

03-024

INDUSTRIAL AND URBAN METABOLISM APPLIED TO PROJECT OF SUSTAINABLE PRODUCTS DESIGN

Martin Gomez, Alejandro Manuel ¹; Aguayo Gonzalez, Francisco ¹; Marcos Barcena, Mariano ²; Córdoba Roldán, Antonio ¹; Lama Ruiz, Juan Ramon ¹

¹ Universidad de Sevilla, ² Universidad de Cádiz

Product Design to provide high efficiency and produce less impact on natural systems during their life cycle is not sufficient to meet the current demands of sustainability. Thus, project management of sustainable products design requires an approach that does not limit the use of the benefits of natural ecosystem. Industrial and urban metabolism is presented as a framework for the implementation of optimization strategies and efficiency in resource consumption, enabling the implementation of development strategies of industrial systems from a performance reactive to proactive and eco-compatible performance. An analysis of ecosystems and agents involved identifies the cycles of materials and substances and associated toxicity, in order to place its performance and optimization within the industrial metabolism. Modeled the current situation, the development of a model of industrial and urban metabolism under three fundamental principles of Cradle to Cradle paradigm is proposed. The main objective of the proposed model is closing the materials cycle within the industrial metabolism to improve cyclicity, efficiency and toxicity in urban and industrial ecosystem.

Keywords: *Industrial Metabolism; Sustainable Design Project; Sustainability; Eco-design*

METABOLISMO INDUSTRIAL Y URBANO APLICADO AL PROYECTO DE DISEÑO DE PRODUCTOS SOSTENIBLES

El diseño de productos orientados a proporcionar una alta eficiencia y producir un menor impacto en los sistemas naturales durante su ciclo de vida no es suficiente para atender las actuales exigencias de sostenibilidad. Así, la gestión de proyectos de diseño de productos sostenible requiere un enfoque que no limite el aprovechamiento de los beneficios del ecosistema natural. El metabolismo industrial y urbano se presenta como un marco adecuado para la implementación de estrategias de optimización y eficiencia en el consumo de recursos, posibilitando la implantación de estrategias de evolución de los sistemas industriales desde una actuación reactiva, a una actuación proactiva y ecocompatible. Un análisis de los ecosistemas y agentes intervinientes, permite identificar los ciclos de materiales y sustancias y toxicidad asociados, con el propósito de situar su actuación y optimización en el marco del metabolismo industrial. Modelada la situación actual, se propone el desarrollo de un modelo de metabolismo industrial y urbano, bajo los tres principios fundamentales del paradigma Cradle to Cradle. El principal objetivo del modelo propuesto es el cierre de ciclos de materiales en el metabolismo industrial para la mejora de la ciclicidad, eficiencia y toxicidad en el ecosistema urbano e industrial.

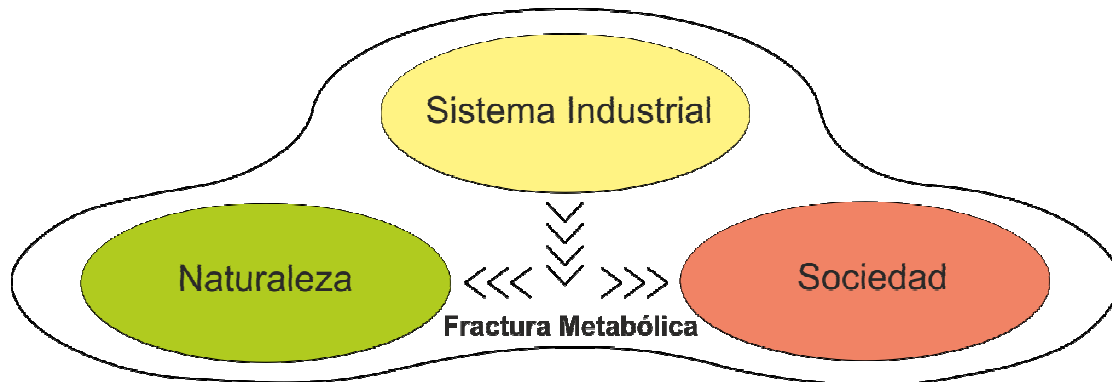
Palabras clave: *Metabolismo Industrial; Proyecto de Diseño Sostenible; Sostenibilidad; Ecodiseño*

Correspondencia: Alejandro Manuel Martín Gómez alejandrommartin@gmail.com

1. Introducción

Desde sus orígenes la sociedad humana ha estado integrada en los ecosistemas naturales, formando parte activa de los mismos e inmersa en sus propios ciclos biológicos. La llegada de la industrialización ha provocado una serie de circunstancias que han alterado de forma significativa la relación entre sociedad y naturaleza reflejada en la denominada fase eotécnica. Fase definida por Mumford (1982), en base a los cambios que el desarrollo tecnológico ha supuesto en la civilización occidental, como la primera de las tres fases sucesivas de sociedades (eotécnica, paleotécnica y neotécnica) en la relación socio-técnico-ambiental. Así la intensificación de los cultivos, la fabricación de materiales sintéticos, el uso indiscriminado de combustibles fósiles o la concentración de personas en determinadas áreas urbanas como consecuencia de la industrialización, han propiciado un desequilibrio en la armonía existente en el metabolismo socio-ambiental. Marx y Engels (1981) fueron los primeros que trataron el metabolismo desde una concepción social en 1883, considerando que el trabajo era la actividad a través de la que se regulaba el metabolismo entre la sociedad y la naturaleza. El concepto de metabolismo fue usado para describir los intercambios de materia y energía entre la naturaleza y la sociedad, sirviéndoles de apoyo para su crítica a la industrialización centrada en la explotación del trabajo asalariado (Foster, 2000). A través de este estudio de la interacción entre la naturaleza y la sociedad, Marx (Foster, 1999) desarrolla el conocido término de fractura metabólica en el ciclo de los nutrientes, poniendo de manifiesto que la industrialización ha interrumpido el metabolismo existente durante siglos entre sociedad y naturaleza. Esta fractura supone una brecha en la continuidad del metabolismo, tal y como establecen las leyes naturales de la vida.

Figura 1: Fractura Metabólica



La ecología industrial es una práctica de gestión ambiental encaminada a transformar el sistema industrial desde la analogía con un sistema natural (Graedel & Allenby, 2010). Este nuevo marco de trabajo persigue convertir el sistema industrial en un sistema sostenible, considerando que en los sistemas naturales no existen residuos puesto que los procesos de cada organismo realizan aportes necesarios al bienestar de todo el sistema. El citado marco plantea la gestión de entradas y salidas de un sistema con el objetivo de conseguir eliminar el concepto de residuo, haciendo que los desechos de unos procesos sean recursos de otros. La estructura lineal del sistema industrial tradicional es transformada en un ciclo cerrado de materia, impulsando las interacciones entre economía, ecología y sociedad e incrementando la eficiencia en las tres dimensiones de los procesos industriales.

La ecología industrial aparece entonces como un marco idóneo en el que desarrollar estrategias de optimización y eficiencia en el consumo de recursos. Se posibilita así la

evolución de los sistemas industriales desde una concepción reactiva, determinada por la incorporación de materiales recuperados a los procesos productivos, a una concepción proactiva, que desde la fase de diseño de los productos considere las rutas metabólicas asociadas a los materiales y sustancias, permitiendo la perfecta armonía entre el metabolismo natural e industrial.

2. Objetivos

La metodología de la investigación se basa en una primera revisión de las principales aproximaciones al diseño de productos sostenibles y de las dificultades existentes para la gestión de este tipo de proyectos.

En base a la revisión realizada se procede a desarrollar un modelo informacional basado en el metabolismo industrial, bajo los tres principios fundamentales del paradigma Cradle to Cradle (C2C): residuos igual a alimentos, utilizar la radiación solar incidente y celebrar la diversidad. Finalmente el modelo informacional es implementado mediante un Sistema Multiagente (SMA).

3. Diseño de Productos Sostenibles

El diseño de productos orientados a proporcionar una alta eficiencia y a producir un menor impacto en los sistemas naturales durante su ciclo de vida no es suficiente para atender las actuales exigencias. Así, en gran parte de las ocasiones el diseño de productos sostenibles se basa en cumplir los límites que determinan las instituciones gubernamentales. Esta perspectiva puede implicar un enfoque más ligado a una eficiencia técnica del diseño, limitando un aprovechamiento de los beneficios del sistema natural. Es por ello, que existen otras aproximaciones para el diseño del producto que abarcan en mayor o menor grado el concepto de metabolismo industrial con enfoque proactivo. Las más destacadas se encuentran recogidas en la Tabla 1.

Otro aspecto importante a considerar en el proyecto de diseño de productos sostenibles, es el concepto estratégico de la gestión del ciclo de vida del producto (PLM en sus siglas en inglés), que abarca el producto centrándose en la gestión de los procesos, las personas, y los datos con el apoyo de tecnología de la información (Gmelin & Seuring, 2014) a través de todo el ciclo de vida de un producto.

La colaboración dentro de las organizaciones permite sinergias entre los distintos participantes en el proyecto para el desarrollo del producto, influyendo por tanto en el comportamiento sostenible de éste. La investigación actual está orientada a una intensa comunicación a través de las empresas para lograr un adecuado nivel de desarrollo sostenible centrado en el nuevo producto. Sin embargo, las empresas no están colaborando con éxito, lo que suele estar basado en la falta de comunicación eficiente (Matsuda & Kimura, 2013) que garantice el diseño sostenible del nuevo producto.

Las recientes investigaciones en el ámbito de la ecología industrial en sus diferentes aproximaciones mediante el uso de SMA (Bichraoui, Guillaume & Halog, 2013) están posibilitando un mejor entendimiento y propiciando modelos de comportamiento individual y colectivo de las empresas desde un punto de vista más específico y de las interacciones entre los diferentes niveles organizacionales, en lo que se refiere a la perspectiva informacional de sostenibilidad. En la identificación de los elementos que forman los sistemas de fabricación, producción y servicio que configuran los ecosistemas urbanos e industriales, es posible adoptar distintas perspectivas en base a la organización, función, información y recursos. En este trabajo el modelo desarrollado se concibe, desde la perspectiva informacional, para la vertiente de sostenibilidad asociada a su metabolismo.

Tabla 1. Aproximaciones al Diseño de Productos Sostenibles

Término	Referencia	Objetivo
Eco Diseño	Lewis (2001); Deutz, McGuire y Neighbour (2013)	Diseñar productos con el medio ambiente en mente y asumir parte de la responsabilidad por las consecuencias medioambientales del producto en lo que respecta a las decisiones y acciones específicas ejecutadas durante el proceso de diseño.
Diseño Verde	Dangelico y Pontrandolfo (2010)	Implica una dirección de mejora en el diseño, es decir, la mejora continua orientada hacia los ideales generalizados de no hacer daño al medio ambiente.
Diseño Restaurativo	Kellert (2005)	Orientar las actividades del diseño a restaurar la capacidad de los sistemas naturales locales hacia un estado saludable de auto-organización.
Diseño de Reconciliación	Lyle (1999)	Considera a los humanos parte integral de la naturaleza, siendo ambos sistemas una misma cosa.
Diseño Regenerativo	Lyle (1999); Reed (2007)	Enfoque de diseño orientado a la teoría de sistemas, basado en la concepción de productos que llevan a cabo procesos con los cuales puedan “regenerarse”, es decir, restaurar, renovar y revitalizar los materiales de los que están compuestos y sus propias fuentes de energía.
Cradle to Cradle	Braungart, McDonough y Bollinger (2007)	Enfoque biomimético para el diseño de productos y sistemas. Modela la industria en base a los procesos de la naturaleza, viendo a los materiales como nutrientes que circulan en metabolismos sanos y seguros.

Se propone un SMA orientado a la gestión de la ciclicidad, eficiencia y ecotoxicidad de los ecosistemas industriales y urbanos. Es habitual que en este tipo de sistemas los agentes trabajen de forma conjunta para conseguir unos objetivos globales (Bichraoui, Guillaume & Halog, 2013) (Bajo & Borrajo, 2012), siendo necesaria la comunicación entre agentes, el intercambio de información y resultados, el establecimiento de directrices generales y particulares, la distribución de tareas, la cooperación, etc. En base a esto es preciso desarrollar mecanismos que permitan el establecimiento de la comunicación y estrategias cooperativas para la consecución de los objetivos de sostenibilidad, entre agentes en un mismo lenguaje o con la capacidad de traducir y comprender el lenguaje de otros agentes, bajo un marco de acción conjunta.

4. Modelo de Metabolismo Industrial

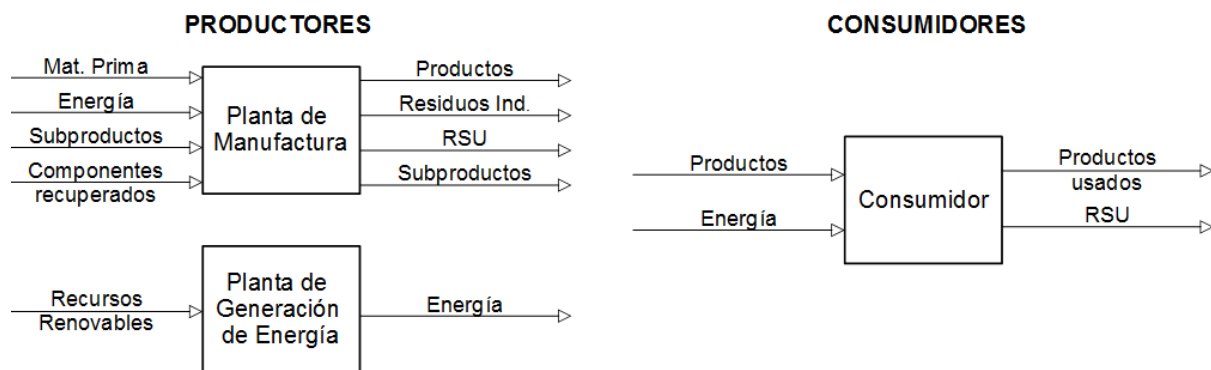
4.1 Conceptualización del Metabolismo

En el campo de la biología el metabolismo es entendido como el conjunto de reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en un ser vivo a nivel de célula u organismo. Sin embargo, este procesamiento de sustancias no tiene porqué tener lugar a nivel de célula exclusivamente. La definición de metabolismo puede ser ampliada más allá de los procesos

de anabolismo y catabolismo celular, incluyendo los flujos de materiales y energía que tienen lugar en los diferentes niveles funcionales de los sistemas vivos (Bermejo, 2005). Si bien la biología desarrolla el conocimiento del metabolismo a nivel de individuo, la ecología industrial ha propiciado expandir esta analogía hasta el nivel de ecosistema industrial. De modo que es posible estudiar el metabolismo del ecosistema industrial. Así, el metabolismo industrial es definido como el análisis del uso de materiales y energía por parte de la industria y de la forma en que estos materiales fluyen a través de los sistemas industriales para su transformación y posterior disposición como residuo (Ayres, 1994). Está dirigido a la comprensión de la circulación de los flujos de materiales, agua y energía (y stocks) vinculados a la actividad humana, desde su extracción inicial a su inevitable reintegración en los ciclos biogeoquímicos globales, o a los ciclos técnicos de la tecnosfera. Donde el intercambio de recursos entre diferentes industrias permite incrementar la estabilidad de las operaciones, especialmente en áreas con restricciones de suministro, asegurando el acceso a entradas críticas del proceso como agua, energía, etc. Es necesario desarrollar el conocimiento necesario para definir la estructura, funciones y mecanismo reguladores (Bermejo, 2005) del metabolismo a nivel industrial, identificando además como este metabolismo interactúa con el ecosistema natural.

Una diferencia importante entre el ecosistema industrial y el natural es el hecho de que la eficiencia es un proceso espontáneo en la naturaleza fruto de la evolución. Dicho de otro modo, para lograr la ecología industrial es necesario gestionar las relaciones entre las organizaciones participantes. Evidentemente esta gestión es diferente para los distintos tipos de aproximación a la ecología industrial.

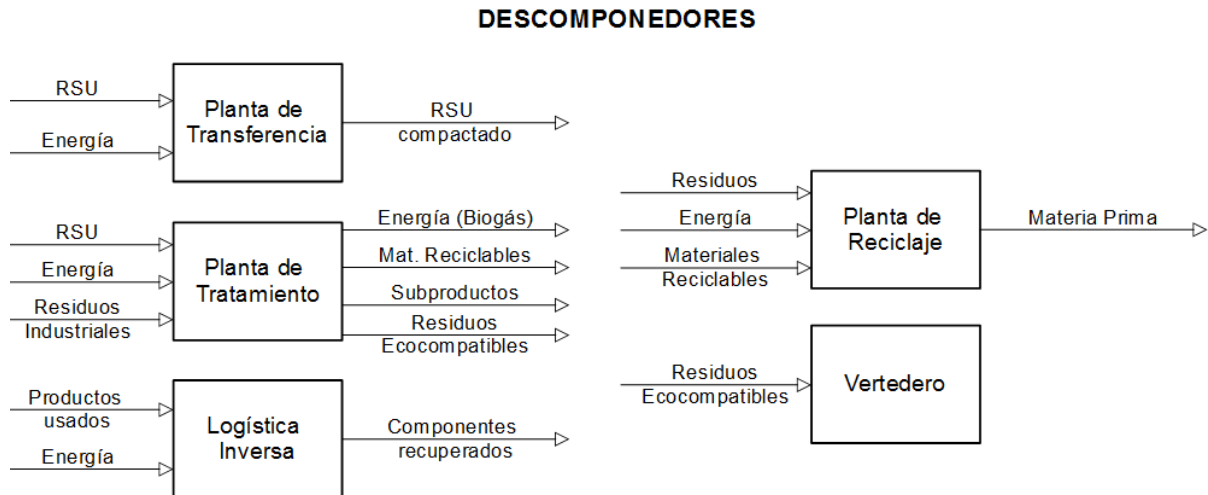
Figura 2: Agentes Productores y Consumidores



El modelo de metabolismo industrial distribuido presentado es desarrollado y concretado, identificando y categorizando para ello los diferentes agentes que intervienen, los flujos de materiales y energía, así como las relaciones que se establecen. La perspectiva de ecosistema biológico permite modelar el ecosistema industrial, en este caso, comprendido por productores, consumidores y descomponedores. Partiendo de la analogía establecida en este sentido por Liwarska-Bizukojc (2009), se incorpora y desarrolla en mayor grado cada uno de los agentes que intervienen en el metabolismo. En los ecosistemas naturales los productores son organismos que toman la energía generalmente a través la fotosíntesis, mientras que los consumidores son organismos que ingieren (consumen) otros organismos vivos. Los consumidores se dividen en base a su relación respecto a los productores. Los consumidores primarios son aquellos que se alimentan directamente de los productores; mientras que los consumidores secundarios y terciarios son carnívoros. Las bacterias y los hongos, denominados descomponedores, descomponen sustancias químicas en productos más simples, en última instancia, componentes inorgánicos. En la analogía, dentro de los productores se diferencia entre las plantas de manufactura, donde se incluyen las plantas de

procesado de materias primas, productos intermedios y productos finales, y las plantas de generación de energía a partir de recursos renovables. Los consumidores se nutren de los productos y generan Residuos Sólidos Urbanos (RSU) y productos usados que podrán ser recuperados mediante logística inversa, como se muestra en la figura 2.

Figura 3: Agentes Descomponedores



Finalmente los descomponedores se clasifican en base a la función que realizan en el metabolismo global, así aparecen las plantas de transferencia para la distribución de residuos, las plantas de tratamiento de residuos específicas, las plantas de logística inversa para la recuperación de componentes de productos usados, las plantas de reciclaje y los vertederos para la asimilación de residuos ecocompatibles de baja entropía, como se muestra en la figura 3.

4.2 Desarrollo del Modelo de Metabolismo Industrial basado en SMA

El modelo propuesto es desarrollado para desempeñar un trabajo cooperativo entre los diferentes agentes que componen el sistema, anteriormente definidos. Posibilitando la comunicación, el entendimiento y cooperación entre agentes, así como el intercambio de información, la búsqueda de soluciones locales y globales y la toma de decisiones. Para dar soporte a este sistema se define un modelo informacional que propicie el entendimiento entre los distintos agentes a la vez que propicie el desarrollo de cada una de las capacidades individuales que poseen.

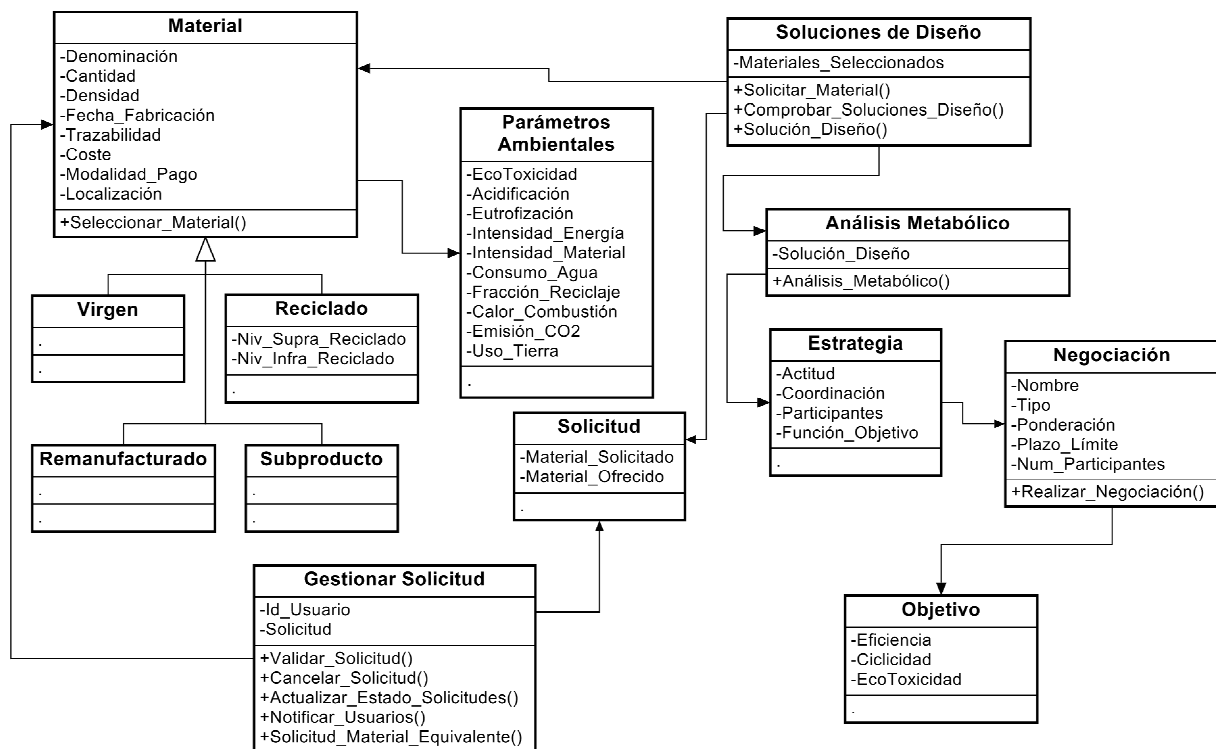
Si bien un modelo de conocimiento puede ser representado en UML, RDF, DAML+OIL, OWL o cualquier otra representación que pueda definir objetos, propiedades y relaciones. En este caso el conocimiento ha sido modelado mediante diagramas de clase UML por ser ampliamente utilizado.

Cada agente posee conocimiento compartido de los atributos que poseen los materiales (entendiéndose como material la materia prima, productos, material reciclado, productos remanufacturados y subproductos) que son objeto de intercambio entre empresas o procesos productivos, y de los parámetros ambientales asociados que permiten la toma de decisiones.

El conocimiento relativo a la gestión de solicitudes de materiales, incluyendo tanto las solicitudes de ofrecimiento como de adquisición, está especificado en la clase *Gestionar Solicitud*, donde se establecen además los procedimientos necesarios para la búsqueda de materiales equivalentes a los solicitados.

El conocimiento específico para gestionar las soluciones de diseño en base a los materiales seleccionados está especificado en la clase *Soluciones de Diseño*, donde se incorporan además los procedimientos precisos para realizar análisis metabólicos conforme a los atributos de los materiales. El análisis metabólico a su vez está asociado al conocimiento estratégico para las negociaciones entre agentes. El concepto de estrategia incluye la actitud del participante, la existencia o no de coordinación con otros agentes en una estrategia común, el número de participantes y la función objetivo que persigue cumplir la estrategia establecida. La estrategia tiene asociada una negociación que establece entre otros un objetivo a alcanzar. El concepto objetivo persigue la mejora de la ciclicidad, toxicidad y eficiencia de los materiales utilizados. Los diagramas de clase UML son los mostrados en la figura 4.

Figura 4: Diagrama de Clases UML del Modelo para la Gestión del Metabolismo Industrial

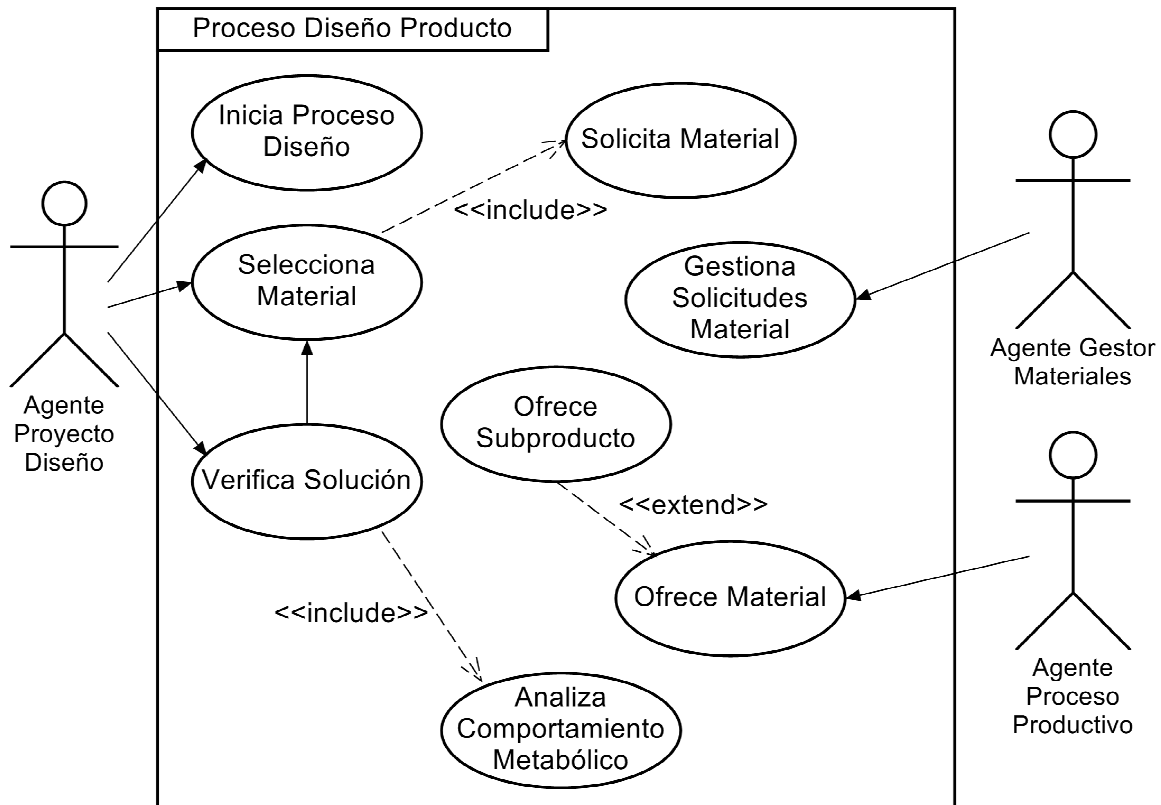


La figura 5 presenta un caso de uso genérico para la gestión proyectual del proceso de diseño de productos. La descripción de los agentes intervinientes en el caso de uso presentado es la siguiente:

- El Agente de Proyecto Diseño inicia el proceso de diseño y selecciona los materiales que incorporará al producto objeto del diseño, enviando la solicitud de material al Agente Gestor Materiales.
- El Agente Proceso Productivo identifica el material saliente de su proceso, en forma de subproducto que puede ser utilizado, ofreciéndolo al resto de agentes para que lo incorporen a su proceso productivo.
- El Agente Gestor Materiales analiza su base de datos en busca materiales equivalentes a los solicitados al objeto de evitar la utilización exclusiva de materias primas vírgenes, intentando reemplazarlo por un producto reciclado, remanufacturado o subproducto equivalente. Confirmada la existencia de dichos materiales equivalentes (o no) el Agente Gestor Materiales informa de las características de cada material (atributos de la clase material con sus correspondientes parámetros) al Agente Proyecto Diseño, permitiendo

que este último realice el análisis metabólico y la toma de decisiones oportuna. Validándose finalmente la solución de diseño.

Figura 5: Caso de Uso UML del proceso de diseño de producto



5. Conclusiones

El presente trabajo propone el desarrollo de un modelo informacional de la sostenibilidad para la gestión de proyectos de diseño de productos sostenible a través del metabolismo industrial inteligente. El análisis y modelado de los agentes intervinientes en el ecosistema industrial facilita la identificación, análisis y cierre de ciclo de materiales y sustancias, proporcionando así una mejora en la ciclicidad, eficiencia y toxicidad en el ecosistema urbano e industrial. La concepción de un modelo de gestión que dé soporte a proyectos de diseño de productos sostenible proporciona ventajas significativas frente a los actuales sistemas de gestión que carecen de una visión global. El uso integrado de un SMA permite disminuir los tiempos en la gestión de los flujos de información y asegurar el anonimato de las organizaciones envueltas en los procesos de intercambio de materiales, garantizando además la confidencialidad de las principales características inherentes a sus procesos productivos.

Referencias

- Ayres, R. (1994). *Industrial Metabolism: Theory and Practice. The Greening of Industrial Ecosystems*, Washington DC, USA: National Academy of Engineering.
- Bajo J., & Borrajo, M. (2012). A multi-agent system for web-based risk management in small and medium business. *Expert Systems with Applications*, 39, 6921-6931.

- Bermejo, R. (2005). La gran transición hacia la sostenibilidad: principios y estrategias de economía sostenible. Los Libros de la Catarata, Madrid.
- Bichraoui, N., Guillaume, B. & Halog, A. (2013). "Agent-Based modelling simulation for the development of an industrial symbiosis -Preliminary results". *Procedia Environmental Sciences*. 17, 195-204.
- Braungart, M., McDonough, W. & Bollinger, A. (2007). Cradle-to-cradle design: creating healthy emissions e a strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production*. 15 (13-14), 1337-1348.
- Dangelico, R. & Pontrandolfo, P. (2010). From green product definitions and classifications to the Green Option Matrix. *Journal of Cleaner Production*. 18 (16-17), 1608-1628.
- Deutz, P., McGuire, M. & Neighbour, G. (2013). Eco-design practice in the context of a structured design process: an interdisciplinary empirical study of UK manufacturers. *Journal of Cleaner Production*. 39, 117-128.
- Foster, J. (2000) Marx's Ecology. Materialism and Nature. New York: Monthly Review Press.
- Foster, J. (1999) "Marx's theory of metabolic rift: Classical foundations for environmental sociology". *American Journal of Sociology*. 105(2), 366-405.
- Gmelin, H. & Seuring, S. (2014). Determinants of a sustainable new product development. *Journal of Cleaner Production*. 69, 1-9.
- Graedel, T. & Allenby B. (2010) Industrial Ecology and Sustainable Engineering. USA: Pearson.
- Kellert, S. (2005). Building for Life. Designing and Understanding the Human-Nature Connection. Island Press, Covelo, CA, USA.
- Lewis, H., Gertsakis, J., Grant, T., Morelli & N., Sweatman, A. (2001). Design for Environment: a Global Guide to Designing Greener Goods. Greenleaf, Sheffield.
- Liwarska-Bizukojc, E. (2009). The conceptual model of an eco-industrial park based upon ecological relationships. *Journal of Cleaner Production*. 17(8), 732-741.
- Lyle, J. (1999). Regenerative Design for Sustainable Development. Wiley, New York.
- Marx K. (1981). Capital. Vol. III. Penguin Books, London.
- Matsuda M., & Kimura F. (2013). Digital Eco-factory as an IT Support Tool for Sustainable Manufacturing. *Advances in Information and Communication Technology*.
- Mert, B., Aradag, U., Uludag, S., & Ozgur, H. (2013). *An Architecture for a Microgrid-based Eco Industrial Park using a Multi-Agent System*. 4th International Congerence on Power Engeeneering, Energy and Electrical Drives, 1658-1664.
- Mumford L. (1982). Técnica y civilización. Madrid, Alianza Editorial.
- Reed, B. (2007). "Shifting from 'sustainability' to regeneration". *Building Research & Information*. 5(6), 674-680.

