
	7	Evitar materiales compuestos	Otto and Wood, 2001
	8	Utilizar materiales de alta resistencia al peso en las partes móviles	Bevilaqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001.
	9	Utilizar metales de baja aleación, ya que son más reciclables que los de alta aleación	Bevilaqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001.
	10	Las piezas peligrosas deben estar marcadas con claridad y quitarse con facilidad	Bevilaqua et al., 2012; Black and Dekker, 2003; Fuji Xerox; Otto and Wood, 2001.

	11	Seleccionar los materiales adecuados para garantizar la fiabilidad y la durabilidad del producto	Bevilaqua et al., 2012
Directrices de Etiquetado y Acabado	1	Garantizar la compatibilidad de la tinta cuando sea necesaria la impresión de las piezas	Otto and Wood, 2001
	2	Eliminar las pinturas incompatibles de las piezas - utilizar marcas de la etiqueta o incluso insertos	Bevilaqua et al., 2012; Otto and Wood, 2001.
	3	Utilizar metales sin recubrimientos, ya que son más reciclables	Bevilaqua et al., 2012; Black and Dekker, 2003; Fuji Xerox; Otto and Wood, 2001.
	4	Utilizar documentación de los componentes electrónicos	Bevilaqua et al., 2012
Directrices de Cierre	1	Minimizar el uso de cierres	Otto and Wood, 2001
	2	Minimizar la cantidad de herramientas necesarias para los cierres	Otto and Wood, 2001
	3	Los cierres debes ser fáciles de quitar	Otto and Wood, 2001
	4	Los puntos de cierre deben ser de fácil acceso	Otto and Wood, 2001
	5	La parte que abrocha debe ser fácilmente localizable y capaz de dividirse utilizando herramientas estándar	Otto and Wood, 2001
	6	Intenta utilizar cierres de un material compatible con la pieza unida	Otto and Wood, 2001
	7	En caso de que dos partes no sean compatibles, que se separe con facilidad	Otto and Wood, 2001
	8	Eliminar el uso de adhesivos, a no ser que sea compatible con las piezas unidas	Otto and Wood, 2001
	9	Reducir al máximo el número y la longitud de cables	Otto and Wood, 2001
	10	Las conexiones pueden estar diseñadas para romperse,	Otto and Wood, 2001

		como una alternativa en la eliminación de los cierres	
--	--	---	--

PRINCIPIOS DE DISEÑO PARA EL CICLO DE VIDA

Tabla 27: Estrategia y directrices diseño para el ciclo de vida.

Nº	CATEGORÍA DE DISEÑO	PRINCIPIOS DE DISEÑO	REFERENCIAS
1	Producto	Mediciones de acciones ambientales	Ashley (1993), Brezet and van Hemel (1997), Fiksel (1993), Fuad-Luke (2002), Graedel and Allenby (1995, 2003), Lewis and Gertsakis (2001), Mackenzie (1991), Mont (2000), Navinchandra (1991), NRC (2003), and Wann (1990).
		Consideración de todos los costes	
		Minimización y eliminación de recursos	
2	Packaging	Minimización y eliminación de recursos	Brezet and van Hemel (1997) and Graedel and Allenby (2003).
		Biodegradabilidad	
		Reusabilidad	
		Reciclabilidad	
3	Fabricación	Selección de procesos de producción limpios	Ashley (1993), Brezet and van Hemel (1997), Fiksel (2012), Graedel and Allenby (2003), Lewis and Gertsakis (2001), and NRC (2003).
		Mejora de la calidad	
		Selección de fuentes de energía renovable	
4	Material	Selección material...	Ashley (1993), Brezet and van Hemel (1997), Fiksel (1993), Fuad-Luke (2002), Graedel and Allenby (2003), Lewis and Gertsakis (2001), Mackenzie (1991), Mont (2000), Navinchandra (1991), NRC (2003), Rose (2000), Todd (1994), and Wann (1990)
		· de muchos recursos renovables	
		· de extracción sostenible	
		· reciclables	
		· sin sustancias peligrosas	
		· reduciendo procesos de energía	
		Empleo del material...	
		· eliminando el residuo	
· desmaterializando			
5	Distribución	Selección de métodos de transporte sostenibles	

		Reduciendo el transporte de los productos	Brezet and van Hemel (1997), Fuad-Luke (2002) and Graedel and Allenby (1995)
6	Uso	Reducción del consumo energético en el uso	Brezet and van Hemel (1997), Fuad-Luke (2002), Graedel and Allenby (1995, 2003), Lewis and Gertsakis (2001), Mont (2000), Navinchandra (1991), and NRC (2003)
		Reducción de lo que un producto consume	
		Conservando los productos limpios	
7	Servicio de Reparación o Mantenimiento	Hacer un servicio sencillo	Brezet and van Hemel (1997) and Graedel and Allenby (2003)
		Utilizar consumibles de servicio benignos	
8	Fin de Vida	Diseño para el Desmontaje	Ashley (1993), Brezet and van Hemel (1997), Fiksel (1993), Fuad-Luke (2002), Graedel and Allenby (2003), Lewis and Gertsakis (2001), Mont (2000), Navinchandra (1991), NRC (2003), and Rose (2000)
		Diseño para el Reciclaje	
		Diseño para la Reutilización	
		Diseño para la Remanufactura	
		Diseño para la Biodegradación	

LOS ANEXOS II, III Y IV ESTAN SUJETOS A
CONFIDENCIALIDAD POR EL AUTOR

ANEXO V: ECUACIÓN PEF

Tabla 44: Ecuación de PEF.

Perfil de uso de los recursos y emisiones de la adquisición y tratamiento previo de material virgen.	VIRgin	$\left(1 - \frac{R_1}{2}\right) \times E_v + \frac{R_1}{2} \times E_{recycled} + \frac{R_2}{2} \left(E_{recyclingEoL} - E_{v^*} \times \frac{Q_s}{Q_p}\right) + R_3 \left(E_{ER} - LHV \times X_{ERheat} \times E_{ESheat} - LHV \times X_{ERelec} \times E_{ESelec}\right) + \left(1 - \frac{R_2}{2} - R_3\right) E_d - \frac{R_1}{2} \times E_d^*$	<p>R1: [adimensional] ="contenido de material reciclado (o reutilizado)", es la proporción del material de entradas en la producción que ha sido reciclado en un sistema previo ($0 \leq R < 1$).</p> <p>Ev: Emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes de la adquisición y el tratamiento previo.</p>
Perfil de uso de los recursos y de emisiones asociados a las entradas de materiales que ha sido reciclada en un sistema previo.	RECIin		<p>Recycled: Emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes del proceso reciclado de material reciclado (o reutilizado), uncluido los procesos de recogida, clasificación y transporte</p>
Perfil de uso de los recursos y de las emisiones del proceso de reciclado (o reutilización) del que se deduce el crédito por entradas de material virgen evitadas (teniendo en cuenta todo posible ciclo de degradación)	RECOut		<p>R2: [adimensional] ="fracción de material reciclado (o reutilizado)", es la proporción del material que se utilizará en un sistema posterior. Tomará en cuenta las ineficiencias del proceso de recogida y</p> <p>RecycledEoL: emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes del proceso de reciclado en la etapa de EoL, incluidos el proceso de recogida, clasificación y transporte.</p> <p>Ev*: Emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultante de la adquisición y el tratamiento previo de material virgen supuestamente sustituido por materiales reciclables (ciclo abierto $E_{v^*} = E_v$; ciclo cerrado $E_{v^*} = E_v'$)</p> <p>Qs= Calidad del material secundario ; Qp= Calidad del material primario. $Q_s/Q_p =$ [Adimensional]</p>
Perfil de uso de los recursos y de emisiones obtenido del proceso de valorización energética del que se han deducido las emisiones por la situación de la fuente de energía.	ERout		<p>R3= [adimensional] proporción de material en el producto que se utiliza para la valorización energética ($0 \leq R_3 < 1$)</p> <p>Eer= Emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes del proceso de valorización energética.</p> <p>LHV= Poder calorífico inferior [p.e. J/kg] del material presente en el producto que se utiliza para la valorización energética. Este valor debe determinarse con un método de laboratorio apropiado.</p> <p>Xer,heat y Xer,elec: Eficacia del proceso de valorización energética ($0 \leq X_{er} < 1$) tanto para el calor como para la electricidad, es decir, proporción entre contenido de energía de las salidas (p.e. producción de calor o electricidad) y contenido de energía del material presente en el producto que se utiliza para la valorización energética. Por lo tanto X_{er} deberá tener en cuenta las ineficiencias del proceso de valorización energética.</p>
Perfil de uso de los recursos y de las emisiones neto resultantes de la eliminación de la fracción de material que no ha sido reciclada (o reutilizada) en la etapa de EoL o no ha sido transferida a un proceso de valorización energética.	DISPout		<p>Ed: Emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes de la eliminación de residuos en la etapa de EoL del producto analizado (p.e. depositado de vertedero, incineración, pirólisis).</p> <p>Ed*: Emisiones específicas y recursos consumidos (por unidad de análisis) resultantes de la eliminación de residuos (p.e. depósito en vertedero, incineración, pirólisis) en la etapa de EoL del material del que procede el contenido de reciclado.</p>

