

# Propuesta de marco de trabajo para la evaluación de la sostenibilidad de productos desde el paradigma de la economía circular basada en industria 4.0 (parte 2)

*Proposal of a framework for the evaluation of the sustainability of products from the paradigm of the circular economy based on industry 4.0 (2<sup>nd</sup> part)*

Ana De-Las-Heras-García-de-Vinuesa, Francisco Aguayo- González y Antonio Córdoba-Roldán  
ETSII. Universidad de Sevilla (España)

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8718>

## 1. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de mitigar la fractura metabólica [1] y basados en el paradigma de la economía circular donde se aúnan los aspectos ambientales y económicos con un nuevo modelo de sociedad que utiliza y optimiza stocks y flujos de materiales, energía y residuos creando ciclos cerrados, se ha desarrollado un nuevo marco de trabajo para la evaluación integrada de la sostenibilidad en los productos inteligentes conectados.

Este nuevo marco de trabajo queda compuesto por tres pilares: los marcos de trabajo ACV [2] y C2C [3], evolucionados

hacia una nueva versión conectada donde los facilitadores digitales aporten datos e información en tiempo real, junto con la conectividad como eje estructural para el desarrollo de un modelo metodológico orientado a las mejoras estratégicas aportadas por la Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0.

La siguiente figura muestra el esquema conceptual de la articulación del marco de trabajo donde se aborda una evaluación de los impactos provocados por el diseño y fabricación de productos orientado a los efectos (AVC, eco-eficiencia) y las causas (C2C, eco-efectividad) integrada en las tres dimensiones de la sostenibilidad: impactos ambientales, impactos económicos e impactos sociales.

El objetivo de este trabajo se centra en el desarrollo metodológico del modelo, de forma que, en la sección 2 se presenta la estructura del mismo con las fases y las

etapas que lo componen. En cada una de las fases, adenómica y doméstica, se hace una definición del objetivo y contenido de sus etapas así como los niveles de análisis y evaluación de las mismas.

La sección 3 se centra en una parte del modelo, la Cloud Desing Manufacturing Platform (CDMngP) [4], plataforma IoT para la recogida, procesamiento, análisis y almacenaje de los datos recogidos por los sensores ubicados en el producto inteligente conectado así como de aquella información procedente de otras fuentes de datos (histórico de datos de la empresa, datos de los distribuidores, información de productos del mercado y bases de datos estandarizadas para el ACV de cada dimensión) necesarias para la evaluación de la sostenibilidad del mismo, con técnicas de Big Data e inteligencia artificial en la nube para la monitorización y control en tiempo real.

## 2. FORMULACIÓN DEL MODELO DE DISEÑO Y EVALUACIÓN INTEGRADA DE LA SOSTENIBILIDAD DESDE LAS CAUSAS (C2C) Y EFECTOS (ACV) PARA PRODUCTO INTELIGENTE CONECTADO

Siguiendo el principio de conectividad de industria 4.0, se propone modelo dentro del marco de trabajo desarrollado bajo el paradigma de la economía circular para

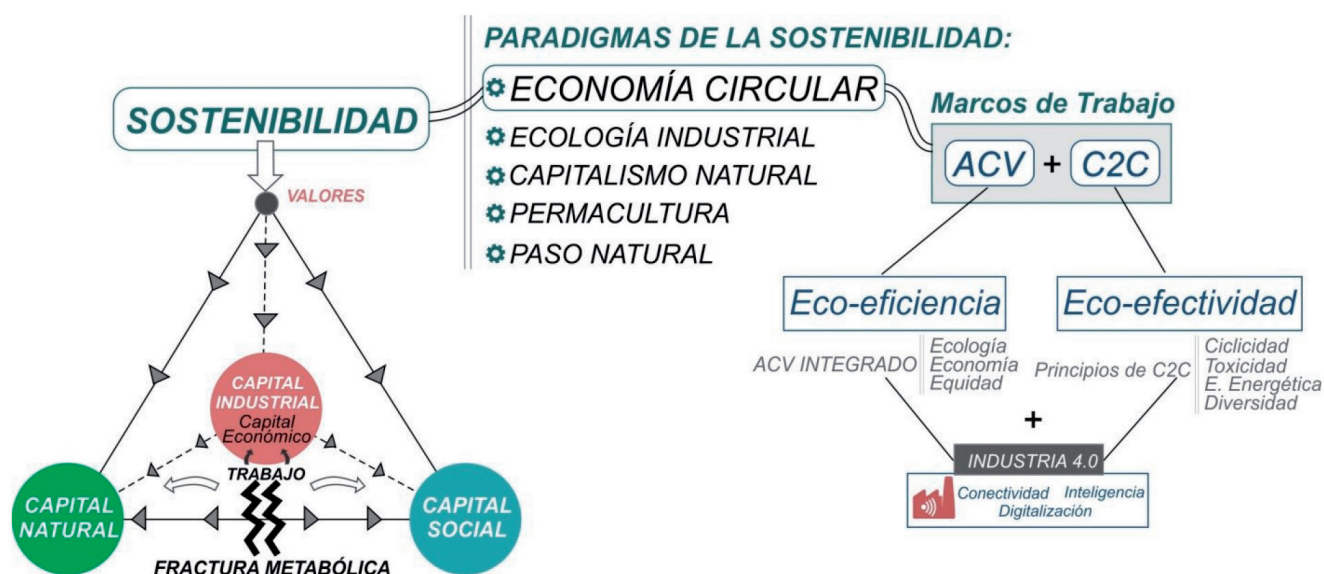


Figura 1: Estructura marco de trabajo para la sostenibilidad conectada. Fuente: Elaboración propia

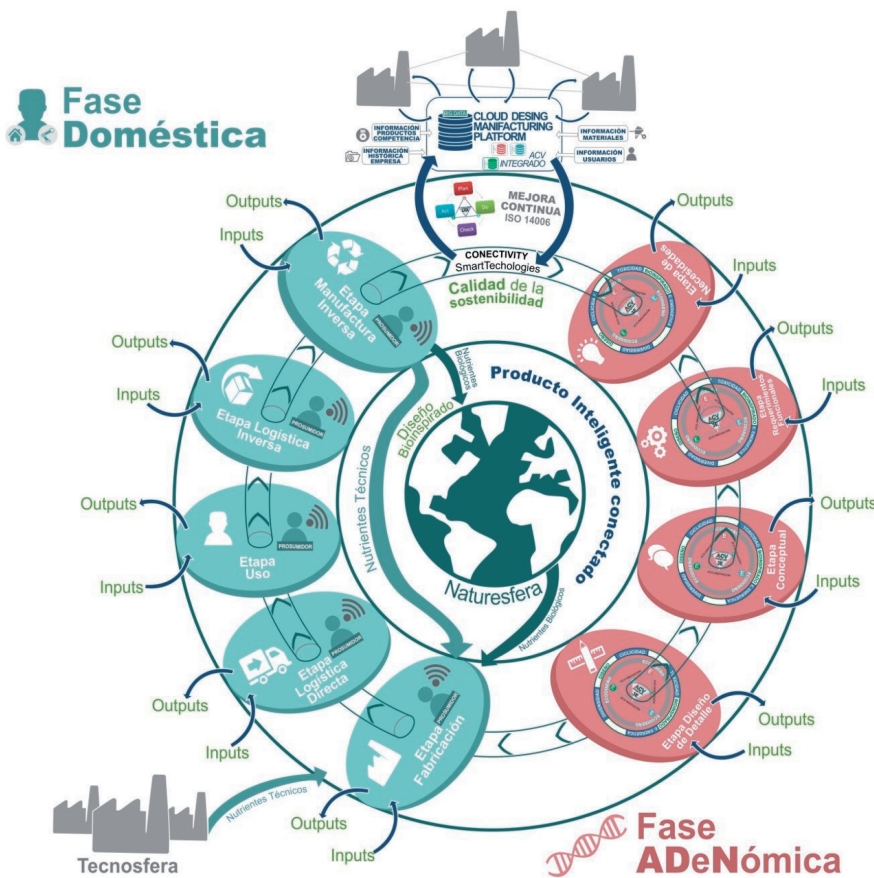


Figura 2: Estructura MDESA. Fuente: Elaboración propia

la evaluación de la sostenibilidad bajo la perspectiva de análisis de los efectos y las causas de los impactos (ACV y C2C conectado), la 3E y los facilitadores digitales.

ACV conectado presenta una visión de todo el ciclo de vida, permite obtener el efecto del impacto de forma cuantitativa, elegir el método de eliminación más adecuado (a través del ecodiseño y la eco-innovación) dependiendo de aquel que suponga menor impacto negativo, analizar el tipo de nutrientes que se eliminan y, por tanto, aquellos que puede ser mejor metabolizados por la biosfera (para superar la limitación que posee la metodología C2C en la clasificación de los nutrientes como biológicos o técnicos).

Complementarias a las potencialidades que aporta el ACV conectado, aparecen aquellas con las que contribuye el C2C conectado. Ésta metodología permite obtener la información de las causas de los impactos definiéndose como una herramienta útil y necesaria en la toma de decisiones posteriores a la evaluación ocupando dentro del modelo, una posición transversal con el cálculo de indicadores referidos a los 4 criterios (ciclicidad, toxicidad, eficiencia energética y diversidad) que contribuyen a la toma de decisiones y

desarrollo de líneas guías para el desarrollo sostenible del producto.

El **Modelo de Diseño y Evaluación Sostenible Adenómico (MDESA)** está compuesto por dos fases: fase adenómica y fase doméstica.

La fase adenómica la componen las etapas donde se fija el ADN del producto y

el carácter autopoyético de la sostenibilidad a través de su adenificación organizado en genes en base a los requerimientos funcionales, mediante el proceso de evaluación diseño y desarrollo del producto inteligente conectado.

Por otro lado, la fase doméstica es la que dota al producto de las características ligadas al usuario, es decir, los genes, introduciendo un nuevo concepto, la *domesticación* [5] del producto, que añade las modificaciones de los consumidores y prosumidores en cada una de las cinco etapas que componen la fase determinando las distintas modificaciones del ADN en el contexto del ciclo de vida del producto.

Como puede observarse en la figura 2, ambas fases se encuentran unidas por un canal de comunicación, donde poder aportar y absorber datos en tiempo real. Este canal de conectividad hace que los datos del producto sean recogidos, analizados y procesados en la CDMngP, que recoge tanto los datos creados en tiempo real en las distintas etapas como el histórico de datos que genera el P&PLM del producto. Así mismo, este modelo está conectado con las bases de datos estandarizadas para el ACV en cada una de las dimensiones (ambiental, económica y social) de forma que exista una capa de almacenamiento con diversos tipos de bases de datos (no-estructuradas, semi-estructuradas y estructuradas).

La CDMngP del MDESA soporta la conexión con otras *industrias inteligentes* de forma que, no solo se trabajen con datos creados en tiempo real, sino que sea posible el acceso a bancos de subproductos

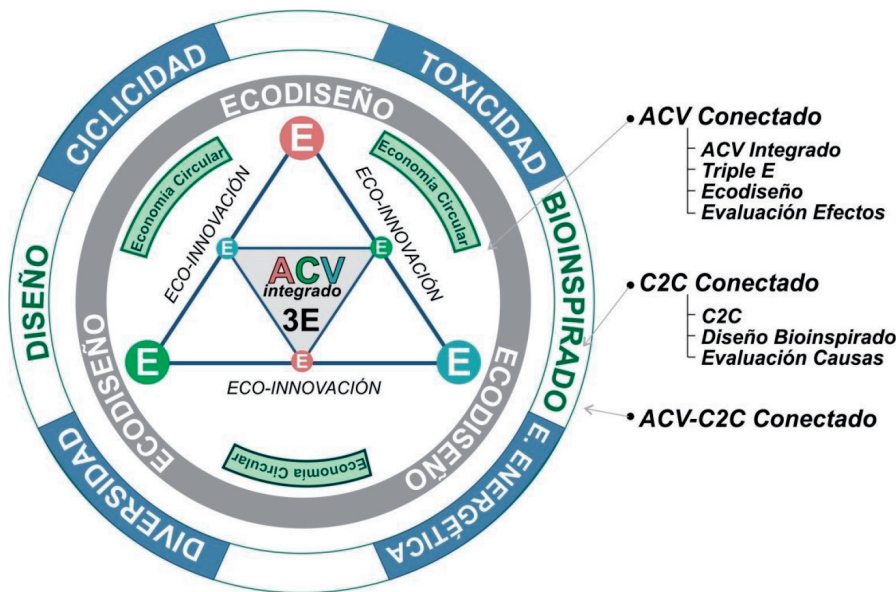


Figura 3: Estructura etapas fase ADeNómica. Fuente: Elaboración propia

y materiales preprocesados de forma que se promueve la creación de ciclos cerrados gracias a los metabolismos industriales y sociales conectados, desde el paradigma de la economía circular.

2.1. FASE ADENÓMICA

En esta fase se fija el ADN del producto y comprende: Etapa de necesidades, Etapa de requerimientos funcionales, Etapa conceptual y Etapa de diseño de detalle. En cada una de ellas, se ponen a disposición de los stakeholders que intervienen en el ciclo de vida del producto un conjunto de posibilidades de evaluación de los impactos a través del uso de técnicas y herramientas orientadas al efecto, las causas o la combinación de ambos. La figura 3 recoge la estructura de análisis que se lleva a cabo en cada etapa, donde la parte interior se refiere al ACV conectado y la parte externa al C2C conectado.

Los stakeholders que forman el equipo de diseño dentro del P&PLM tienen a disposición, en cada uno de estos dos niveles presentes en todas las etapas de la fase adenómica, una serie de recursos en forma de herramientas y técnicas donde realizar el análisis y evaluación de los impactos que mejora de forma continua el proceso de diseño del producto.

- **ACV integrado:** En este nivel del ACV conectado se plantea la aplicación de una evaluación integrada bajo las tres dimensiones de los impactos negativos de un producto a través de la aplicación de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida Sostenible (LCSA).
- **Triple E:** La triple cuenta de resultados (3E) supone la integración de las tres dimensiones de la sostenibilidad como yacimiento de valor.
- **Ecodiseño:** Aplicación de técnicas y herramientas para el ecodiseño ecoinnovador de productos.
- **Evaluación de Efectos:** Combinación de aplicación de los tres niveles anteriores con el fin de realizar una evaluación integrada conectada de los efectos de los impactos en un smart connected product.
- **C2C:** Desarrollo de una evaluación basada en los 4 principios que plantea el C2C con el objetivo de desarrollar productos que sigan la línea de aportar eco-innovaciones y crear valor en los recursos fabricados en sucesivos ciclos
- **Diseño Bioinspirado:** Aplicación de técnicas y herramientas para el diseño innovador inspirado en la na-

| TOXICIDAD                                                                                  | CICLICIDAD                                                                                                                    | E. ENERGÉTICA                                                                               | DIVERSIDAD                                                                                                                                                                                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Peso total de la toxicidad (TTM). Toxicidad relativa de los materiales del producto (RTP). | Materiales del producto procedentes de fuentes recicladas (MFRS).<br><br>Materiales que serán reciclados o compostados (MTBR) | Demanda Acumulada de Energía (CED).<br><br>Contribución de energía de cada coproducto (CEC) | Clasificación de imitación a la naturaleza por la morfología (MFO).<br>Clasificación de imitación a la naturaleza por función (MFU).<br>Clasificación de imitación a la naturaleza en ecosistema (MECO) |

Tabla 1: Criterios evaluación C2C transversal

- turaleza y todo el potencial de los sistemas naturales.
- **Evaluación de Causas:** Combinación de aplicación de los dos niveles anteriores con el fin de realizar una evaluación integrada conectada de las causas de los impactos en un smart connected product.
  - **ACV y C2C conectado:** Combinación completa de la evaluación de efectos y causas de los impactos en un smart connected product.
  - **Economía Circular:** Principios e indicadores de economía circular.

2.2. FASE DOMÉSTICA

Una vez fijado el ADN, se procede a la industrialización y lanzamiento y la consiguiente evolución del producto en el mercado y su fin de vida útil. En estas etapas el producto sufre modificaciones por posibles mejoras, adaptación a modos de uso o preferencias de los consumidores, que recibe el nombre de domesticación del producto. Esta nueva perspectiva de incluir en el proceso de manufactura al consumidor se denomina *social manufacturing* [6, 7] donde se rediseña la cadena de suministros desde una perspectiva de desarrollo social sostenible, incluyendo la innovación social debido a que los productos se encuentran conectados a las personas y éstas son parte de la toma de decisiones desde el concepto de distribución abierta colaborativa donde la experiencia del consumidor supone una nueva estrategia para transformar a éste en consumidor [8].

A lo largo de todas las etapas de la domesticación se mantiene el canal de comunicación de datos en tiempo real que puede influir en la toma de decisiones residuales (elementos que no se han contemplado en la fase adenómica pero que suponen mejoras en el producto). Así mismo, se genera información del producto que pasará a la CDMngP para integrarla en la domesticación de las sucesivas ge-

neraciones del producto (P&PLM sostenible en ciclo cerrado).

2.3. EVALUACIÓN CRITERIOS C2C: INDICADORES

De manera transversal, se lleva a cabo una evaluación referida a los 4 criterios de C2C. Dicho cálculos se lleva a cabo conforme a la Tabla 1.

3. ESTRUCTURA DE LA CDMNGP. MODELO DE PROCESAMIENTO DE DATOS

Como se ha señalado, la conectividad que aporta la Industria 4.0 permite la comunicación de todas etapas del modelo. La información generada por los procesos de cada etapa está soportada por la ISO 10303 (Standard for the Exchange of Product model data, STEP) como modelo de datos del producto.

Tras el análisis de la norma ISO 10303 y sus protocolos, y dado que existe un protocolo de aplicación, el AP239 que aporta una visión global del ciclo de vida, se propone que dentro de la categoría "entorno" se ubicará la información resultante de la evaluación de la sostenibilidad a través del ACV-C2C integrado conectado. En esta propuesta se incorporaran mediante etiquetas de contenido los tres impactos de cada dimensión dando como resultado el perfil sostenible global y el resultado del cálculo de los indicadores de cada criterio de C2C.

Junto con una base de datos de referencia de las fuentes externas a la CDMngP que proporciona información concreta del producto, se propone incorporar los contenidos de sostenibilidad a través de la AP239, constituyendo así una base sólida sobre la cual se puede construir la gestión de datos del ciclo de vida del producto, basada en la representación estandarizada de la información [9].

La Figura 4 muestra las diferentes capas de las que se compone la plataforma.

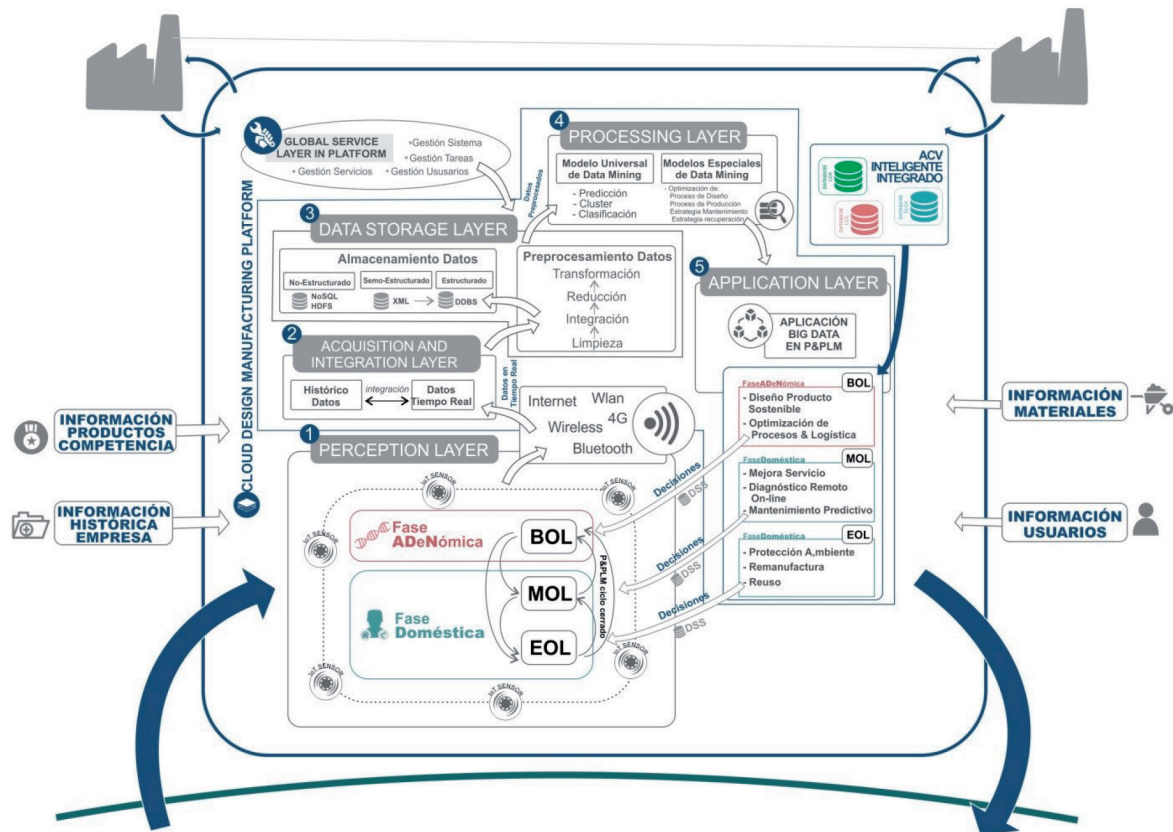


Figura 4: Estructura procesamiento de datos CDMngP para MDESA. Fuente: Elaboración propia

La plataforma se compone de 5 capas:

- 1. Perception Layer (Capa perceptiva):** Las etapas que forman parte de las dos fases del marco de trabajo (fase adenómica y fase doméstica) se encuentran sensorizadas, de forma que exista una transmisión constante de datos en tiempo real a través de diferentes tecnologías (Internet, WLAN, Wireless, 4G, Bluetooth,...) hacia la plataforma. Esto viene derivado por la diversidad de contextos en los que se sitúan las etapas (y por tanto, los sensores tienen asociada una tecnología adecuada al entorno y su transferencia de datos) así como en la diversidad del tipo de datos que se recogen.
- 2. Acquisition and integration layer (Capa de adquisición e integración):** Una vez adquiridos los datos, se hace necesario recibir los datos en tiempo real e integrarlos con los *No Real-time data*. Estos datos hacen referencia a las etapas de información que ya posee la base de datos histórica de la empresa que forma parte de cualquier ciclo de vida de producto: información de los productos análogos de la

competencia, información de materiales, información de los usuarios (experiencia, emociones, etc.) e información histórica de la cartera de productos.

En este grupo de datos se incluyen también las bases de datos estandarizadas de las que se sirve el ACV integrado. Estas bases de datos se utilizan en la evaluación de los efectos de los impactos y quedan incluidas en la capa 5 (Application Layer). Se hace necesario puntualizar que esta estructura de conectividad supone la propuesta de combinación de datos estandarizados con datos en tiempo real para caracterizar y calcular impactos a través de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida Integrado. Este nuevo escenario permite el desarrollo de modelos predictivos de los impactos.

- 3. Data storage layer (Capa de almacenamiento):** Antes de que los datos se almacenen en esta capa, deben ser sometidos a un proceso de preprocesamiento con esta secuencia de tareas: limpieza, integración, reducción y transformación. Una vez preprocesados, el almacenamiento en bases de datos puede tener diversas estructuras: no estructurados, con la propuesta

de bases de datos NoSQL o HDFS; semiestructurados (XML) o estructurados.

- 4. Processing layer (Capa de procesamiento):** Tras el almacenamiento, los datos se encuentran ordenados en bases de datos que se encargan de aportar la información que será procesada. Se proponen en esta capa dos tipos de data mining: universal models, así como los Special Models, que proponen la optimización de los procesos de diseño de los productos, de los procesos productivos y de las estrategias de mantenimiento y recuperación o remanufactura de materiales.
- 5. Application layer (Capa de aplicación):** La última capa se corresponde con la aplicación de los datos para la toma de decisiones en el P&PLM. Dependiendo de la fase en la que se sitúe, los resultados del procesamiento de datos sugieren decisiones asociadas a las entradas, salidas y procesos de cada etapa.

Existe una capa independiente, la Global Service Layer (Capa de servicio global), que se encuentra conectada a todas las anteriores ya que se encarga del manteni-



Figura 5: Articulación del marco de trabajo de la sostenibilidad conectada. Fuente: Elaboración Propia

miento del sistema, las tareas, los usuarios y el servicio. Es importante resaltar que esta plataforma posee una actualización de datos constantes así como acceso libre por parte de todos los stakeholders de la empresa y por las otras *smart factories* que se encuentren conectadas.

4. CONCLUSIONES

Gracias al potencial de la inclusión de la conectividad al producto que aporta la industria 4.0 y la aparición de los facilitadores digitales, es posible manejar la información ligada al contexto de uso del producto, lo que se traduce en una mejora en la calidad de evaluación de las causas y los efectos de los impactos generados desarrollado en el marco de trabajo en el que se basa esta propuesta metodológica. El modelo expuesto incluye la socialización del producto por la incorporación de técnicas y herramientas que, en la fase de domesticación, recuperan los aspectos

sociales del producto en las etapas referidas a la domesticación que serán devueltos a la fase adenómica contribuyendo al desarrollo de un producto inteligente conectado sostenible 4.0 (figura 5). Así mismo, el desarrollo de la CDMngP como soporte para la gestión de la información del producto así como para el intercambio de datos ofrece la posibilidad de una correcta manipulación de los datos. Esto supone un escenario que desarrolla la innovación abierta y mejora continua con la inclusión de las perspectivas top-down y bottom-up en la fabricación distribuida en ciclos cerrados. Por último, destacar la posibilidad que ofrece esta nueva propuesta donde se recuperan los datos en tiempo real de productos y procesos de fabricación posibilitando la creación de bases de datos de un escenario concreto que ofrezcan una mayor contextualización en la evaluación de la sostenibilidad. La línea de investigación futura del

presente trabajo es la aplicación del modelo a un caso de estudio para un producto inteligente conectado, concretamente se está desarrollando en la inclusión de sensores IoT en un electrodoméstico de forma que se pueda obtener información de consumo energético y de recursos en tiempo real para ofrecer una evaluación de la sostenibilidad proyectada sobre la etapa de uso y explotación así como en la etapa de eliminación.

PARA SABER MÁS

[1] Foster John Bellamy. Marx's Ecology: Materialism and Nature. 1a ed. Londres: Monthly Review Press, 2000. ISBN 9781583670125

[2] AENOR. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia. UNE-EN ISO 14040:2006. Madrid:AENOR, 2006.

[3] McDonough W, Braungart M. Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things. 1 ed. Estados Unidos: Random hous, 2002. ISBN 9780865475878.

[4] Adamson, G., Wang, L., HOLM, M. "Cloud manufacturing – a critical review of recent development and future trends". International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2015, pp. 1-34. ISSN 0951-192X. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2015.1031704>

[5] Fallan K. Design History: Understanding Theory and Method. 1a ed. Estados Unidos: Berg Publishers, 2010. ISBN 978-1847885371

[6] Jiang P, Leng J, Ding K. "Social manufacturing: A survey of the state-of-the-art and future challenges". En: 2016 IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics (SOLI) . 2016, p. 12-17. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/SOLI.2016.7551654>

[7] Leng J.W, Jiang P.Y, Zhang F.Q, Cao, W. "Framework and Key Enabling Technologies for Social Manufacturing". Applied Mechanics and Materials. 2013, vol. 312, pp. 498-501. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.312.498>

[8] Ritzer G, Jurgenson N. "Production, Consumption, Prosumption". Journal of Consumer Culture. 2010, vol. 10, p. 13-36. ISSN 1469-5405. DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/1469540509354673>

[9] ISO. ISO 10303-233:2012. Industrial automation systems and integration -- Product data representation and exchange -- Part 233: Application protocol: Systems engineering. 1o., 2012. ISO, International Organization for Standardization.

| ACRÓNIMOS |                                                              |
|-----------|--------------------------------------------------------------|
| 3E        | Triple Bottom Line                                           |
| ACV       | Análisis del Ciclo de Vida                                   |
| C2C       | De la Cuna a la Cuna (Cradle to Cradle)                      |
| CDMngP    | Cloud Desing Manufacturing Platform                          |
| CEC       | Contribución de energía de cada coproducto                   |
| CED       | Demanda Acumulada de Energía                                 |
| IoT       | Internet de las Cosas                                        |
| MDESA     | Modelo de Diseño y Evaluación Sostenible Adenómico           |
| MECO      | Clasificación de imitación a la naturaleza en ecosistema     |
| MFO       | Clasificación de imitación a la naturaleza por la morfología |
| MFRS      | Materiales del producto procedentes de fuentes recicladas    |
| MFU       | Clasificación de imitación a la naturaleza por función       |
| MTBR      | Materiales que serán reciclados o compostados                |
| P&PLM     | Gestión del Ciclo de Vida de Productos y Procesos            |
| RTP       | Toxicidad relativa de los materiales del producto            |
| TTM       | Peso Total de Toxicidad                                      |