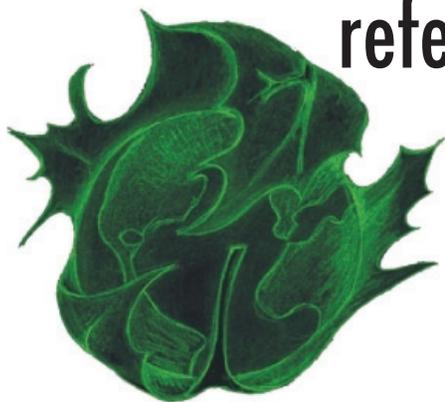


INGENIERÍA SOSTENIBLE DE LA CUNA A LA CUNA: una arquitectura de referencia abierta para el diseño C2C



María Estela Peralta-Álvarez
Francisco Aguayo-González
Juan Ramón Lama-Ruiz

Ingeniero Técnico en Diseño Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Ingeniero en Electrónica

UNIVERSIDAD DE SEVILLA. E.T.S.I. Dpto de Ingeniería del Diseño. Isla de la Cartuja. Camino de los Descubrimientos, s/n – 41092 Sevilla. Tfno: +34 954 153195. estela.pa@hotmail.es; faguayo@us.es; jrlama@us.es

Recibido: 28/07/2010 • Aceptado: 15/11/2010

SUSTAINABLE ENGINEERING BASED ON CRADLE TO CRADLE MODEL: an open architectural reference for a C2C design

ABSTRACT

- The increase of the market demands on innovative, functional and aesthetic products, friendly with the environment, has given a great relevance to the design and development of sustainable products. To achieve this goal, it is important to undertake a process of innovative design that will include sustainability requirements so that the product and its associated system become eco-efficient in its life cycle. This is the reason of this study, aimed at developing a model of design and bioinspired development, within the areas of the research concept of "Cradle to Cradle" and also based on the professional performance of eco-innovation, eco-design, eco-industry and on a whole within industrial ecology. The Genomic Eco-design Model (GEM) is defined as a methodology for designing products based on satisfying both individual and collective needs under the new paradigm of Cradle to Cradle. It focuses on eco-friendly product design and it is integrated within the regulatory framework of ISO standards for life cycle analysis, eco-design and eco-labeling.
- **Key words:** sustainability, eco-efficiency, ecodesign, cradle to cradle, life cycle analysis, eco-effectiveness, eco-innovation, ecoproduct, ecoprocess.

RESUMEN

El diseño y desarrollo de productos sostenibles ha adquirido gran importancia dentro de la ingeniería industrial, al incrementarse el nivel de exigencia del mercado en aspectos innovadores, funcionales, estéticos y, sobre todo, respetuosos con el medio ambiente. Para conseguir este objetivo, es importante llevar a cabo un proceso de diseño y desarrollo innovador, que englobe los requisitos de sostenibilidad para que el producto y el sistema asociado a su ciclo de vida sean ecoeficientes. Por esta razón se desarrolla este estudio, orientado a la fundamentación teórica del nuevo paradigma *Cradle to Cradle* y al establecimiento de un modelo de diseño y desarrollo bioinspirado. Todo ello incardinado dentro de los principios de este nuevo enfoque de sostenibilidad (C2C) y de la actuación profesional de ecoinnovación, ecodiseño, ecoindustria y ecología industrial. El Modelo Genómico de Ecodiseño (MGE) propuesto, se define como una metodología para la concepción de productos que satisfagan las necesidades individuales y

colectivas, bajo el nuevo paradigma de la ecoefectividad de *Cradle to Cradle*. Dicho modelo posibilita el diseño de productos ecocompatibles y es integrable en el marco de las normas ISO de análisis de ciclo de vida, ecodiseño y ecoetiquetado.

Palabras clave: sostenibilidad, ecoeficiencia, ecodiseño, cradle to cradle, análisis del ciclo de vida, ecoefectividad, ecoinnovación, ecoproducto, ecoprocesos.

1. INTRODUCCIÓN. CONCEPTO DE INGENIERIA SOSTENIBLE

Son diversas las definiciones de sostenibilidad y desarrollo sostenible formuladas hasta el momento. De todas ellas, es la citada a continuación la de mayor relevancia a efectos del presente trabajo.

"Es el desarrollo que satisface las necesidades actuales de las personas sin comprometer la capacidad de satisfacción de las generaciones futuras".

La sostenibilidad ha alcanzado un alto grado de relevancia en

la industria actual, llegando a situarse como el enfoque prioritario de innovación bajo el que se despliega la actividad empresarial, gubernamental o social. Ampliamente conocida, abarca tres grandes estadios que definen la estrategia 3E: economía, equidad y ecología [1], en un principio desplegados linealmente en la pirámide empresarial de la Figura 1, donde la prioridad recae en la economía y una vez garantizada, se acude al diseño de productos y procesos con criterios sociales y ambientales.

de su ciclo de vida, con la cual se concebirá su arquitectura y procesos de fabricación asociados, integrados de forma armónica con los flujos de materia y energía del ecosistema natural (naturesfera) y del ecosistema técnico (tecnosfera).

Las tres dimensiones de la sostenibilidad en el modelo *Cradle to Cradle* (C2C) son articuladas simultáneamente y bajo una concepción fractal [1,2]. Como puede comprobarse en la Figura 2, bajo esta perspectiva la sostenibilidad se transforma en el concepto 3E (economía, equidad y ecología),

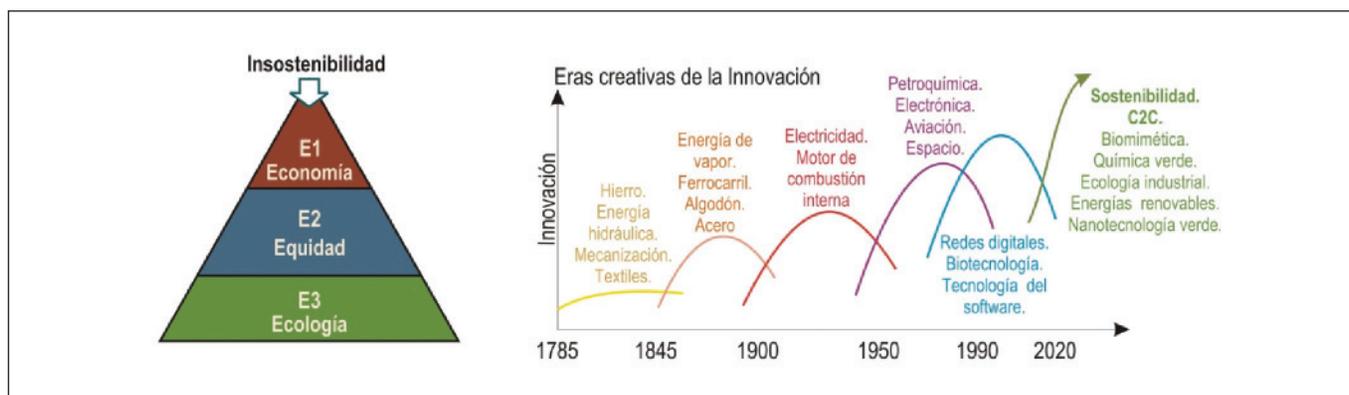


Fig. 1: Sistema secuencial de la actuación industrial insostenible en evolución

Para la consecución del desarrollo sostenible bajo la organización armónica de las 3E, se han articulado distintos marcos de trabajo (paradigmas), vertebrados sobre un conjunto de principios, técnicas y herramientas, entre los que cabe destacar:

- Capitalismo Natural
- El Paso Natural
- Cradle to Cradle* (C2C)
- Permacultura

El presente trabajo se incardina bajo el paradigma de *Cradle to Cradle* (C2C), por considerar que es el marco más significativo para el desarrollo de la sostenibilidad desde la perspectiva industrial en el contexto de proyectos de ingeniería, en atención a su carácter operacional y ecosistémico. Dos son los objetivos propuestos: por una parte, la realización de aportaciones a la fundamentación epistemológica de C2C y, por otra, concretar éstas en una propuesta metodológica de diseño para C2C de inspiración biónica, que pueda ser soportada por los entornos de ingeniería concurrente y PLM (*Product Life Management* - Gestión del Ciclo de Vida).

Dicho marco de trabajo propone considerar el diseño de productos y sistemas adoptando una perspectiva holística

introducida en un dominio triangular, constituyendo la metodología sostenible de la economía de la abundancia de sistemas complejos.

Este nuevo marco para el desarrollo de productos y sistemas industriales, no comporta algoritmos (secuencia de operaciones definidas en un sistema estático y lineal) ni sitúa los tres conceptos en posiciones de insostenibilidad, sino que potencia el fractal dinámico no lineal, eliminando las siguientes posiciones unidimensionales de insostenibilidad:

- La perspectiva económica** del negocio asociado a la rentabilidad del producto (capitalismo), sin considerar los aspectos ambientales y sociales.
- Visión de la equidad**, prestando atención a los segmentos de mercado de grupos desfavorecidos y a la sostenibilidad cultural, sin considerar aspectos económicos ni medioambientales.
- La vertiente ecológica** de integración del producto en el medioambiente sin considerar los aspectos sociales y económicos.

Esta perspectiva de ingeniería sostenible implica una metodología compleja basada en la concepción de sistemas dinámicos no lineales, inscritos en el triángulo de triángulos

"Cradle to Cradle: Rediseñando la forma en que hacemos las cosas" [2] es un libro escrito por Michael Braungart y William McDonough, en el que introducen las primeras bases de un nuevo paradigma para la industria ecológica, una innovadora perspectiva cuyos autores consideran el inicio de la "próxima revolución industrial".

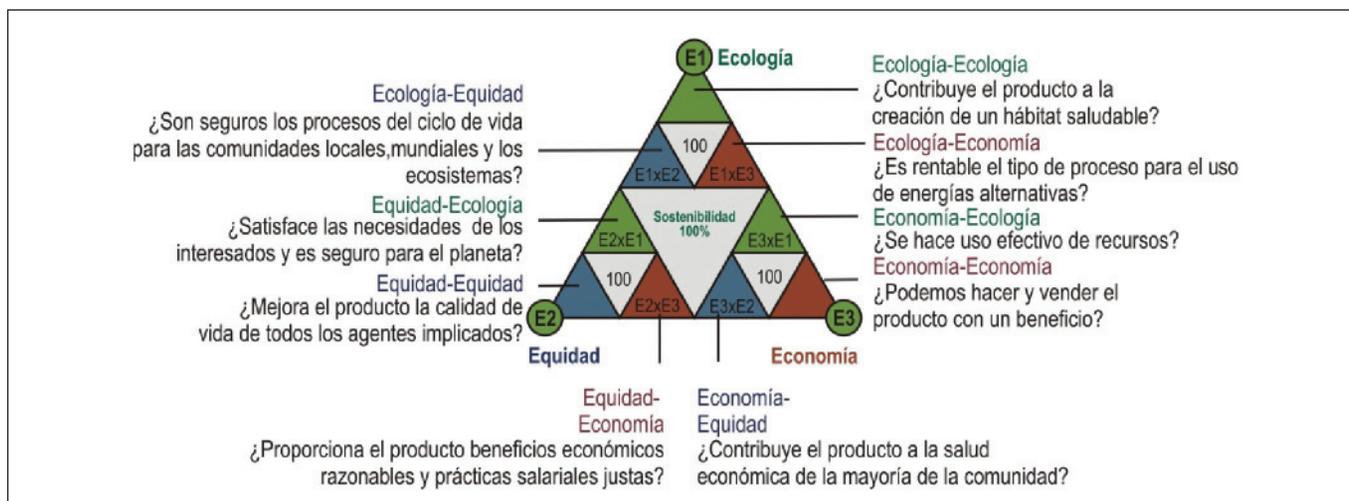


Fig. 2: Estructura Fractal de la Sostenibilidad en C2C

que puede apreciarse en la Figura 2, destinado para pensar y generar sostenibilidad y eliminar el desarrollo aislado de los tres términos (3E).

El enfoque de sostenibilidad C2C no responde a una ingeniería social y financiera que conciba de una forma independiente el capital financiero (económico), el capital humano (equidad social) y el capital natural (ecología), sino que establece su interdependencia transformando estos capitales en activos ecosociales. De este modo, el triángulo fractal y su dinamismo operacional, maximizan los valores de todas las áreas empresariales implicadas en el diseño y desarrollo de productos, a través del diseño eointeligente (satisfacción de todos los agentes involucrados en el proyecto).

De esta manera la *triple bottom line* [1-4] de la Figura 1, debe convertirse en una *triple top line*, o lo que es lo mismo, una triple cuenta de resultados del proyecto, derivada de la ecoinnovación y sinergia de los conceptos sostenibles. Acogido este enfoque, se alcanzará el objetivo que muestra la Figura 3, donde en su proyección temporal, las ideas de

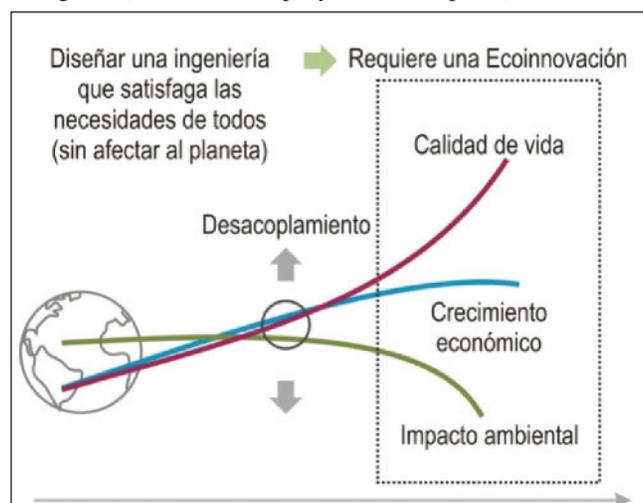


Fig. 3: Objetivo Sostenible de la Actividad Industrial

conseguir calidad de vida y el crecimiento económico, se desacoplan del impacto ambiental sobre el medio.

Derivado de lo expuesto anteriormente, se hace necesario el desarrollo del nuevo paradigma C2C [2], desde donde concebir la sostenibilidad de forma holística, integrando los enfoques actuales de análisis de ciclo de vida, fabricación limpia y ecología industrial [5-8], todos incardinados desde la ecoeficiencia a la ecoefectividad. Para llevarlo a cabo, surge la necesidad de desarrollar nuevos procesos de diseño y desarrollo de productos, convirtiendo C2C en una plataforma de innovación para la siguiente Revolución Industrial.

2. EVOLUCIÓN DEL DISEÑO Y DESARROLLO AMBIENTALMENTE SOSTENIBLE DE PRODUCTOS Y SISTEMAS INDUSTRIALES

El diseño sostenible plantea una estrategia que abarca factores tecnológicos [9-12], económicos, culturales, sociales, técnico-productivos, estéticos y medioambientales. Este conjunto de aspectos, consigue que las empresas y organizaciones industriales que lleven a cabo proyectos de ecodiseño, obtengan una serie de beneficios como consecuencia de la introducción de un factor innovador en su política empresarial.

Hasta la fecha, el diseño para la sostenibilidad y la gestión ambiental de la industria han transcurrido por una serie de fases representadas en la Figura 4 [13-17].

a. Reactividad. Los gobiernos empezaron a tomar medidas y a exigir determinadas acciones de los actores industriales, solo cuando expertos, organizaciones y movimientos ecologistas comenzaron a tomar conciencia del problema ambiental generado (base de la pirámide de la Figura 4). Su magnitud estaba marcando el futuro del planeta a raíz de la masificación de la industria con su continua exigencia de consumo de recursos y elevadas demandas de energía.

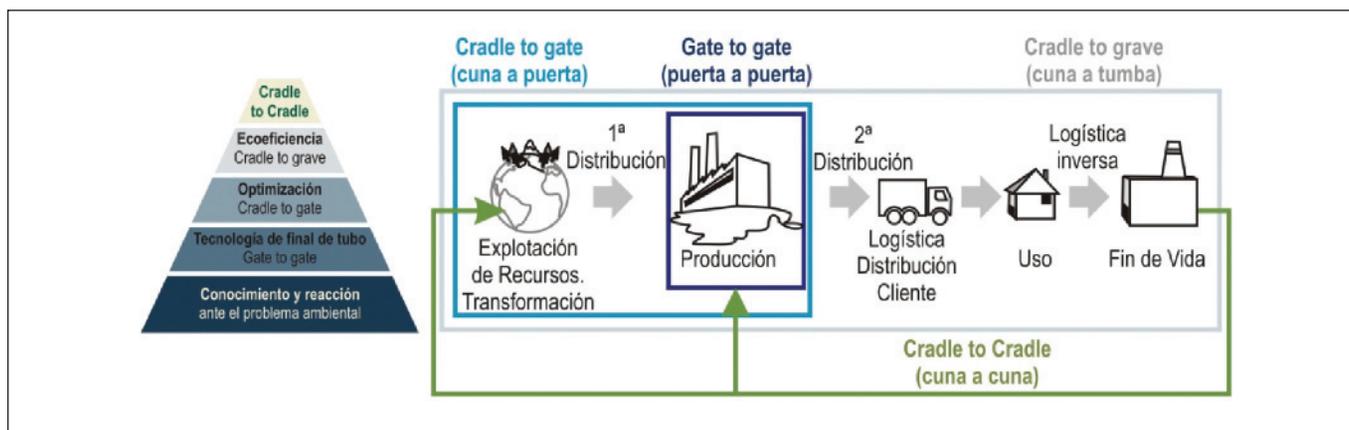


Fig. 4: Evolución de la Industria hacia objetivos sostenibles

b. Tecnología de fin de tubo. Cuando las legislaciones exigieron un mayor control de la contaminación, se comenzaron a implantar las tecnologías de final de tubo (segundo nivel de la Figura 4). Más allá de sus beneficios, sólo era una forma más de tratar las continuas generaciones de residuos, desechos y emisiones al final de la línea de producción, con el agravante de necesitar una demanda adicional de energía, materiales y equipos especializados.

objetivo no es sólo asegurar la eficiencia de procesos a lo largo de las etapas del ciclo de vida, sino que al final de la vida útil de los productos, sus materiales puedan volver a ser reutilizados o reciclados (sin que esto suponga el degradado de su calidad), lo que eliminaría el actual sistema de generación de residuos de los vertederos o la contaminación de la atmósfera por la incineración.

Este último enfoque para abordar la sostenibilidad, se encuentra en desarrollo con amplias expectativas de poder ser implantado en su totalidad en un futuro, estableciendo un nuevo marco paradigmático para el diseño y desarrollo de productos y sistemas industriales con un ciclo de vida cerrado, como el indicado en la Figura 4. Esta situación es avalada por el proyecto europeo *Cradle to Cradle Network* (C2CN) [3] aprobado en febrero del 2010, para desarrollar el paradigma C2C y difundirlo en Europa, dentro del INTERREG IVG (*Innovation and Environment Regions of Europe Sharing Solutions*).

c. Optimización. Comprobando que la optimización de las actividades y de los procesos (tercer nivel Figura 4) era la siguiente mejor opción, se fue desarrollando la idea de la ecoeficiencia, que planteaba una visión de futuro enmarcada en la rentabilidad de prevenir la contaminación y no de combatirla.

d. Ecoeficiencia. La ecoeficiencia fue tomando parte en la estrategia industrial, desarrollándose hasta abarcar todas las etapas del ciclo de vida, desde la extracción de materiales, hasta el fin de la vida de los productos. Esto llevó a una supervisión exhaustiva de todos los aspectos del ciclo de vida para comprobar cómo respondían los productos y analizar todos los datos que intervenían, llevando a cabo este trabajo con las normas de la serie ISO 14000. Esta estrategia denominada “*cradle to grave*” (de la cuna a la tumba) mejoraba y mejora el proceso de eliminación del daño medioambiental.

e. Cradle to Cradle (Ecoefectividad). Como último avance, se está desarrollando la perspectiva “C2C” [2], cuyo

3. MARCO PARADIGMÁTICO DE CRADLE TO CRADLE

El núcleo central del paradigma C2C [1,2,18-25], está constituido por las soluciones o ecoinnovaciones inspiradas en la naturaleza, en los ciclos cerrados de materiales y en el metabolismo industrial, todo ello para adoptar soluciones ecoeficaces. Aportando ecoinnovaciones que crean valor añadido y ayudan a reducir el uso de recursos naturales, se ponen en valor los recursos fabricados en sucesivos ciclos y se reduce la degradación ambiental.

El establecimiento de unas bases epistemológicas (teóricas y metodológicas) para C2C a partir de un **enfoque bioinspirado en la naturaleza** [26, 27], supone la creación de productos y de los procesos asociados a su CV (ciclo de vida) que simulen los entes naturales, que a lo largo de millones de años se han mantenido sin generar impacto sobre el medio ambiente. Por ello, la metodología debe plantearse de forma que la naturaleza sea vista como modelo, medida y mentora de las actividades humanas y de la práctica industrial.

a. Modelo, porque se pueden imitar formas, procesos, flujos, interacciones y sistemas que llevan funcionando millones de años de un modo ecoeficiente.

b. Medida, porque se ha de evolucionar constantemente en diseños y compararlos con los referentes naturales, comprobando con ello si las soluciones propuestas son igual de efectivas y eficientes, simples y sostenibles, que las que encontramos en la naturaleza.

c. Mentora, porque tenemos que aceptar que somos parte de ella, y por tanto, dejar de actuar como si fuéramos ajenos, concibiendo sus sistemas ecocompatibles.

Los enfoques que se plantean en relación al concepto de ecoefectividad en C2C, establecen hacer más con menos y no ralentizar el problema ambiental minimizando el consumo de recursos, emisiones y residuos, sino eliminándolos, todo ello siguiendo el concepto de Biomimetismo (*Biomimicry*) o diseño inspirado en la naturaleza [1, 26]. Por ello, los autores [1, 2] de este pensamiento, proponen una serie de ideas que hemos articulado en un conjunto de principios (Pi) [15, 18, 25]:

P1: Reenfoque proactivo. Frente al enfoque reactivo de los ecologistas de “reducir, reutilizar y reusar” con el objetivo de minimizar el impacto sobre el medio ambiente, provocando sólo una ralentización de su degradación ambiental, llegando al mismo final destructivo, se propone una actuación proactiva desde la raíz, es decir, desde el proceso de diseño y concepción de los sistemas. Se rechaza la suposición de que la industria destruye inevitablemente el medio natural, reconociendo el potencial dentro de la economía de la abundancia, del poder del ingenio, creatividad y prudencia, imaginando sistemas que junto a su funcionalidad técnica, purifican el agua, la atmósfera y el suelo, ayudando a la naturaleza a crear valor ambiental.

P2: Concepción sistémica e integrada del metabolismo asociado al producto en su ciclo de vida. Incluir una perspectiva holística en el ciclo de vida de los productos, contemplando los procesos metabólicos de anabolismo o ingeniería directa y el catabolismo o manufactura inversa, que determinará los materiales (técnicos y biológicos) sobre la tecnosfera y naturaleza, y el acoplamiento de las rutas metabólicas en ciclos cerrados.

P3: Fractalización de la sostenibilidad bajo la consideración de desecho=alimento. La estrategia 3E convierte el dominio de la abundancia y yacimiento en oportunidades de valor, con una triple cuenta de resultados (económicos, sociales y ecológicos). Esto determina el cambio desde la economía de la escasez a la de abundancia, derivado de considerar ciclos cerrados con múltiples productores y consumidores, transformando la basura o desechos en alimento (valor para nuevos consumidores).

P4: Ecoinnovación bioinspirada (biomimesis). Basada en los aprendizajes de la naturaleza, incluyendo innovaciones eficaces bioinspiradas, que frente a la mejora de la solución ineficaz (ecoeficiencia), proporcione un valor añadido y ayude a reducir el uso de recursos naturales y la degradación ambiental, y que directa o indirectamente, contribuya a la minimización del impacto.

P5: El producto como ser vivo y su sistema asociado como ecosistema. Considerar y concebir productos y ecosistemas industriales como la metáfora de un ser vivo junto a su ecosistema natural (ecología industrial), cuyos flujos metabólicos de materiales asociados al ciclo de vida estén incluidos en ciclos cerrados sin pérdidas de valor y daños al medio ambiente, adaptados a la capacidad de carga ambiental local y global.

P6: Ecointeligencia. La inteligencia ecológica es el concepto que describe la capacidad de concebir y desarrollar productos o servicios, diseñados para que desde su creación hasta el fin de su vida útil, sean ecocompatibles y beneficiosos para el medio ambiente y los agentes involucrados, regenerando el valor perdido hasta la actualidad en el planeta. En la Figura 5 puede comprobarse que según el enfoque que tome la industria, podrá asegurarse un futuro sostenible o la destrucción total del medio natural.

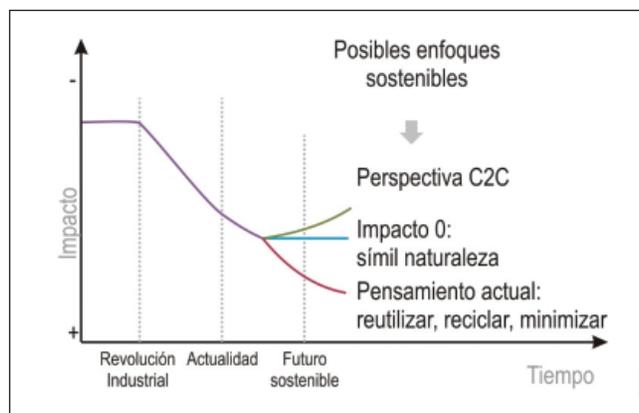


Fig. 5: Posibles soluciones para el problema ambiental

P7: Respetar y fomentar la diversidad. La diversidad (genes, organismos, poblaciones, ecosistemas) favorece la resiliencia y robustez del producto y del sistema asociado, garantizando la seguridad en un mundo cambiante. Por ello, todo aquello perteneciente al medio natural y a la tecnosfera, que esté influenciado por la fabricación, uso y eliminación de los productos, no debe verse afectado negativamente, celebrando y potenciando la diversidad natural y técnica, evitando productos y sustancias xenobióticas.

P8: Ecoefectividad frente a ecoeficiencia. La ecoefectividad trata directamente el concepto de mantener (o mejorar) la calidad de los recursos y la productividad, a través de ciclos cerrados, en lugar de eliminar la basura, es decir, propugna un metabolismo cíclico o cierre completo de ciclos materiales (no existe basura) donde los residuos de un sistema se convierten en nutrientes para otros. Esta idea es trasladada de la naturaleza, donde no existen desechos y por tanto sus ciclos materiales son cerrados (desecho = nutriente, circunscritos preferentemente en el ámbito local).

P9: Utilización de energías renovables. La energía demandada de la actividad industrial debe ser obtenida de fuentes renovables preferentemente, en lugar de explotar

los recursos abióticos que proporcionan la energía de los combustibles fósiles, devastando las regiones donde estos materiales han sido procesados en el interior del planeta durante milenios.

El aspecto más novedoso de C2C es el planteamiento de un diseño ecoeficaz o ecoefectivo, diseñando desde una perspectiva ecosistémica, definiendo nuevas reglas para crear productos y procesos industriales que **conviertan los**

Con estos nueve principios, los proyectos de diseño y desarrollo asegurarán la obtención de productos que tengan asociados ciclos cerrados, en los cuales no se generen residuos y se recuperen todos los materiales sin disminuir la calidad. Todo ello en consonancia con el carácter de sistema abierto en energía y cerrado en materia del planeta tierra.

3.1. TÉCNICAS Y HERRAMIENTAS C2C

Bajo el enfoque C2C han sido desarrolladas un conjunto de técnicas y herramientas, sin que hasta el momento hayan sido integradas en un modelo de diseño y desarrollo de productos.

Las herramientas asociadas a C2C a considerar, son el estudio y la utilización de materiales biodegradables, análisis y balance de flujos materiales (AFM), diagramas Sankey de balances de energía, análisis exergético, diseño y desarrollo de metabolismos del producto, el análisis del ciclo de vida (ACV), diseño químico, estudio de rutas metabólicas biológicas y técnicas, diseño de ciclo cerrado de nutrientes, árboles de desensamblado del producto, estrategia triple E (o pirámide fractal), X-list y P-list, la ecoefectividad, el redescubrimiento de conceptos ambientales, las cinco etapas del rediseño (no usar contaminantes perjudiciales, seguir los informes de referencia, lista pasiva positiva, lista activa positiva y redescubrir o innovar) y diseño bioinspirado.

materiales en nutrientes, de tal forma que se permita su flujo dentro de los dos ciclos metabólicos posibles mostrados en la Figura 6: el metabolismo biológico asociado a la naturaleza y el técnico asociado a la tecnosfera [28].

Desde esta perspectiva, la consecución de la sostenibilidad está íntimamente ligada a la concepción de un producto desde una perspectiva ecosistémica.

El propósito del diseño para C2C es mejorar la capacidad metabólica de la naturaleza y la tecnosfera, mediante la implementación de sistemas de ecología industrial en los cuales se lleve a cabo una ecogestión efectiva de nutrientes, formando conjuntos de materiales inteligentes que posibiliten el supra-reciclado.

Dado el interés del análisis de flujo de materiales en los distintos niveles tróficos y de la energía, pasamos a exponer de una forma más detallada los elementos conceptuales del anteriormente definido principio 3.

Para los flujos generados por la industria, se establecen dos rutas metabólicas posibles asociadas a la tecnosfera y la naturaleza, constituidas por los elementos que aparecen en la Figura 6 y que poco a poco deberán tomarse en cuenta en el diseño de productos y sistemas industriales. Los metabolismos establecidos en C2C son:

a. Metabolismos asociados a la naturaleza: formados por los procesos ligados a los nutrientes biológicos (en la Figura 6 correspondientes a CB) que puedan volver a la biosfera (litósfera, hidrósfera y atmósfera), depositando en ella sólo materiales orgánicos (es decir, ni sintéticos ni tóxicos, como podría ocurrir al desechar una mesa compuesta únicamente de madera). Estos materiales son metabolizados y regenerados por la naturaleza.

b. Metabolismos asociados a la tecnosfera: constituidos por los materiales y procesos técnicos asociados al producto en su CV, son aquellos que serán metabolizados por la tecnosfera y forman los nutrientes técnicos (en la Figura 6 correspondientes a CT). Se despliegan en la tecnosfera pudiendo ser de dos tipos:

b.1. Infra-reciclado (*downcycling*) donde los materiales y el producto pierden calidad y lo único que se logra es posponer su eliminación o su llegada a vertederos, ralentizando su ciclo destructivo. En esta ruta los materiales van perdiendo valor. Será el caso, por ejemplo, de la fabricación de una moqueta sintética a partir de botellas de

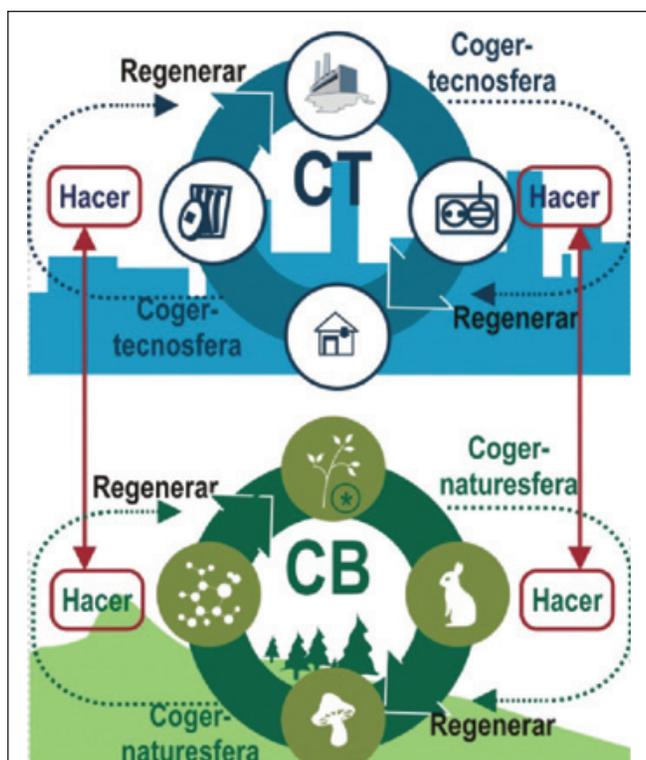


Fig. 5: Posibles soluciones para el problema ambiental

PET, las cuales, después de cumplir con su objetivo inicial, serán recicladas en un proceso donde el material sufre una pérdida de propiedades y de calidad, y por lo que, para poder ser aprovechadas, deberán estar destinadas a una utilización en fabricaciones de productos que no requieran las características que ofrece el material primario.

b.2. Supra-reciclado (*upcycling*) donde se permite transformar los materiales o un producto sin uso, destinado a ser residuo, en otro de igual o de mayor utilidad o valor. Estas rutas dan lugar a materiales más valiosos transformándose en privilegiadas para el ecodiseño de productos y ecología industrial. Es el caso, por ejemplo, del sector del automóvil; una vez que cada vehículo queda en desuso, muchas de las piezas de sus motores podrían ser reutilizadas sin problemas en otras aplicaciones.



Fig. 8: Certificaciones y Ecoetiquetas

La concepción sistémica de C2C, busca el cierre de los flujos de materiales, (desde la cuna a la cuna), eliminando el concepto de residuo y tomando como energía, para las reacciones metabólicas, prioritariamente la procedente de los recursos renovables.

Las rutas metabólicas en ciclos cerrados (*closed loop cycle*) que se crean con el anterior conjunto de nutrientes, son mantenidas por flujos energéticos para los que la naturaleza es sistema abierto. Puede comprobarse en la Figura 7, cómo se simplifican los procesos del ciclo al adoptar estas rutas innovadoras.

a la ecoefectividad C2C (Figura 8), administrado por los autores de esta nueva perspectiva y que diferencia productos según los objetivos sostenibles conseguidos, en niveles de platino, oro, plata y básico. Los criterios para su obtención pasan desde el nivel básico (donde se valora el inventario del producto y la estrategia), el nivel plata (conseguido con

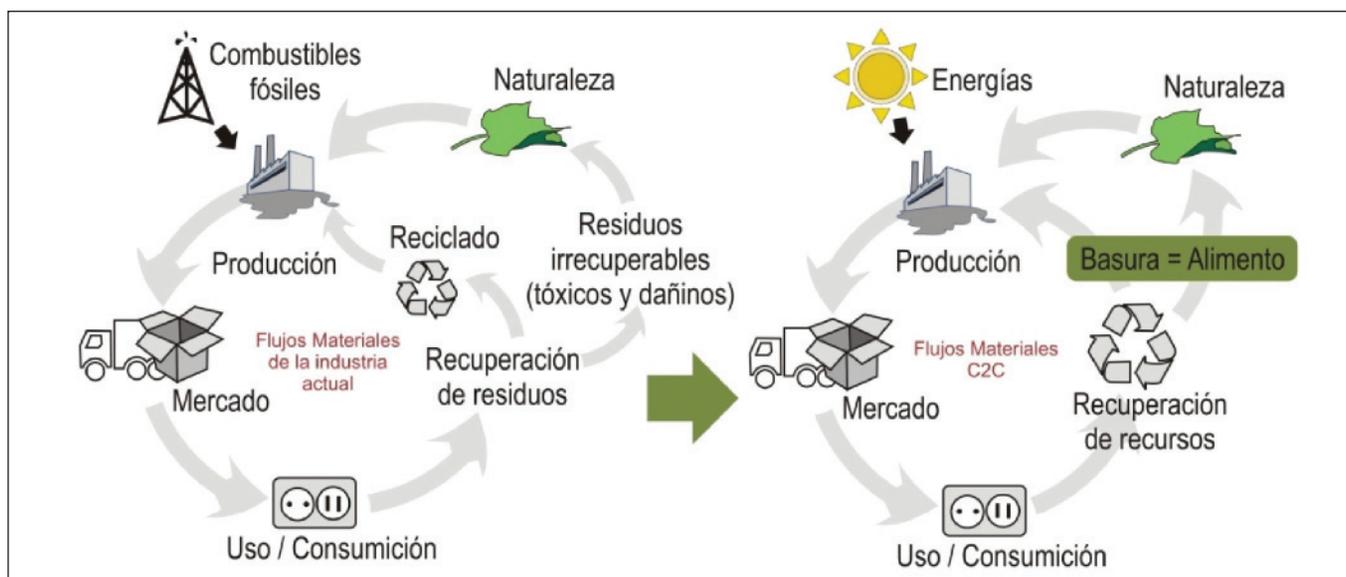


Fig. 7: Evolución del actual Ciclo de Vida de Productos al modelo C2C

3.2. CERTIFICACIÓN C2C

Junto a los actuales programas de etiquetado ecológico de las normas ISO que otorgan a los productos las ecoetiquetas de tipo I (UNE-EN ISO 14024:2001), tipo II (UNE-EN ISO 14021:2002) y tipo III (UNE-EN ISO 14025:2007), se ha desarrollado un nuevo sistema de certificación asociado

un producto con un 50% de materiales reusables), C2C oro, (cuyos productos se compongan de un 65 % de materiales, producción y energía limpia) y nivel platino, que incluye todos los requerimientos anteriores y que además se consiga una buena administración del agua en el ciclo de vida.

4. MODELO GENÓMICO DE ECODISEÑO. MGE

La propuesta de modelo genómico de diseño y desarrollo (*Modelo Genómico de Ecodiseño* - MGE), pretende introducir en los productos, una serie de características que marcarán su carácter sostenible, el cual prescribe que los productos sean

El MGE para *Cradle to Cradle* (C2C) tiene una estructura de cuádrupla, formada por una serie de elementos representados en la Figura 9.

<MGE>::= <<Estrategia de Producto>><Genotipo>>
Fenotipo>>ACV>>

Dimensión estática	Propias de una generación de producto
Carácter Sostenible de producto (autocompatible)	<ul style="list-style-type: none"> ➡ Autopoyético: (auto-regenerable) que se haga a sí mismo. ➡ Metabolizable: (ecocompatible) la huella del producto sobre el medio ambiente, en su ciclo de vida, debe tener un impacto asimilable por el medio ambiente. ➡ Sistémico: (holístico) donde se consideran los distintos escenarios proyectuales, las interacciones cíclicas del producto y los flujos metabólicos que se generan asociados al ciclo de vida, tanto para nutrientes biológicos como técnicos.
Dimensión dinámica	Determinan las variaciones en las distintas generaciones de productos
Carácter Evolutivo del producto (resiliencia y robustez)	<ul style="list-style-type: none"> ➡ Selección natural (presión ambiental): derivada de la interacción del genoma (características internas del producto) con el medio ambiente (el cual selecciona a los más aptos) dando lugar al fenotipo. Constituye el factor de aprendizaje entre generaciones de producto. ➡ Recombinación y Mutaciones (combinación de dos genotipos diferentes) Ambos se corresponden con los procesos aleatorios de la transmisión genética entre generaciones y con las estrategias de hibridación entre productos del portafolios de la empresa.

Tabla 1: Características objeto y variedad requerida del MGE

Los términos **genotipo** y **fenotipo**, propios de la genética (donde representan la dualidad de los organismos), han sido escogidos en este caso como analogía para describir las características internas de un producto (genotipo) y su expresión o interacción en un determinado ambiente (fenotipo).

concebidos (diseñados desde el principio) para que al llegar al fin de su vida útil, se puedan reincorporar una y otra vez al comienzo del proceso como nutrientes técnicos, dotándolos de un carácter autopoyético y autoregenerable. En la Tabla 1, se exponen los requerimientos de variedad de producto que debe incorporar el MGE de diseño, para garantizar el diseño ecocompatible de productos y que permita integrar en sucesivos rediseños (nuevas generaciones de productos), el potencial de innovación de la evolución de producto en el ecosistema asociado (mercado, tecnosfera, naturasfera, etc.).

El modelo recoge las exigencias de complejidad y flexibilidad de los nuevos entornos de desarrollo PLM (*Product Life Management* – Gestión del Ciclo de Vida), los entornos de ingeniería colaborativa distribuida y es parametrizable en atención a la complejidad del producto, constituyendo una arquitectura de referencia abierta para los entornos de ingeniería concurrente, colaborativa y distribuida.

<**Fenotipo**> determina el resultado esperado de un producto en el mercado (entorno). Se obtiene a partir del análisis del mercado, la legislación, análisis de usuario, disposición de recursos materiales del contexto, las tradiciones, la logística directa e inversa, procesos de fin de vida útil, etc. Es decir, se analiza el comportamiento que un determinado producto ha tenido o que se requiere que tenga en el mercado, bajo los criterios de sostenibilidad C2C y desde la perspectiva de los distintos agentes interesados en el proyecto (de ahí la existencia y distribución de los diferentes dominios de la Figura 9). Los rasgos fenotípicos se obtienen a partir de la información del sistema en que se integrará y que tendrá asociado el producto en su ciclo de vida, que en el MGE se refiere a las 3E.

<**Estrategia de producto**> A partir del análisis del comportamiento requerido o “fenotipo” de producto existente o deseado y de su sistema asociado, se definen los objetivos bajo los cuales se diseñará un nuevo producto y se gestionará su ciclo de vida bajo los principios C2C. Toda

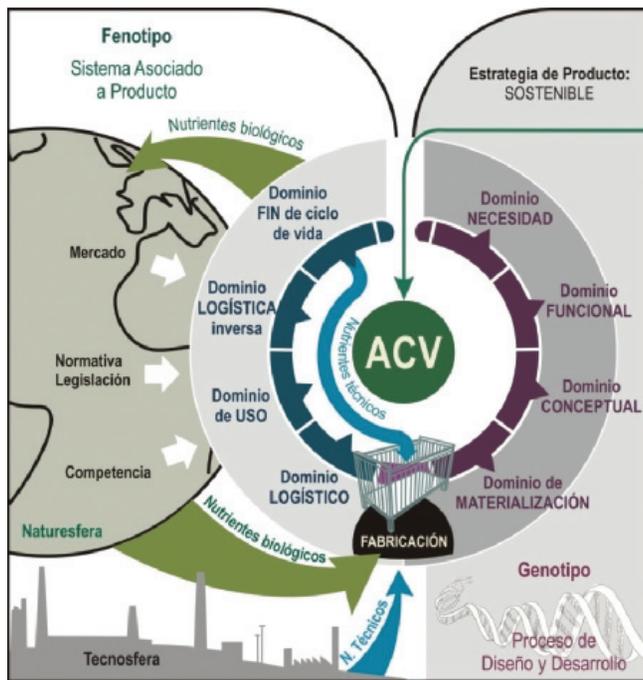


Fig. 9: Modelo Genómico de Ecodiseño (MGE)

esta información se estructura en la estrategia de producto desde los principios enunciados de C2C, explorando el yacimiento de innovación de las 3E con la técnica de la pirámide Triple-E.

<Genotipo> Tomando como base la estrategia de producto, se establecen los “genes” (o características internas), los cuales engloban diseño conceptual sostenible, rutas tecnológicas, soluciones de productos y de procesos asociados, que definen a su vez la arquitectura de producto, los materiales (nutrientes técnicos y biológicos), las rutas metabólicas y las energías renovables que las sostendrán, desde la cuna hasta la cuna.

El instrumento básico para desarrollar las soluciones de diseño y el establecimiento de sus “genes”, está constituido por las estrategias básicas de ecodiseño, orientadas a la ecoeficiencia y apoyadas con estrategias de diseño biomimético dirigidas a la ecoefectividad. La intención es obtener ciclos cerrados característicos de la perspectiva C2C, que serán aplicados en cada uno de los dominios de diseño que componen el genotipo y el fenotipo (figura 9). En esta fase, las estrategias y técnicas genéricas de diseño asociadas al entorno de ingeniería concurrente de desarrollo de productos, serán parametrizadas en función de los objetivos del proyecto, complejidad de producto, etc.

<Análisis del ciclo de vida (ACV)> Esta herramienta adquiere una especial importancia en el modelo propuesto, que persigue el conocimiento cualitativo y cuantitativo [17] de la información de usuarios, comercial, de los flujos de materiales, energía, emisiones y sus consecuencias para el medio ambiente, etc. Es decir, datos correspondientes al fenotipo del producto y de su sistema asociado que servirán para la proposición de mejoras a incorporar en un producto. Se puede desarrollar el ACV a partir de ingeniería inversa del fenotipo del producto a rediseñar o sobre el diseño genómico de un nuevo producto (ingeniería directa). El análisis del ciclo de vida en el MGE, es aplicado para los tres aspectos que constituyen el yacimiento de valor 3E, si bien para el caso de estudio se hace sólo de los aspectos ambientales.

5. CASO DE ESTUDIO. APLICACIÓN DEL MODELO GENÓMICO DE ECODISEÑO AL REDISEÑO DE UNA CAFETERA DE GOTEO

El modelo genómico está concebido para ser aplicado en todos aquellos proyectos de diseño y desarrollo de productos con objetivos sostenibles bajo C2C. En este caso, la metodología y estrategias descritas se aplican en el desarrollo del rediseño de una cafetera, precedido por estudios expuestos en [29].

5.1. DEFINICIÓN DE PRODUCTO Y ETAPAS A SEGUIR

La forma en que el MGE puede ser implementado es muy flexible, variando según el tipo de proyecto, la complejidad del producto y los objetivos propuestos en:

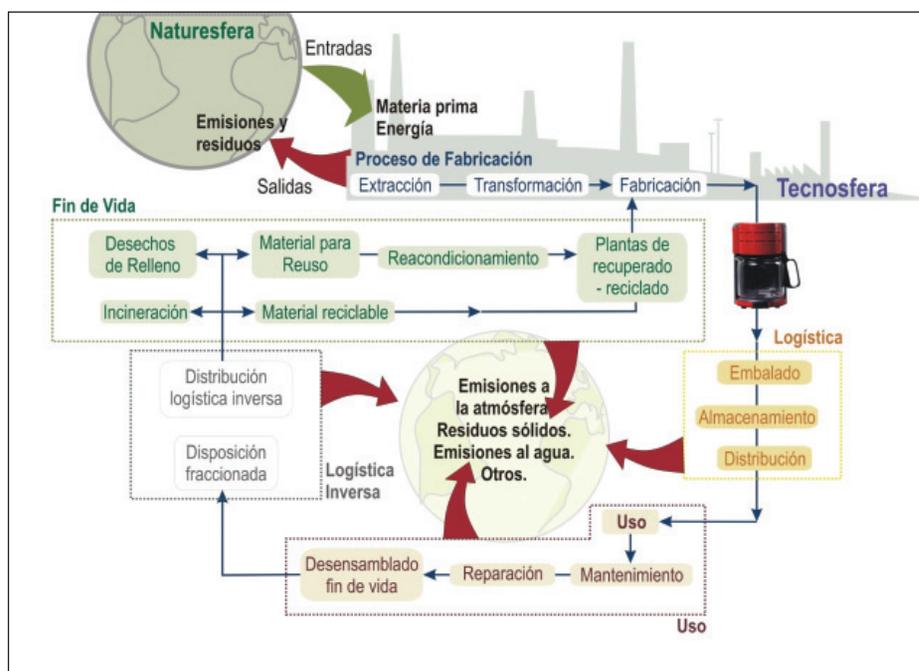


Fig. 10: Procesos y Macrorutas Metabólicas del Producto

- a. Rediseño de un producto
- b. Diseño de un nuevo producto

Pudiendo concretarse, según el objetivo, distintos modos de operación sobre las diferentes etapas del modelo. Es decir, el MGE ofrece flexibilidad de aplicación y de elección de técnicas y herramientas destinadas a la consecución de proyectos C2C.

El producto seleccionado para el eco-rediseño es una cafetera eléctrica de goteo convencional. Como el modelo indica, se procedió a seguir las siguientes etapas:

- a. Análisis del ciclo de vida del fenotipo del producto objeto de rediseño (por ingeniería inversa)

- b. Establecimiento de la estrategia de producto bajo C2C
- c. Rediseño genómico del producto
- d. Validación del genotipo y optimización fenotípica
- e. Nuevo ACV a efectos de Declaración Ambiental de Producto.

5.2. PARTE 1: ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DEL FENOTIPO DEL PRODUCTO EXISTENTE

El Análisis del Ciclo de Vida es un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando y cuantificando, tanto el

uso de materia y energía, como las emisiones al entorno, para determinar el impacto del uso de recursos y las emisiones, y para evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental [15]. El estudio abarca el ciclo de vida completo del producto, teniendo en cuenta todas las etapas desde “la cuna a la tumba” (*cradle to grave*) del producto actual (Figura 10). Para este caso y siguiendo el MGE, este ACV se orienta de la cuna a la cuna.

El objetivo principal de esta herramienta dentro del MGE, es conocer la carga ambiental del comportamiento del producto en relación a las 3E. En el caso de estudio se muestra sintetizada en la Figura 11, la información correspondiente al vértice ecológico de la pirámide. Como se comprueba, gracias a esta manera razonada y cuantificada de exponer la información, se establecen las mejoras que determinarán la estrategia de producto.

5.3. PARTE 2: ESTABLECIMIENTO DE LA ESTRATEGIA DE PRODUCTO BAJO C2C.

Conocidos los datos del ACV y las posibles mejoras a aplicar, se procede a establecer una estrategia de producto autopoyética, metabolizable, sistémica y ecocompatible, a través de la exploración del yacimiento de la innovación de las 3E, con la técnica de la pirámide Triple E, la cual se expone sintetizada en la Figura 12.

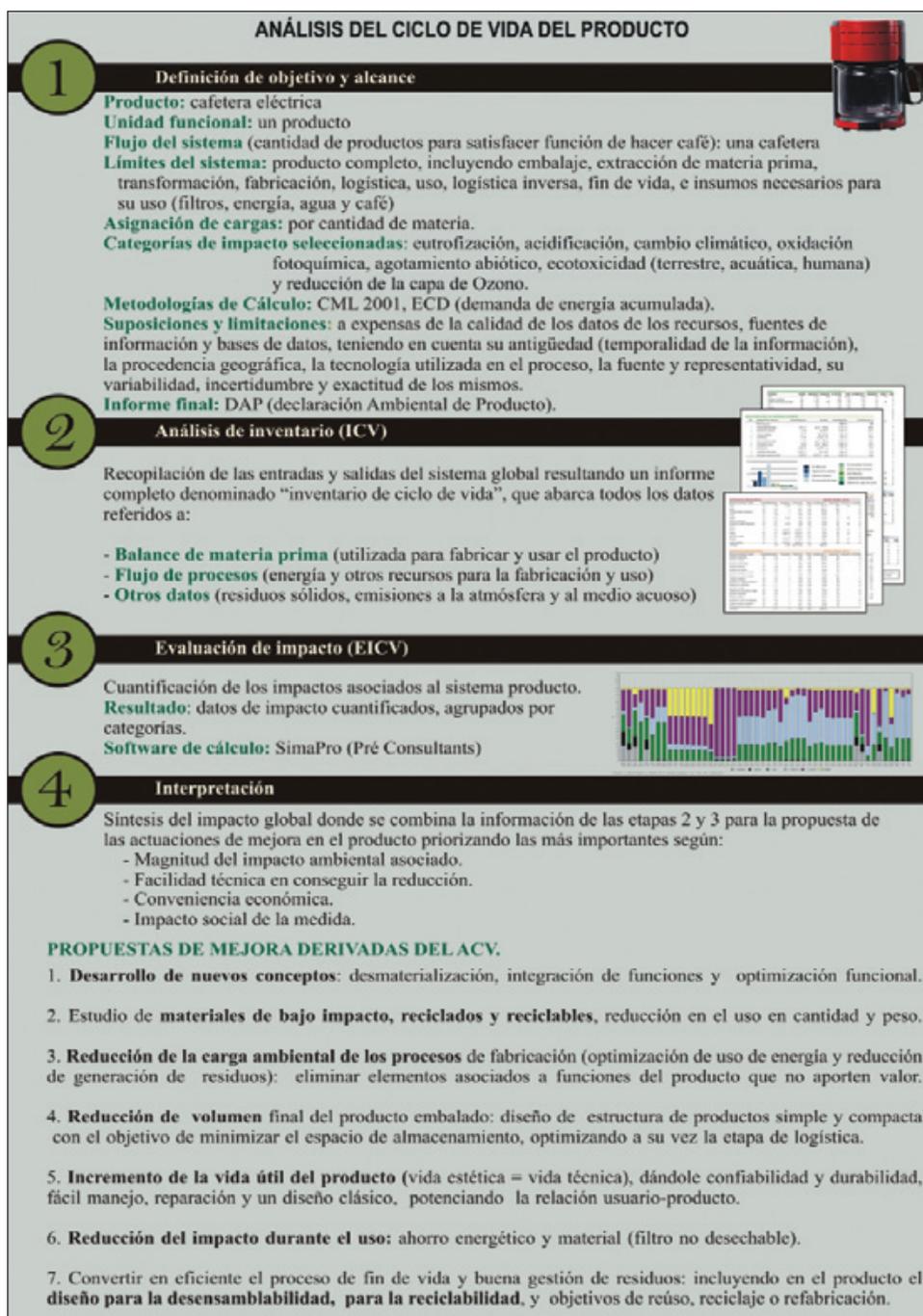


Fig. 11: Análisis de Ciclo de Vida del Producto



Fig. 12: Pirámide Triple E aplicada al producto

La generación del conjunto de valores 3E, permite establecer las premisas que definen la estrategia de producto, a partir de la cual se parametriza en técnicas y herramientas el entorno de diseño genérico que constituye el MGE. La estrategia del producto del caso de estudio se concreta en:

1. Integración sistémica (o perspectiva holística) por concepción bioinspirada: donde se tengan en cuenta en la fase de proyecto los diferentes escenarios de la cafetera a lo largo de todo su ciclo de vida, con el objetivo de favorecer e integrar equitativamente los tres aspectos de la pirámide 3E.

2. Producto sostenible y ecocompatible. Mejorar la metabolización disminuyendo los ratios de carga ambiental sobre la naturaleza, para minimizar el impacto que genere

sobre el medio ambiente o hacer que su huella sea asimilable. Para ello se hace necesario incrementar el ratio de flujos de materia sobre la tecnosfera (unidad de producto) mediante supra-reciclaje y disminución de los ratios de infra-reciclaje, eliminar sustancias tóxicas o contaminantes incorporando las innovaciones procedentes de la química verde o sostenible. Finalmente, se incorporan funciones cooperantes con la naturaleza creando valor ambiental.

3. Carácter autopoyético: aportando la inteligencia genética al producto para facilitar las tareas de uso, logística y manufactura directa e inversa y su regeneración al final del CV. De modo especial, la inteligencia que incorpora el potencial de innovación de las interacciones fenotípicas con el sistema asociado a las sucesivas generaciones de productos, capitalizando su regeneración.

5.4. PARTE 3: DISEÑO Y DESARROLLO DEL GENOTIPO DEL PRODUCTO

Conocidos los datos del análisis del ciclo de vida, el fenotipo requerido y definida la estrategia de producto, se procede al rediseño bajo los principios de C2C. Para ello se lleva a cabo el desarrollo del diseño genómico, con el estudio detallado de cada dominio (necesidad, funcional, conceptual y de materialización). En cada uno se aplican una serie de estrategias individuales de ecodiseño y las herramientas necesarias para definir todos los requisitos que harán que el producto sea sostenible, sintetizadas en la parte derecha, Figura 13.

De forma concurrente se procede a **verificar y validar** el diseño genómico del producto, desde los requerimientos del sistema que tendrá asociado a su ciclo de vida (parte izquierda de la Figura 13), procedimiento de interacción del genoma con el medio. Esto dará lugar al fenotipo inicial que se desarrollará y optimizará a lo largo del ciclo de vida y de las sucesivas



Fig. 13: Desarrollo de Genotipo y Fenotipo

La solución final es la cafetera de goteo ERIS [29], caracterizada por su sostenibilidad. Los resultados, características y flujos materiales pueden comprobarse en la Figura 14.

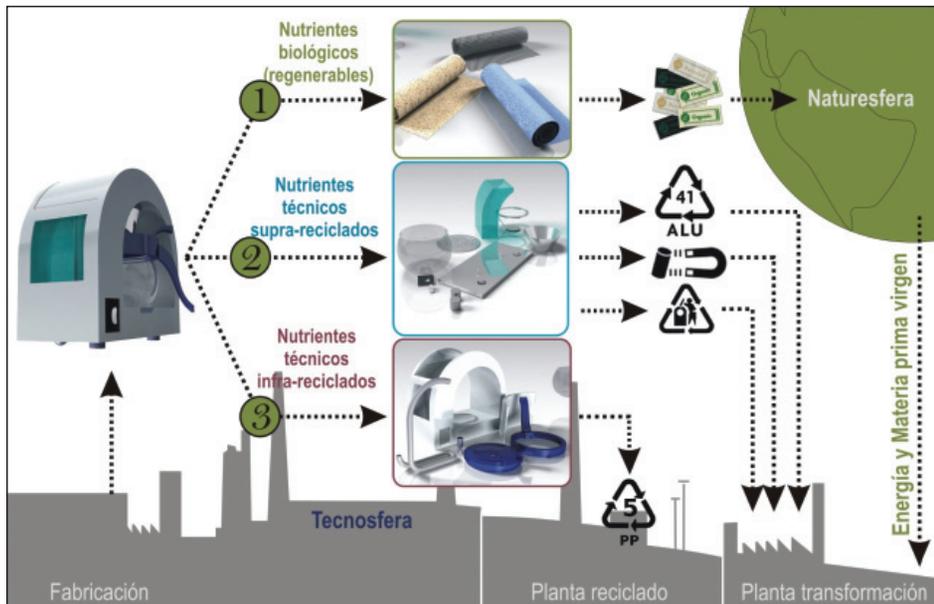


Fig. 14: Rutas Metabólicas del nuevo producto

5.5. PARTE 4: NUEVO ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE PRODUCTO A EFECTOS DE CERTIFICACIÓN

La última etapa en la aplicación del MGE se corresponde con la realización de un nuevo ACV del rediseño del producto.

Este análisis tiene como objetivo principal conocer todos los datos necesarios para la obtención de una etiqueta ecológica, de alguno de los programas de certificación de producto, entre los que se encuentra C2C, además de confirmar las mejoras planteadas en el proceso de diseño. En el caso que nos ocupa se trata de obtener el sello de ecoproducto de AENOR.

Como se ha comentado, los actuales programas de ecoetiquetado se definen según el estudio ambiental que se lleve a cabo sobre el producto. Gracias a la aplicación del ACV dentro del MGE, el producto opta por la Ecoetiqueta de Tipo III [UNE-EN ISO 14025:2007], con la redacción de su Declaración Ambiental de

Producto (DAP) en la cual se presentará la información ambiental de la cafetera, cuantificada durante todo su ciclo de vida para permitir su comparación con otros productos que cumpliendo la misma función, causan la mayor repercusión sobre el medio ambiente. Los beneficios son claros, ya que a través de la comunicación de información exacta y verificable, se fomenta la demanda y el suministro de todos aquellos productos que posean una ecoetiqueta.

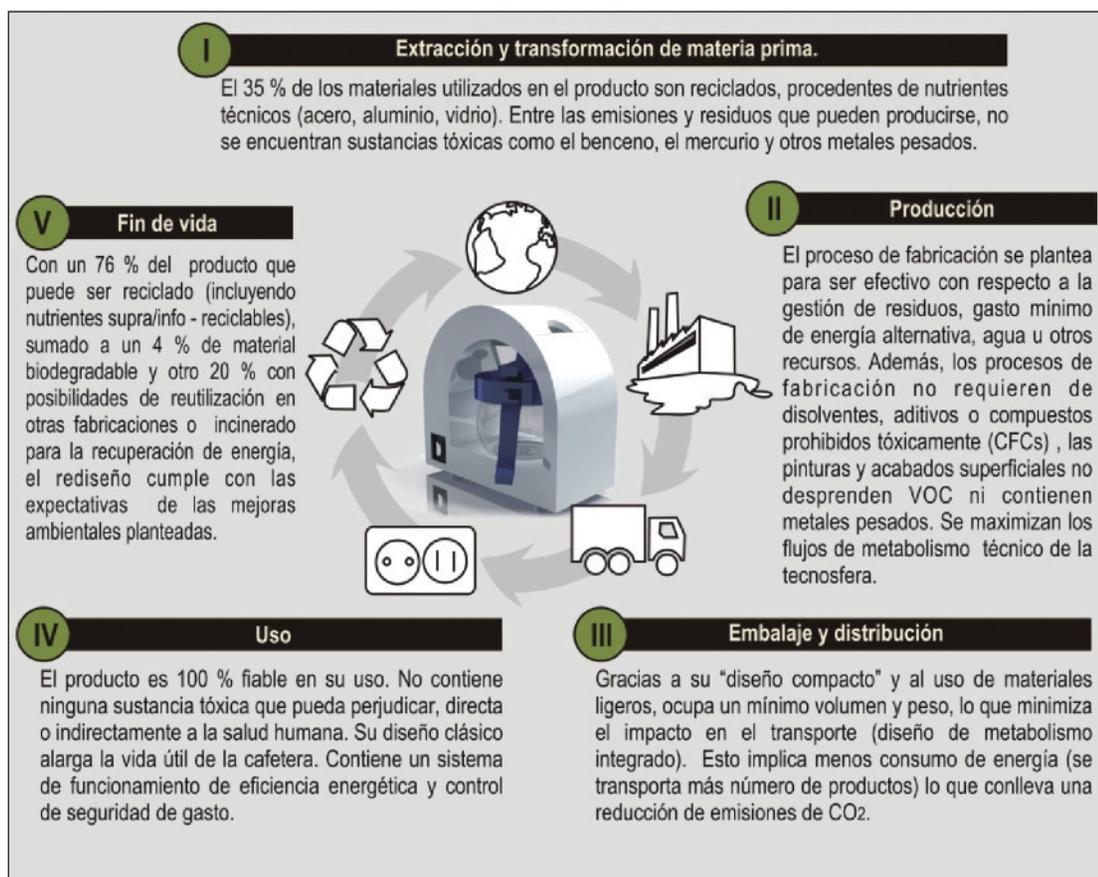


Fig. 15: Síntesis de Ciclo de Vida de la cafetera ERIS

5.6. RESULTADOS FINALES

La síntesis final se muestra en la Figura 15, resumiendo las características que hacen que el producto sea sostenible bajo el paradigma C2C, mostrando los logros conseguidos de las etapas del ciclo de vida que se optimizan.

6. CONCLUSIONES

El trabajo presentado aporta una articulación epistemológica de las ideas de la perspectiva C2C no existentes hasta el momento y un modelo de diseño y desarrollo que supone una forma articulada de llevar a la práctica los fundamentos de este nuevo paradigma de diseño. Recogiendo las lecciones aprendidas del enfoque de la ecoeficiencia y la ecoinnovación, se desarrolla una nueva arquitectura de referencia bioinspirada para el proceso de diseño y desarrollo ecoeficaz bajo los principios C2C, denominada MGE. Este puede soportar todos los requerimientos normativos que hasta la fecha se exigen y ampliar el rango de soluciones para mejorar las actuaciones de minimización de impacto y solventar el problema que la industria actual está causando en el planeta.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] McDonough W, Braungart M. "Design for the Triple Top Line: New Tools for Sustainable Commerce". *Corporate Environmental Strategy*. Vol.9-3 p.251-258
- [2] McDonough W, Braungart M. *Cradle to Cradle (de la cuna a la cuna): rediseñando la forma en que hacemos las cosas*. Pérez Van Kappel G (traductor). 1ª edición. Madrid: McGraw-Hill/ Interamericana de España S.A.U, 2005. 186p. ISBN: 84-481-4295-0
- [3] INTERREG IVC. *Cradle to Cradle Network (0542C2 C2CN) Call to Tender*. Finlandia: 2010. 16p.
- [4] Tukker A, Charter M, Vezzoli C, et al. *System Innovation for Sustainability 1: Perspectives on Radical Changes to Sustainable Consumption and Production*. 1ª edición. Inglaterra: Greenleaf Publishing, 2008. 470p. ISBN: 978-1-906093-03-7
- [5] Wimmer W, Züst R. *ECODESIGN Pilot: Product-Investigation, Learning and Optimization Tool for Sustainable Product Development*. 1ª edición. Holanda: Kluwer Academic Publishers, 2003. 112p. ISBN: 978-1-4020-0965-8
- [6] Wimmer W, Züst R. *Ecodesign Implementation: A Systematic Guidance on Integrating Environmental Considerations into Product Development*. 2ª edición. Holanda: Springer, 2010. 160p. ISBN: 1-4020-3070-3
- [7] Graedel T, Allenby B. *Industrial Ecology*. 2ª edición. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 363p. ISBN: 0-13-046713-8
- [8] Tukker A, Tischner U. *New Business for Old Europe: Product-service Development, Competitiveness and Sustainability*. 1ª edición. Inglaterra: Greenleaf Pubns, 2006. 479p. ISBN: 978-1-874719-92-2
- [9] Vezzoli C, Manzini E. *Product-Service System and Sustainability. Opportunities for Sustainable Solutions*. 1ª edición. Paris: UNEP, 2002. 18p. ISBN: 92-807-2206-9
- [10] Klostermann J, Tukker A. *Product Innovation and Eco-Efficiency: Twenty-Two Industry Efforts to Reach the Factor 4*. 1ª edición. Holanda: Springer, 2009. 308p. ISBN: 978-0792347613
- [11] Mulder K. *Sustainable Development for Engineers: a Handbook and Resource Guide*. 1ª edición. Inglaterra: Greenleaf Publishing, 2006. 256p. ISBN: 978-1-874719-19-9
- [12] Vezzoli C, Manzini E. *Design for Environmental Sustainability*. 1ª edición. Londres: Springer, 2010. 324p. ISBN: 1-84-996741-5
- [13] Giudice F, La Rosa G, Risitano A. *Product Design for the Environment: A Life Cycle Approach*. 1ª Edición. Estados Unidos: CRC Press, 2006. 520p. ISBN 0-8493-2722-9
- [14] Pennin L, Vezzoli C. *Designing sustainable product-service systems for all. Sustainable clothing care concepts for University campuses in emerging context*. 1ª edición. Librería Clup, 2005. 48p. ISBN: 978-88-7090-813-8
- [15] Ciambrone F. *Environmental Life Cycle Analysis*. 1ª Edición. Nueva York: Lewis Publishers, 1997. 145p. ISBN: 1-56670-214-3
- [16] Allen D, Shonnard R. *Green Engineering: Environmentally Conscious Design of Chemical Processes*. 1ª edición. Prentice Hall, 2001. 552p. ISBN: 0-13-061908-6
- [17] Graedel T, Allenby B. *Design for Environment*. 1ª edición. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 192p. ISBN: 1-56670-214-3
- [18] Bakker C, Wever R, Teoh Ch, et al. "Designing Cradle to Cradle products: a reality check". *International Journal of Sustainable Engineering*. Vol. 3-1 p.2-8
- [19] Braungart M, McDonough W, Bollinger A. "Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions e a strategy for eco-effective product and system design". *Journal of Cleaner Production*. 15-2007 p.1337 - 1348
- [20] Lakhani M. "The need for Clean Production and Product Re-design". *Journal of Cleaner Production*. 15-2007 p.1391- 1394
- [21] Rossi M, Charon S, Wing G, et al. "Design for the Next Generation: Incorporating Cradle to Cradle Design into Herman Miller Products". *Journal of Industrial Ecology*. Vol. 10-4 p.193-210.
- [22] Werker C. "Innovation, market performance, and competition: lessons from a product life cycle model". *Technovation*. Vol.23-2003 p.281-290
- [23] McDonough W, Braungart M, Anastas P, et al. "Applying the Principles Engineering of Green to Cradle to Cradle Design". *Environmental Science & Technology*. Vol. 37-2003 p.434-441
- [24] Alston K. "Cradle to Cradle Design Initiatives: Lessons and Opportunities for Prevention through Design (PtD)". *Journal of Safety Research*. Vol. 39-2 p.135-136
- [25] Blanco A. "Design for the Environment: From Cradle to Cradle". *Plastics Engineering*. Vol.62-8 p.10-13
- [26] Benyus J. *Biomimicry, Innovation inspired by nature*. 2ª edición. Nueva York: ediciones HarperCollins, 2002. 208p. ISBN: 0-06-053322-6
- [27] Ausubel K, Harpignies J. *Nature's Operating Instructions: The True Biotechnologies (The Bioneers Series)*. 1ª edición. San Francisco: Sierra Club Books, 2004. 256p. ISBN: 1-57-805099-5
- [28] Braungart M. *Cradle to Cradle an innovation platform*. [Material gráfico proyectable]. Hamburgo: 2009. 69 diapositivas.
- [29] Peralta-Álvarez ME. *Ecodiseño de una Silla de Oficina*. Proyecto Fin de Carrera. 400p. Dirección: Aguayo - González F. Escuela Politécnica Superior, Sevilla, 2010