

LA INGENIERÍA DE PROYECTOS

¿Cómo se forja la tecnosfera de una sociedad responsable?

*F. Aguayo
M.J. Ávila
A. Córdoba
A. De las Heras
J.R. Lama
A. Luque*

LA INGENIERÍA DE PROYECTOS

**¿Cómo se forja la tecnosfera de
una sociedad responsable?**

F. Aguayo

M.J. Ávila

A. Córdoba

A. De las Heras

J.R. Lama

A. Luque



Editorial Área de Innovación y Desarrollo,S.L.

Quedan todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida, distribuida, comunicada públicamente o utilizada, total o parcialmente, sin previa autorización.

© del texto: **los autores**

ÁREA DE INNOVACIÓN Y DESARROLLO, S.L.

C/ Els Alzamora, 17- 03802- ALCOY (ALICANTE) info@3ciencias.com

Primera edición: **noviembre 2018**

ISBN: **978-84-949306-8-3**

DOI: <http://dx.doi.org/10.17993/IngyTec.2018.47>

ÍNDICE

LA INGENIERÍA DE PROYECTOS. ¿CÓMO SE FORJA LA TECNOSFERA DE UNA SOCIEDAD RESPONSABLE?.....	9
TECNOSFERA SOSTENIBLE DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS MODELOS DE FABRICACIÓN.....	11
1. Introducción.....	11
2. Paradigmas y marcos de trabajo para el desarrollo de una tecnosfera Sostenible	12
2.1. <i>Fabricación limpia o producción limpia</i>	16
2.2. <i>Fabricación Verde</i>	18
2.3. <i>Fabricación Sostenible</i>	19
2.4. <i>Fabricación Lean Medioambiental</i>	21
2.5. <i>Remanufactura y cadena de suministro en lazo cerrado</i>	22
2.6. <i>Fabricación conservadora de recursos</i>	25
3. Conclusiones.....	26
4. Referencias bibliográficas	26
ARQUITECTURA ECO-HOLONICA PARA MODELAR LA TECNOSFERA DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS MODELOS BIOINSPIRADOS.....	39
1. Introducción.....	39
2. Enfoques bioinspirados	40
2.1. <i>Ecología industrial</i>	41
2.2. <i>Manufactura en ciclo cerrado o cradle to cradle (c2c)</i>	47
2.3. <i>Modelo de apropiación por producción o fabricación</i>	50
2.4. <i>Teoría de los sistemas vivientes</i>	51
3. Propuesta de arquitectura abierta eco-holónica	53
3.1. <i>Eco-holon</i>	53
4. Conclusiones.....	58
5. Referencias bibliográficas	58
LA FRACTURA METABÓLICA Y ECONOMÍA CIRCULAR EN EL DISEÑO, DESARROLLO Y FABRICACIÓN DE PRODUCTOS	65
1. Introducción.....	65
2. Sostenibilidad	66
3. Paradigmas de la sostenibilidad	69
3.1. <i>Ecología industrial</i>	70
3.2. <i>Capitalismo Natural</i>	70
3.3. <i>Permacultura</i>	71
3.4. <i>Natural Step</i>	73
3.5. <i>Economía circular</i>	74
4. Conclusiones.....	77
5. Referencias bibliográficas	78
EL PROYECTO COMO METODOLOGÍA INSTRUCCIONAL DESDE LA TEORÍA DE VYGOTSKY PARA EL PENSAMIENTO AFECTIVO COMPLEJO.....	85
1. Introducción.....	85
1.1. <i>Trabajo por proyectos</i>	85
1.2. <i>Principios metodológicos</i>	86
2. Metodología. Método de proyectos	86

2.1. Ciclo de vida del método de proyectos.....	88
2.2. Competencias	89
3. Propuesta de modelos de diseño instruccional	90
3.1. Constructivismo	91
3.2. Piaget.....	92
3.3. Vygotsky	92
3.4. Conflicto cognitivo	94
4. Discusión. El pensamiento complejo	94
5. Conclusiones.....	99
6. Referencias bibliográficas	100

ÍNDICE DE FIGURAS

TECNOSFERA SOSTENIBLE DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS MODELOS DE FABRICACIÓN

Figura 1. Integración de la Tecnosfera con la Naturesfera desde la Noosfera	13
Figura 2. Proceso de desarrollo de los sistemas técnicos avanzados.....	15
Figura 3. Publicaciones de Paradigmas de Fabricación Avanzada estudiados	16
Figura 4. Proceso de evolución de la producción limpia a través del triángulo de conocimiento: contexto, tecnología y reconciliación.....	17
Figura 5. Sistema triangular de Fabricación verde.....	19
Figura 6. Elementos clave de los sistemas técnicos sostenibles	20
Figura 7. Sistema de fabricación en ciclo cerrado con enfoque sobre su final de vida para ayudar a mantener el flujo cíclico de materiales	22
Figura 8. Proceso diseño para la Remanufactura (DfRem).....	23
Figura 9. Flujo de materiales en diferentes cadenas de suministro	24
Figura 10. Fabricación conservadora de recursos	25

ARQUITECTURA ECO-HOLONICA PARA MODELAR LA TECNOSFERA DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS MODELOS BIOINSPIRADOS

Figura 1. Publicaciones de Paradigmas de fabricación Bio-inspirados.....	41
Figura 2. Comparación de los ciclos de flujo de materiales entre un ecosistema natural y un Ecosistema industrial.....	42
Figura 3. Cadena trófica del sistema técnico	45
Figura 4. Ecosistema (izquierda), relaciones (centro) y representación matricial(derecha)	46
Figura 5. Metabolismo industrial sobre la biosfera y la tecnosfera.....	48
Figura 6. Planteamiento del paradigma de diseño y fabricación bajo C2C.....	49
Figura 7. Nutrientes y metabolismos asociados al marco de Diseño y Fabricación C2C	49
Figura 8. Proceso general del metabolismo (de materia y energía) entre sociedad y naturaleza	50
Figura 9. Símbolos para los subsistemas de la Teoría de los Sistemas Vivientes (Miller, 1978) ...	53
Figura 10. Arquitectura básica Eco-holónica para la fabricación localizada y distribuida sostenible.....	54

Figura 11. Concepción Eco-holónica de un sistema de fabricación para la Excelencia en Sostenibilidad.....	56
--	----

LA FRACTURA METABÓLICA Y ECONOMÍA CIRCULAR EN EL DISEÑO, DESARROLLO Y FABRICACIÓN DE PRODUCTOS

Figura 1. Fractura metabólica	65
Figura 2. Evolución de la fractura metabólica hacia la Triple Bottom Line.....	67
Figura 3. Triple Bottom Line. Estructura Fractal.....	68
Figura 4. Capitalismo natural	71
Figura 5. Principios de la Permacultura	73
Figura 6. Evolución histórica de la Economía Circular	75

EL PROYECTO COMO METODOLOGÍA INSTRUCCIONAL DESDE LA TEORÍA DE VYGOTSKY PARA EL PENSAMIENTO AFECTIVO COMPLEJO

Figura 1. Ciclo de vida del método de proyectos.....	87
Figura 2. Fases del Método de pro.....	88
Figura 3. Competencias a desarrollar.....	90
Figura 4. Zonas de desarrollo según Vygotsky	93
Figura 5. Teoría de la zona de desarrollo próximo de Vygotsky	94
Figura 6. Generadores de complejidad en el proyecto	98

ÍNDICE DE TABLAS

TECNOSFERA SOSTENIBLE DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS MODELOS DE FABRICACIÓN

Tabla 1. Principios y problemas.....	13
---	----

ARQUITECTURA ECO-HOLONICA PARA MODELAR LA TECNOSFERA DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS MODELOS BIOINSPIRADOS

Tabla 1. Puntos centrales de la analogía.....	43
Tabla 2. Los veinte subsistemas críticos de la Teoría de los Sistemas Vivientes de Miller (Miller, 1978)	52

0

LA INGENIERÍA DE PROYECTOS. ¿CÓMO SE FORJA LA TECNÓSFERA DE UNA SOCIEDAD RESPONSABLE?

Amalia Luque Sendra

Este libro es el producto de un conjunto de conferencias realizadas durante el año 2018 en la Escuela Politécnica Superior, como actividad de divulgación de la investigación. En estas actividades de difusión se recogen contribuciones del grupo de investigación sobre ingeniería y dirección de proyectos, sostenibilidad y diseño industrial de productos.

Todas las conferencias han sido impartidas por los autores, abarcando temas de ingeniería y dirección de proyectos desde las ciencias de la complejidad; el proyecto y su gestión desde la ingeniería y la dinámica de sistemas; la fractura metabólica, la economía circular, el proyecto autopoyético; la articulación dialéctica del conocimiento científico, técnico y social en la ingeniería y la gestión de proyectos; la perspectiva de ciencia, tecnología y sociedad; las tecnologías de creación proyectual desde las herramientas euclidianas hasta el open BIM e Industria 4.0.; el proyecto como metodología instruccional desde la teoría de Vygotsky para el pensamiento afectivo complejo.

El papel de la ingeniería de proyectos a menudo se entiende como enlace entre la dirección del proyecto y las disciplinas técnicas involucradas en el mismo. Por ello se deben tener los conocimientos suficientes de las diversas disciplinas, siendo habitual también que sea el principal punto de contacto técnico para el consumidor.

En la actualidad la industria está inmersa en un proceso de cambio, llamado cuarta revolución industrial o Industria 4.0, caracterizado por la producción digital, inteligente, en red y en gran parte auto-gestionable; lograda a través de la unión de técnicas de producción, tecnologías de la información (TI) e Internet.

Esta nueva fase de industrialización y automatización puede entenderse como una gran oportunidad para nuevas oportunidades, a la vez que existen desafíos considerables.

Con estas condiciones de contorno, a lo largo del presente libro se exploran distintas aproximaciones a los sistemas técnicos sostenibles, la importancia de la inclusión del concepto de sostenibilidad y economía circular en la industria y del desarrollo de marcos teóricos que tengan en cuenta la complejidad de la realidad.

La ingeniería de proyectos ¿Cómo se forja la tecnosfera de una sociedad responsable?

I

TECNOSFERA SOSTENIBLE DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS MODELOS DE FABRICACIÓN

María Jesús Ávila Gutiérrez y Francisco Aguayo González

1. Introducción

La aparición de los sistemas técnicos (sistemas de fabricación) ha supuesto un desequilibrio en la situación que había inicialmente entre el hombre y la naturaleza. Este desequilibrio se conoce como Fractura Metabólica (Clark, Foster, De, & Roig, 2009; Foster, 1999) o ruptura de la conexión natural entre los flujos de materia y energía que inicialmente había entre la sociedad y el medio natural y que se desarrollará en capítulos posteriores. Esto ha motivado la investigación sobre sistemas técnicos tratando de mitigar esa separación desde los puntos de vista de la sostenibilidad (Gunasekaran & Spalanzani, 2012; Tan & Zailani, 2009), al ser concebido como analogía los sistemas naturales (Benyus, 1997; Bonabeau, Dorigo, & Theraulaz, 1999; Ferreira, 2013) e incorporar las más modernas tecnologías de la información o tecnologías facilitadoras (Bauer *et al.*, 2015; Deloitte, 2015; Lasi, Fettke, Kemper, Feld, & Hoffmann, 2014) que permite obtener sistemas técnicos inteligentes, conectados y sostenibles.

El objetivo que pretenden las investigaciones para lograr una tecnosfera responsable es conseguir sistemas de fabricación integrados en la sostenibilidad formando la ecoesfera como un todo integrado sin solución de continuidad entre la naturasfera y la tecnosfera.

Desde la teoría de los sistemas complejos adaptativos (CAS) (Holland, 1992, 2006; Levin, 1998; Miller & Page, 2007) se establece que ningún sistema puede sobrevivir, si no funciona como el sistema que lo alberga. Por otra parte la economía humana es un subsistema de la economía general de los materiales y la energía de la naturaleza, por lo que debe imitar a la de la naturaleza para obtener sistemas técnicos integrados en el medio natural y social.

Para este desarrollo, es necesario que la tecnosfera (sistema de fabricación) tenga compatibilidad metabólica (anabolismo y catabolismo), desde la teoría de la variedad de Ashby (Asaro, 2008; W. Ashby, 1958; W. R. Ashby, 1960) en la que solo la variedad puede absorber variedad. Esta situación posibilita la compatibilidad entre la naturasfera y la tecnosfera y su evolución en las dimensiones de la sostenibilidad al establecer que la variedad de la tecnosfera es igual o superior que el de la naturasfera.

La situación precedente, justifica que para conseguir una tecnosfera integrada con la naturalesfera, se investigue en la concepción de sistemas técnicos sostenibles y el establecimiento de métricas e indicadores para su evaluación basadas en los ecosistemas naturales (Krajnc & Glavič, 2005; Mebratu, 1998) con el objeto de formar sistemas técnicos de dimensión espacial y temporal sostenibles con la naturalesfera.

2. Paradigmas y marcos de trabajo para el desarrollo de una tecnosfera Sostenible

EL objetivo es la integración de la naturalesfera con la tecnosfera en su dimensión material e inmaterial o Noosfera (conocimiento individual o colectivo), como se recoge en la Figura 1, dando lugar a una ecoesfera integrada armónica y resiliente.

Existe una gran cantidad de investigaciones que han tratado de naturificar parcialmente los sistemas técnicos con enfoques bio-inspirados con objeto de desarrollar e implementar los sistemas técnicos en los sistemas naturales. Derivado de estos trabajos de investigación, aparecen publicaciones enfocadas a la problemática que subyace en los sistemas técnicos en los distintos niveles como: en la cadena de suministro y organizaciones virtuales (Caldeira, Azevedo, Silva, & Sousa, 2007), algoritmos basados en el comportamiento con objeto de optimizar los tiempos de mecanizado (Corry & Kozan, 2004), sistemas de coordinación y control de fabricación adaptable (Hadeli, Valckenaers, Kollingbaum, & Van Brussel, 2004) o el uso de algoritmos basado en las abejas para optimización de células de fabricación (Pham, Afify, & Koç, 2007), asignación óptima de tareas (V. A. Cicirello & Smith, 1991) y enrutamiento y programación de plantas de fabricación (V. Cicirello & Smith, 2001).

Además de todos estos trabajos con inspiraciones en sistemas naturales, que principalmente se centran en resolver problemas de los sistemas técnicos a nivel micro (Ferreira, 2013) podemos encontrar paradigmas más generales que pueden tener su proyección en los futuros sistemas técnicos avanzados, inteligentes y naturales.

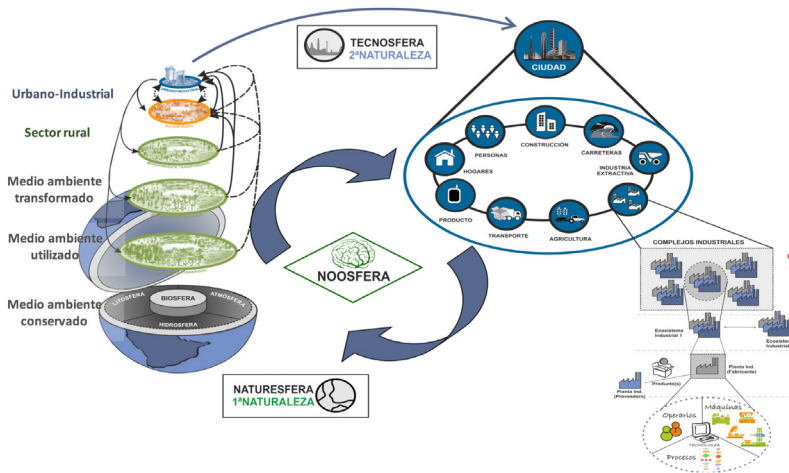


Figura 1. Integración de la Tecnosfera con la Naturesfera desde la Noosfera.

Fuente: elaboración propia.

El objetivo expuesto en los párrafos precedentes puede llevarse a cabo desde distintas estrategias que tienen como marco común remediar la situación en la que se encuentra la tecnosfera en los momentos actuales. En el presente capítulo se realiza el análisis de la cuestión sostenibilidad/desarrollo sostenible desde el que se han ido concibiendo los sistemas técnicos quedando articulado en base a las cuatro premisas que pueden verse reflejadas en la tabla 1 (Riechmann, 2005).

Tabla 1. Principios y problemas.

Problemas	Principios
PROBLEMA DE ESCALA: hemos “llenado” la ecosfera	PRINCIPIO DE GESTIÓN GENERALIZADA DE LA DEMANDA
PROBLEMA DE DISEÑO: nuestra tecnosfera está mal diseñada	PRINCIPIO DE BIOMIMESIS
PROBLEMA DE EFICIENCIA: somos ineficientes en el uso de materia y energía	PRINCIPIO DE ECOEFICIENCIA
PROBLEMA FAUSTICO: nuestra tecnología se encuentra demasiado descontrolada	PRINCIPIO DE PRECAUCIÓN

Fuente: elaboración propia.

En consonancia con las perspectiva genéricas del apartado anterior, algunas de las propuestas que se establecen y orientan mejor a la concepción de los sistema técnicos son (Aguayo González, Peralta Álvarez, Lama Ruiz, & Soltero Sánchez, 2011):

- a) Propuestas provenientes del ámbito de fabricación avanzada (Aguayo, Marcos, Sánchez, & Lama, 2007): Entre estas se encuentran aquellas que conciben

los sistemas técnicos bajo principios tecnológicos integrados con criterios de eficiencia económica, ambiental o social (sostenibilidad) (Despeisse, Mbaye, Ball, & Levers, 2012a; Giret & Trentesaux, 2016; Hartini & Ciptomulyono, 2015; Jayal, Badurdeen, Dillon, & Jawahir, 2010; Ocampo & Clark, 2015; Stock & Seliger, 2016; Westkämper, 2008). Entre estos enfoques cabe destacar como hemos mencionado anteriormente, la fabricación verde (Green Manufacturing) (Dangelico, Pujari, & Pontrandolfo, 2017; David Alan Dornfeld, 2014; Govindan, Diabat, & Madan Shankar, 2015; Sahajwalla, Pahlevani, Maroufi, & Rajarao, 2016; Zhang & Xie, 2017), fabricación Lean sostenible (Lean Sustainable Manufacturing) (Dües, Tan, & Lim, 2013; Holweg, 2007) y fabricación limpia (Clean Manufacturing) (Almeida, Agostinho, Huisingh, & Giannetti, 2017; de Guimarães, Severo, & Vieira, 2017; de Oliveira *et al.*, 2017; Hilson, 2003; Kjaerheim, 2005; Mantovani, Tarola, & Vergari, 2017; Oliveira Neto, Leite, Shibao, & Lucato, 2017) entre otras, que pasaremos a exponer en los siguientes apartados.

- b) Propuestas provenientes del ámbito de la fabricación bio-inspirada. En este enfoque se considera a la naturaleza como modelo, medida y mentora (Benyus, 1997).
- Naturaleza como *Modelo* para la implementación de la tecnosfera y la noosfera. En este caso se estudia la naturaleza, sus elementos, modelos y sistemas para imitarlos o inspirarse en sus diseños y procesos con el fin de resolver problemas técnicos de manera sostenible.
 - Naturaleza como *Medida* (Peters, 2011). Son comportamientos estándar encontrados en la naturaleza. Pueden servir como punto de referencia a la hora de comparar los procesos generados artificialmente por el hombre posibilitando la obtención de una idea de calidad o excelencia del mismo. Lo que en la naturaleza funciona apropiadamente funciona a su vez como referencia.
 - Naturaleza como *Mentora*. Observa a la naturaleza como fuente de roles, protegiendo la biodiversidad y conservando recursos para el futuro. Es la manera sinérgica de alcanzar el objetivo del biomimetismo o desarrollo sostenible utilizando a la naturaleza como guía.

En el ámbito industrial podemos encontrar una concreción de los presupuestos anteriores (Loayza Perez & Silva Meza, 2014). Para ello procederemos a estudiar distintos modelos de fabricación y paradigmas orientados a la naturificación de los sistemas técnicos. El concepto de naturificar los sistemas técnicos trata de establecer la continuidad entre los sistemas técnicos y naturales de manera que se conciban

desde el primer momento como sistemas naturales y obtener una ecoesfera sin solución de continuidad.

Entre los modelos y paradigmas más significativos podemos encontrar los mostrados en la Figura 2, que trataremos en el apartado siguiente haciendo una especial mención a aquellos enfoques o paradigmas que han sido menos estudiados desde el punto de vista de los sistemas técnicos, con objeto de ver si representan una oportunidad para la concepción de los sistemas técnicos desde el punto de vista natural.

Según Tao *et al.* (Tao, Cheng, Zhang, & Nee, 2017), el desarrollo de los sistemas técnicos avanzados desde sus inicios hasta la actualidad es el que se representa de forma esquemática en la Figura 2, donde se muestra la evolución de las tecnologías de fabricación en las últimas décadas comenzando por la producción artesanal y continuando con la producción en masa y la personalización en sus distintas fases hasta la actualidad.

Existen diversos autores que han estudiado cada uno de estos modelos y paradigmas. Entre los más destacadas podemos encontrar el estudio realizado por Nambiar (Nambiar, 2010) que presenta una comparación de los sistemas técnicos modernos, por otro lado, Zhuming *et al.* (Bi, 2011) que estudia los diferentes paradigmas de fabricación desde el punto de vista de la sostenibilidad o Mourtzis and Doukas (Mourtzis & Doukas, 2014) que establecen una amplia revisión de los sistemas técnicos desde la artesanía hasta la era de la personalización.

En nuestro caso realizaremos el estudio de los paradigmas más apropiados para la naturificación de los sistemas técnicos partiendo de la base de los sistemas técnicos mostrados en la Figura 2.

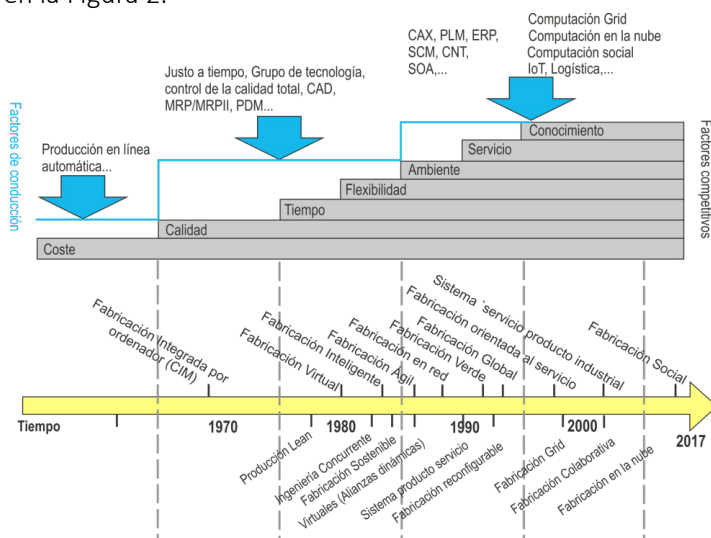


Figura 2. Proceso de desarrollo de los sistemas técnicos avanzados.

Fuente: elaboración propia. Adaptado de (Tao et al., 2017).

Los paradigmas que expondremos así como las publicaciones que sobre los mismos se han llevado a cabo se muestran en la Figura 3 y son: (1) Fabricación o producción Limpia (CP), (2) Fabricación Verde, (3) Fabricación Sostenible, (4) Fabricación Lean Sostenible, (5) Fabricación Conservadora de recursos y (6) Remanufactura y Cadena de suministro en ciclo cerrado.

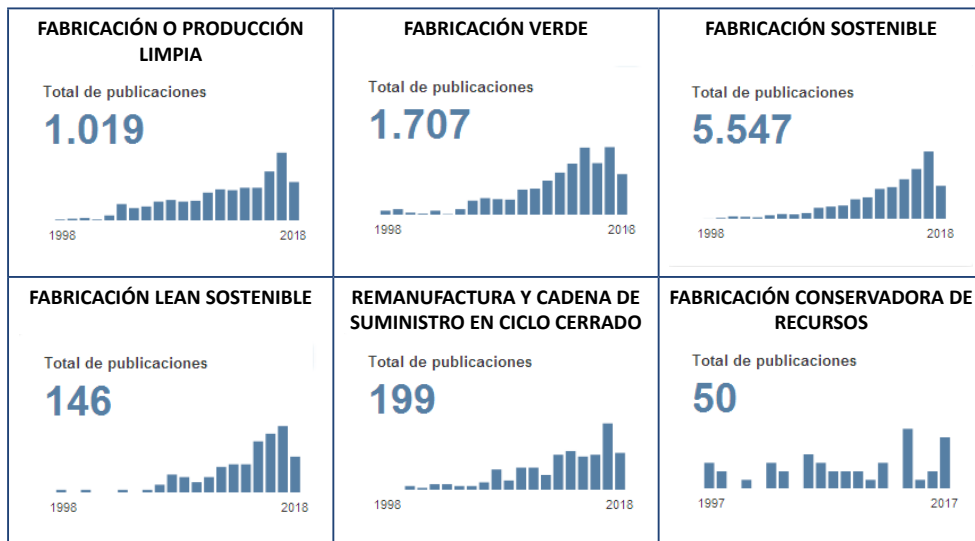


Figura 3. Publicaciones de Paradigmas de Fabricación Avanzada estudiados.

Fuente: elaboración propia.

2.1. Fabricación limpia o producción limpia

La **Producción Limpia (CP)** es la aplicación continua de una estrategia ambiental, preventiva e integrada, a los procesos productivos, a los productos y a los servicios para incrementar la eficiencia y reducir riesgos para los seres humanos y el ambiente. La Producción Limpia puede ser aplicada a los procesos empleados en cualquier industria, a los productos mismos y a los diferentes servicios prestados a la sociedad (Berkel, Willems, & Lafleur, 1997).

La Producción Limpia en los procesos productivos (Böhringer, Moslener, Oberndorfer, & Ziegler, 2012; Dunn & Bush, 2001; Pezzullo & Sandler, 2007; Shadbegian & Gray, 2005) conduce al ahorro de materias primas, agua y/o energía; a la eliminación de materias primas tóxicas y peligrosas; y a la reducción, en la fuente, de la cantidad y toxicidad de todas las emisiones y los desechos, durante el proceso de producción.

En los productos (Heijungs, 1994; Maxwell & der Vorst, 2003), la Producción Limpia busca reducir los impactos negativos de los productos sobre el ambiente, la salud y la seguridad, durante todo su ciclo de vida, desde la extracción de las materias primas, pasando por la transformación y uso, hasta la disposición final del producto.

En los servicios (Ceschin, 2014; Sakao & Shimomura, 2007), la Producción Limpia implica incorporar el que hacer ambiental en el diseño y la prestación de servicios.

En cuanto a las investigaciones en torno a la Producción Limpia (CP) podemos encontrar publicaciones genéricas como las de Oliveira *et al.* (de Oliveira *et al.*, 2017) donde se plantea la contribución de la producción limpia hacia los requerimientos de la ISO 14001, Almeida *et al.* (Almeida *et al.*, 2017) con la perspectiva de la producción limpia y su tendencia a la sostenibilidad proporcionando enfoques que ayuden a las industrias a superar esa transición, y otras contribuciones más particulares asociadas a la gestión ambiental (Fresner, 1998; Hillary *et al.*, 1997). En el contexto de ingeniería de fabricación cabe considerar trabajos orientados a promover inversiones en fabricación mas limpia, en países en desarrollo (More & Less, 2000), evaluación de los sistemas de producción (Gong, Guo, Zhang, & Cheng, 2017), establecer e identificar drivers, barreras y estrategias de la fabricación limpia (de Guimarães *et al.*, 2017; Oliveira Neto *et al.*, 2017; Vieira & Amaral, 2016), formular modelos matemáticos para la implementación de la producción limpia (Tran, Schnitzer, Braunegg, & Le, 2017), mejora de la calidad y costes de productos y servicios (Kim & Sarkar, 2017), eficiencia energética (Guzmán-Hernández, Araya-Rodríguez, Castro-Badilla, & Obando-Ulloa, 2016; Wang, Wu, Li, & Zhu, 2013), remanufactura de productos (Esquer, Arvayo, Alvarez-Chavez, Munguia-Vega, & Velazquez, 2017) y procesos de fabricación limpios (D. Fratila, 2014) entre otras.

Otro autores tales como Shin *et al.* (Shin, Curtis, Huisinigh, & Zwetsloot, 2008) trabajan en el desarrollo de un modelo de sostenibilidad para promover la producción limpia dando un enfoque de integración del conocimiento como se puede ver en Figura 4. En su publicación presenta tres tipos de conocimiento que pueden servir para la adopción e implementación de la producción limpia. Sin embargo esos tres tipos de conocimiento deben de trabajar juntos para la formación completa del conocimiento sintético que es esencial para la implementación de la sostenibilidad.

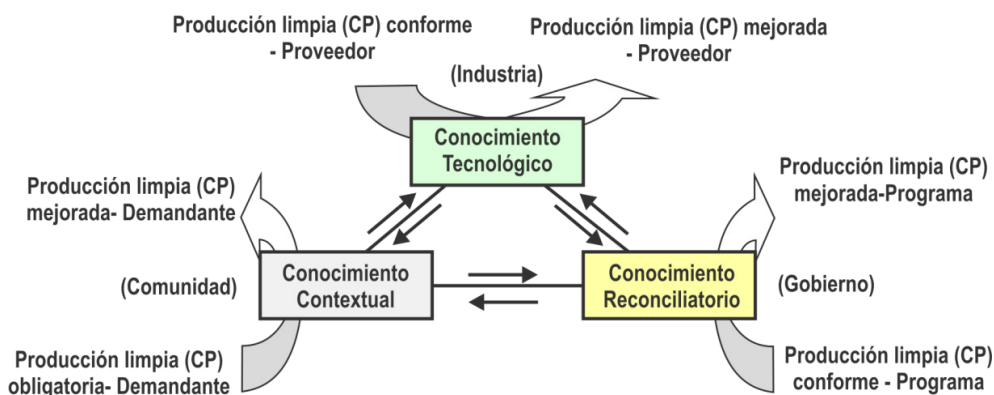


Figura 4. Proceso de evolución de la producción limpia a través del triángulo de conocimiento: contexto, tecnología y reconciliación.

Fuente: elaboración propia. Adaptado de (Shin *et al.*, 2008).

Esta propuesta tiene especial interés para la conceptualización de la Noosfera como uno de los elementos de la tecnosfera.

2.2. Fabricación Verde

Hay muchas maneras en que las instalaciones industriales pueden implantar tecnologías y prácticas en el lugar de trabajo para mejorar los resultados ambientales de sus procesos de producción (Fabricación verde) y muchas motivaciones para hacerlo. Por ejemplo, el reciclaje de desechos, en lugar de la compra de materiales vírgenes, el aumento de la eficiencia de la producción disminuyendo el consumo de energía y agua, la reducción de los gastos ambientales, uso de sustancia no tóxicas y de seguridad en el trabajo como la disminución de los impactos ambientales en las personas (Porter & Linde, 1995).

En general, la fabricación verde (Dangelico *et al.*, 2017; D. Dornfeld, 2012; Porter & Linde, 1995; Tan & Zailani, 2009) implica procesos de producción que utilizan recursos con impactos ambientales relativamente bajos, que son altamente eficientes y que generan poco o ningún desperdicio o contaminación. La fabricación verde abarca la reducción en el origen con objeto de prevenir la contaminación y reducir los residuos generados inicialmente.

La fabricación verde (Sahajwalla *et al.*, 2016) ofrece muchas oportunidades para reducir los costos, cumplir con las normas ambientales y contribuir a una imagen corporativa mejorada. Pero encontrar y explotar estas oportunidades con frecuencia involucra más que problemas tecnológicos.

Entre los principales objetivos, se encuentra la consideración del impacto ambiental y el consumo de recursos durante todo el ciclo de vida de un sistema (incluido el diseño de productos y procesos “verdes”). En el trabajo de Gómez (Gómez Cívicos, n.d.), se establecen los 12 principios básicos de la ingeniería verde.

En los sistemas técnicos, el desarrollo de tecnologías ecológicas verdes (desde procesos y herramientas hacia toda la empresa) es una forma de asegurar que los futuros sistemas técnicos sean sostenibles. Por ello, Dornfeld (D. A. Dornfeld, 2013; David Alan Dornfeld, 2014) parte de la idea de que los sistemas técnicos tienden hacia la sostenibilidad y el enverdecimiento de sus procesos y muestra en su trabajo ejemplos de tecnologías verdes para su implementación en los sistemas técnicos sostenibles. Otras publicaciones como las de Govidan *et al.* (Govindan *et al.*, 2015) analizan los drivers de la fabricación verde desde el punto de vista del análisis fuzzy. Por otro lado, Salem y Deif (Salem & Deif, 2017) establecen en su publicación una caja de herramientas denominada “Greenometer” para evaluar cuanto de “verde” son las empresas manufactureras. Trata de capturar la posición relativa de “verdor” de cualquier empresa entre otras industrias de diferentes sectores, así como dentro

del mismo sector. Esta evaluación se basa en atributos de “verdor” seleccionados y sus indicadores de composición en cada nivel del Greenometer desarrollado. A nivel de procesos de fabricación flexibles, Bai y Sarkis (Bai & Sarkis, 2017) establecen las bases para una futura investigación en la flexibilidad de fabricación verde en un entorno de tecnologías de fabricación avanzadas. Sahajwalla *et al.* (Sahajwalla *et al.*, 2016) analiza la fabricación verde desde el punto de vista del ahorro económico que supondría en los procesos de fabricación. Y finalmente encontramos otras publicaciones como el trabajo realizado por Guo *et al.* (Guo, Liu, Zhang, & Yang, 2017) en los niveles macro de cadena de suministro verde, o a nivel micro como Dangelico *et al.* (Dangelico *et al.*, 2017) que estudia el producto verde en las empresas de fabricación.

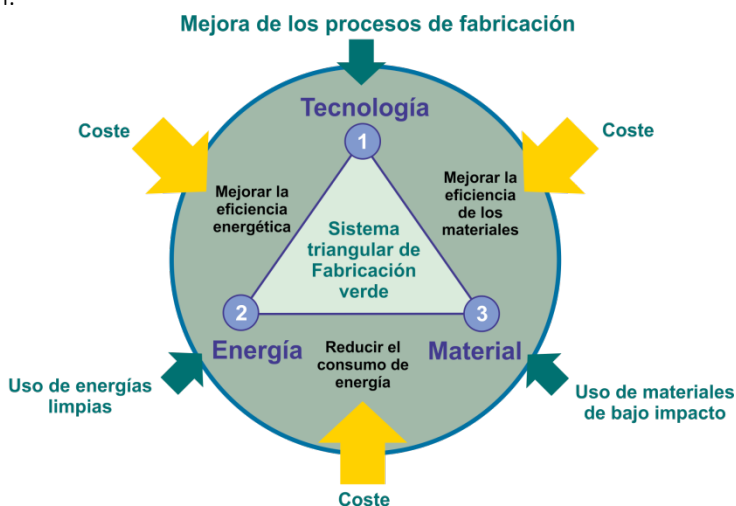


Figura 5. Sistema triangular de Fabricación verde.

Fuente: elaboración propia. Adaptado de (D. A. Dornfeld, 2013).

2.3. Fabricación Sostenible

Muchas han sido las definiciones propuestas hasta el momento sobre la Fabricación Sostenible (FS). Entre una de ellas podemos encontrar la del departamento de comercio de los Estados Unidos (DOC) (Leahu-Aluas, 2010) que define la fabricación sostenible como “la creación de productos que usan procesos con el mínimo impacto negativo al medio ambiente, conservan la energía y los recursos naturales, son seguros para sus empleados, comunidades y consumidores, y son económicamente sólidos”.

En cuanto a investigaciones en torno al concepto de fabricación sostenible podemos encontrar publicaciones asociadas a impactos relacionados con el consumo energético (Eia, 2017), consumo de agua (Zhao, Ogaldez, & Sutherland, 2012) y desperdicios (European Commission, n.d.; US EPA, n.d.). En relación a la recuperación de productos y crear conciencia ambiental se encuentran los trabajos de Ilgin

et al. (Ilgin & Gupta, 2010) y Krill *et al.* (Krill & Thurston, 2005) para procesos de remanufactura, Ramani *et al.* (Ramani *et al.*, 2010) para el diseño del ciclo de vida sostenible y finalmente a nivel de fabricación micro tenemos calidad de los procesos de fabricación sostenibles (Haapala, Catalina, Johnson, & Sutherland, 2012; J W Sutherland *et al.*, n.d.), emisiones (Morrow, Qi, Kim, Mazumder, & Skerlos, 2007) mejora del diseño y maquinado (Armstrong & LeHew, 2011; Camacho, Marín, Sebastián, & Segui, 2009; Domnita Fratila, 2010; Ingarao, Di Lorenzo, & Micari, 2011; Sreejith & Ngoi, 2000; Thakur & Gangopadhyay, 2016a, 2016b). Para una visión más extensa sobre la fabricación sostenible son de consideración las aportaciones de Gunasekaran y Spalanzani (Gunasekaran & Spalanzani, 2012) que dividen la fabricación sostenible en siete campos generales que van desde la identificación de problemas y oportunidades de la sostenibilidad en los sistemas técnicos pasando por la cadena de suministro y servicios, organización y fabricación y diseño, es decir, estructura su revisión en los distintos niveles macro-meso y micro de los sistemas productivos. Por otro lado, encontramos otras revisiones que tienen interés entre los autores más representativos de la fabricación sostenible cabe considerar Haapala *et al.* (Haapala *et al.*, 2013), Young *et al.* (Young, Byrne, & Cotterell, 1997), Westkämper (Westkämper, 2008), Fratila *et al.* (D. Fratila, 2014) o Depeisse (Despeisse *et al.*, 2012a) entre otros.

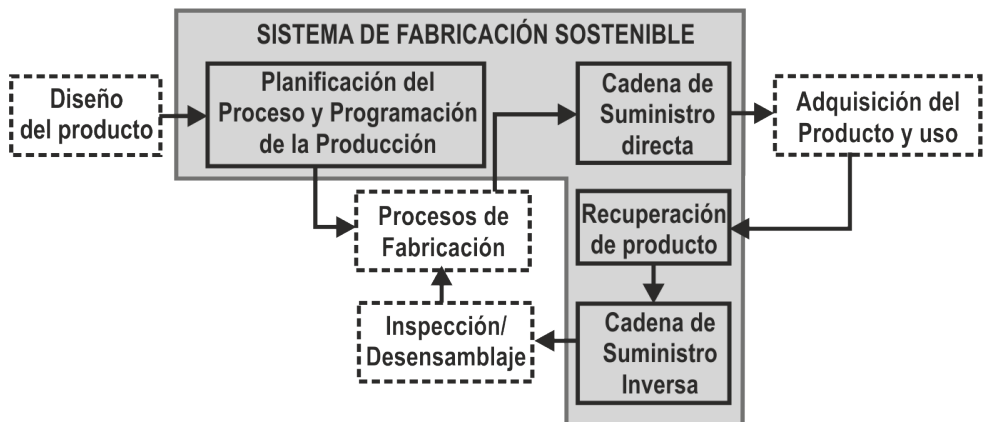


Figura 6. Elementos clave de los sistemas técnicos sostenibles.

Fuente: elaboración propia. Adaptado de (Haapala *et al.*, 2013).

La Figura 6 adaptada de la publicación de Haapala *et al.* (Haapala *et al.*, 2013) muestra la sostenibilidad de sistemas técnicos en solución a la interacción entre los sistemas técnicos y los procesos de fabricación asociados junto con las operaciones de inspección /Desensamblaje consideradas a nivel de planta que interactúan con aspectos a nivel de sistema. Estos procesos a nivel de sistema de fabricación son: (1) la planificación de procesos, (2) programación de la producción, (3) la cadena de suministro directa y (4) la cadena de suministro inversa.

2.4. Fabricación Lean Medioambiental

Lean (Ávila Gutierrez & Córdoba Roldán, 2012; Pettersen, 2009; Zhou, 2016) es una estrategia de producción líder en el mundo, que ha demostrado su valía en entornos industriales durante un largo período de tiempo. Cuando los clientes comenzaron a cambiar sus necesidades y a exigir productos cada vez más personalizados y de alta calidad a costos competitivos, la filosofía *lean* trató de aumentar la velocidad de respuesta hacia el cliente reduciendo el tiempo transcurrido (“lead time”), mediante la eliminación de los desperdicios (“muda”).

El concepto de Producción Lean fue acuñado en 1988 por Krafcik (Holweg, 2007), y vinculado con las características de calidad propuestas por el Sistema de Producción Toyota (Toyota Production System: TPS) (Monden, 2012). Fue ampliamente difundido por varios proyectos del programa IMVP-MIT (Womack & Jones, 1997, 2005; Womack, Jones, & Roos, 2008). La razón de este interés en la industria automotriz japonesa fueron los excelentes resultados alcanzados por las fábricas de Toyota en cuanto al diseño y construcción de automóviles en menos tiempo, con menor cantidad del personal y menos inventarios. TPS se basa en los principios y técnicas de la producción Justo a tiempo (Just-in-Time: JIT) y en la mejora continua- “Kaizen” (M. Imai & Bildhauser, 1986; Masaaki Imai, 2007). El objetivo de la producción Lean es lograr para una gran diversidad de productos, alta productividad y sincronización de la producción y la demanda. Cinco fueron los principios establecidos bajo la filosofía lean: (1) crear valor para el cliente, (2) identificar el flujo de valor, (3) crear flujos, (4) producir solo lo que “impulsa” del cliente, y (5) perseguir la perfección mediante la identificación continua y la eliminación de residuos. Esto forma parte del pensamiento Lean de Womack y Jones (Womack & Jones, 1997) cuyo objetivo es la eliminación de los desperdicios o “muda”. En su publicación establece que los residuos son todo aquello que no agrega valor a un producto, bajo la perspectiva de las necesidades y requerimientos de los clientes, e identifica siete tipos principales: (1) defectos, (2) inventario, (3) sobre-procesamiento, (4) espera, (5) movimiento, (6) transporte y (7) sobre-producción.

Muchas han sido las investigaciones realizadas en torno al concepto Lean, muchas de ellas tomando la estrategia Lean como complemento de la fabricación limpia (CP) (Wu & Low, 2013a) o la fabricación verde (GM) (Dües *et al.*, 2013; Mollenkopf, Stolze, Tate, & Ueltschy, 2010; Womack & Jones, 1997). Otras investigaciones giran en torno a distintos niveles de concreción de los sistemas de producción como pueden ser el nivel de la cadena de suministro (Dües *et al.*, 2013; Hajmohammad, Vachon, Klassen, & Gavronski, 2013; Mollenkopf *et al.*, 2010), células de producción con la conjunción del paradigma Lean y Green Manufacturing (Pampanelli, Found, & Bernardes, 2014) y otras aportaciones asociadas al modelado de los sistemas de producción Lean (Wu & Low, 2013b), ecoeficiencia (Moreira, Alves, & Sousa, 2010) y análisis de flujos de

producción a través de mapas de valor aplicados a casos de estudio (Rahani & al-Ashraf, 2012).

Otras publicaciones tales como las Giuseppe *et al.* (Ioppolo, Cucurachi, Salomone, Saija, & Ciraolo, 2014) establecen el concepto de Lean Medio ambiental como resultado de la conjunción de la Fabricación Lean (FL) como modelo de producción competitivo (Moreira *et al.*, 2010) y la Ecología Industrial (EI) (Graedel, 1994) como marco de principios y herramientas de análisis ambiental. En su publicación propone la Fabricación Lean Ambiental como nuevo término de producción eficiente y efectiva en cuanto a la reducción de entradas de los recursos naturales, materia y energía, o desperdicios y contaminantes en la salida de los procesos. Esta propuesta favorece el crecimiento de la producción sostenible para la mejora de las operaciones y flujos de los recursos desde el punto de vista de los productores (Despeisse, Mbaye, Ball, & Levers, 2012b).

2.5. Remanufactura y cadena de suministro en lazo cerrado

En cuanto a la visión panorámica de los sistemas técnicos y productos respetuosos con el medio ambiente (Domnita Fratila, 2014; J W Sutherland *et al.*, n.d.) podemos señalar diversos enfoques que se han ido tomando a lo largo de los años.

El enfoque del reciclaje se desarrolló antes de los años noventa con el objetivo de reducir las emisiones y el consumo de materia prima. Otro de los enfoques emergentes en los años noventa, es el de rediseño de sistemas técnicos y productos existentes (sistemas modulares) que contribuye a reducir el consumo de energía. Desde el año dos mil, la innovación de nuevos sistemas con el incremento de eco-efectividad y funcionalidad ha llegado a ser una de las principales corrientes otra de ellas ha sido la innovación de sistemas, centrados en la prestación de servicios (servilización) (Cheng *et al.*, 2012) en lugar de productos para satisfacer las necesidades de los consumidores con el fin de adquirir valor añadido. Esto ha sido una nueva tendencia para la fabricación sostenible en el futuro (Abele, E., Anderl, R., 2005).

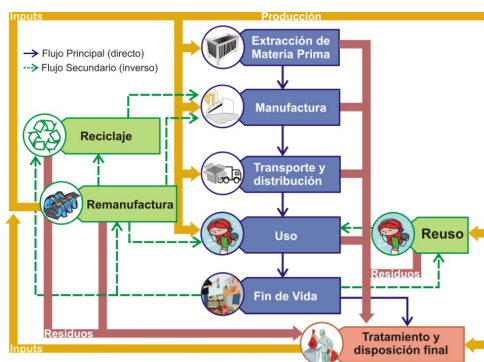


Figura 7. Sistema de fabricación en ciclo cerrado con enfoque sobre su final de vida para ayudar a mantener el flujo cíclico de materiales.

Fuente: elaboración propia. Adaptado de (Nasr & Thurston, 2006).

La fabricación en ciclo cerrado como puede verse en la Figura 7 es una forma eficaz de proteger nuestros recursos naturales. Siempre ha sido mencionada como el sistema de recuperación de productos End of Life (EoL) / End of Use (EoU) que generalmente abarca actividades, incluyendo la recolección de productos usados (también denominados “core”), para la reutilización, desmontaje y segregación de componentes valiosos del producto, componentes de remanufactura, reciclaje de materiales y eliminación de residuos (Toffel, 2004).

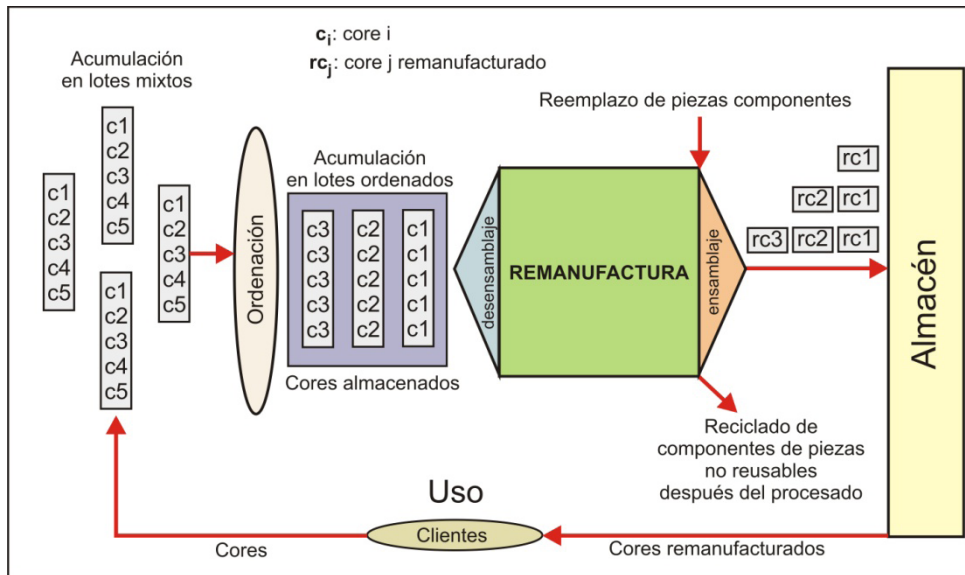


Figura 8. Proceso diseño para la Remanufactura (DfRem).

Fuente: elaboración propia.

El **diseño para la remanufactura** o DfRem, es un área de investigación que ha recibido un alto grado de interés en los últimos años debido al alto impacto que tiene el diseño del producto en la eficiencia de la remanufactura. Sin embargo el volumen global de la literatura dedicada a DfRem es baja y hay todavía mucho que aportar sobre este tema. La remanufactura es el proceso de devolver al uso un producto en perfectas condiciones y con garantía. El proceso como puede verse en la Figura 8, incluye: ordenación, inspección, desensamblaje, limpieza, reprocesado y reensamblaje. Las partes que no pueden ser devueltas a su estado y calidad original, son reemplazadas por otras nuevas, de forma que el producto remanufacturado será una combinación de partes reusadas y nuevas.

En cuanto a investigaciones respecto a la remanufactura de productos podemos encontrar enfoques orientados a indicadores para la remanufacturabilidad (Amezquita, Hammond, Salazar, & Bras, 1995; Bras & Hammond, 1996; W. L. Ijomah, McMahon, Hammond, & Newman, 2010; Winifred L. Ijomah, 2010), diseño de arquitecturas para un desensamblaje rentable (Lee, Cho, & Hong, 2010),

comparaciones en el uso energético entre manufactura y remanufactura (John W. Sutherland, Adler, Haapala, & Kumar, 2008), a nivel de modularización o diseño modular (Kimura, Kato, Hata, & Masuda, 2001) y diseño de plataformas para reducir costes de fabricación y simplificar la organización de procesos (King, Burgess, Ijomah, & McMahon, 2006).

A nivel de **cadena de suministro en ciclo cerrado** también se ha considerado como un facilitador para la remanufactura durante décadas. Una descripción tradicional de la cadena de suministro de bucle cerrado es que se compone de dos cadenas de suministro distintas, es decir, la cadena de suministro directa e inversa (Fleischmann, Moritz, Galbreth, Michael R. , Tagaras, 2010). La cadena de suministro directa está a cargo del flujo de producto físico desde el fabricante al cliente, mientras que la cadena de suministro inversa es responsable del flujo de productos físicos usados desde la parte posterior del cliente al remanufacturador, estos dos flujos se cierran mediante la remanufactura (Östlin, Sundin, & Björkman, 2008).

Teniendo en cuenta el concepto de cadena de suministro en lazo cerrado original, Asif (Asif, Bianchi, Rashid, & Nicolescu, 2012) distingue en su publicación dos concepciones erróneas a la cadena de suministro en ciclo cerrado, como se puede ver en los casos (b) y (c) de la Figura 9.

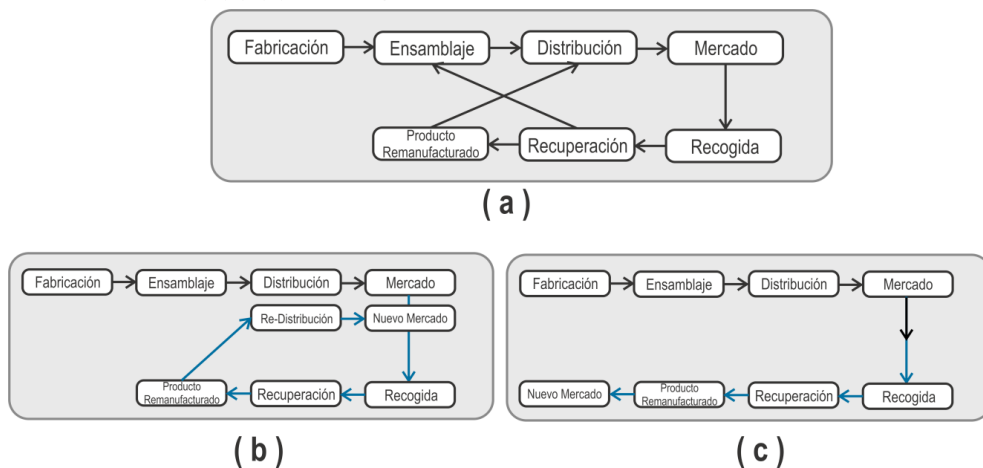


Figura 9. Flujo de materiales en diferentes cadenas de suministro:(a) Cadena de suministro en ciclo cerrado original; (b) cadena de suministro inversa con un final abierto, a menudo se confunde con una cadena de suministro en lazo cerrado; (c) Sistema totalmente abierto con dos cadenas de suministro una para la fabricación y otra para la remanufactura.

Fuente: elaboración propia.

En la publicación de Asif (Asif *et al.*, 2012) aparece otro concepto asociado a los sistemas técnicos sostenibles como es la Fabricación conservadora de recursos (Resource Conservative Manufacturing) también conocida como ResCoM, que se presentará en el siguiente apartado en mayor grado de detalle, y se basa en la

cadena de suministro en ciclo cerrado ideal, y tiene la capacidad de resolver el grado de incertidumbre de la remanufactura presentados por Östlin (Östlin *et al.*, 2008) donde dicho autor considera que la remanufactura no es controlable debido al alto grado de incertidumbre en la cantidad y calidad de los productos devueltos. Dado que el producto devuelto es punto principal de la remanufactura, la cantidad, la calidad y el tiempo de devolución del producto constituyen factores esenciales en el éxito de los sistemas técnicos en ciclo cerrado.

2.6. Fabricación conservadora de recursos

El concepto de Fabricación conservadora de recursos o ResCoM fue un concepto introducido por Asif (Asif *et al.*, 2012) en su publicación “Análisis del rendimiento de la cadena de suministro en lazo cerrado” donde establece un modelo estratégico que focaliza en la conservación de los recursos a través de los múltiples ciclos de vida del producto incorporando la cadena de suministro, el modelo de negocio e integrando a consumidores y otras partes interesadas relevantes. La fabricación conservadora de recursos busca optimizar el uso de materiales y energía en la fabricación, fase de uso y final de uso y recuperación del valor del producto al final de su vida útil.

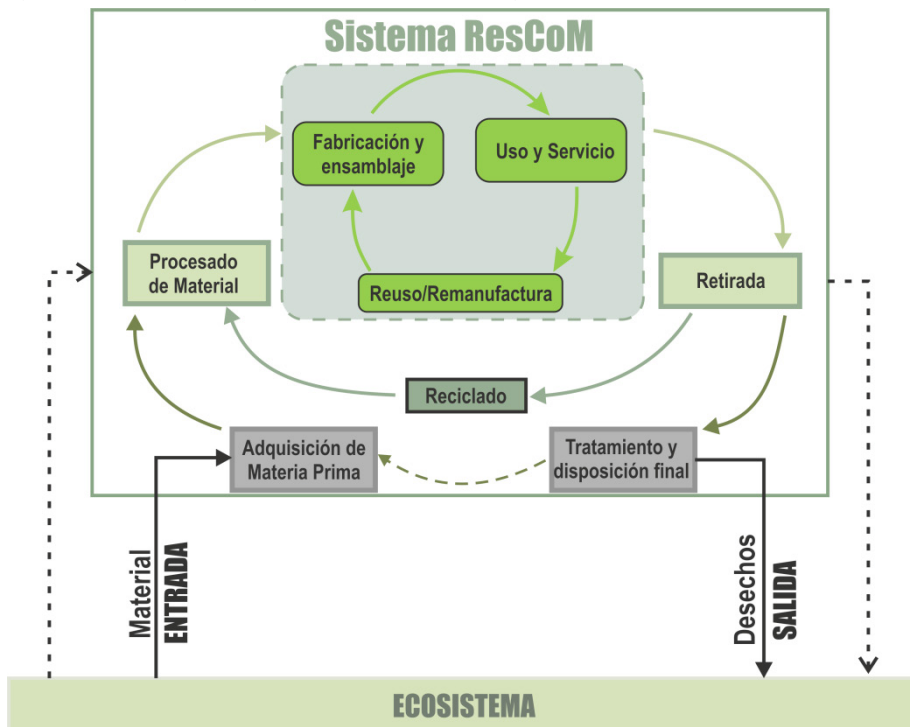


Figura 10. Fabricación conservadora de recursos.

Fuente: elaboración propia. Adaptado de (Rashid, Asif, Krajnik, & Nicolescu, 2013).

La remanufactura se utiliza como herramienta fundamental y actividad básica para la implementación de ResCoM. El concepto de ResCoM es aplicable desde el punto de vista multiescala y multinivel ya que podemos tener ResCoM a nivel de producto (Charter & Gray, 2008), a nivel de organización o negocio (Mont, Dalhammar, & Jacobsson, 2006) y a nivel de cadena de suministro en lazo cerrado (Asif *et al.*, 2012; Ferguson & Souza, 2010).

3. Conclusiones

En este capítulo se ha dado una visión de los modelos de referencia para los sistemas técnicos sostenibles con objeto de establecer el marco actual de trabajo y hacia donde debemos de ir.

Analizando las características de cada uno de ellos debe existir un **paradigma que responda a los objetivos marcados por las fábricas de futuro (FoF)** y que integre aspectos que son considerados de interés tales como: (1) **Complejidad** del análisis y síntesis contemplando: vistas, niveles, flujos y etapas del ciclo de vida en el análisis. (2) Integración de la **sostenibilidad** distribuida y multinivel para mitigar la fractura metabólica bajo mínima complejidad. (3) Considerar el carácter **bifronte** como todo y parte, producto y procesos. (4) Carácter fractal y ubicuo, **minimización de la complejidad** de los sistemas de fabricación. (5) Requerimientos de **cooperación y colaboración** entre sus entidades y con el exterior para la adaptación dinámica y evolutivamente estable al entorno cambiante y caótico. (6) **Autonomía y autoasertividad** de las unidades que la integran, para configurar entornos, innovadores, armónicos y estables. (7) **Autorregulación y autoorganización** para la variedad requerida de la empresa y las entidades que la forman, formando un todo con el medio natural sin solución de continuidad. (8) Capacidad de manejar la complejidad con la **variedad requerida**.

Tras las carencias detectadas se hace necesario proponer una Arquitectura de Referencia que organice las entidades en relación con la tecnosfera, naturaleza y noosfera y utilice facilitadores tecnológicos inteligentes mejorando las debilidades que presentan los modelos actuales.

4. Referencias bibliográficas

Abele, E., Anderl, R. & B. (2005). *Environmentally-Friendly Product Development*. Londres, Inglaterra: Springer London. doi:<https://doi.org/10.1007/b138604>

Aguayo, F., Marcos, M., Sánchez, M. & Lama, J. R. (2007). *Sistemas Avanzados de Fabricación Distribuida*. Ra- Ma.

Aguayo González, F., Peralta Álvarez, M. E., Lama Ruiz, J. & Soltero Sánchez, V. (2011). *Ecodiseño: ingeniería sostenible de la cuna a la cuna (C2C)*. RC Libros.

- Almeida, C. M. V. B., Agostinho, F., Huisingh, D. & Giannetti, B. F.** (2017). Cleaner Production towards a sustainable transition. *Journal of Cleaner Production*, 142, pp. 1–7. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.094>
- Amezquita, T., Hammond, R., Salazar, M. & Bras, B.** (1995). Characterizing the Remanufacturability of Engineering Systems. *Proceedings of ASME Advances in Design Automation Conference, DE-Vol. 82, September 17–20*, 82(1993), pp. 271–278. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/4859/116acef50ea1fe113a53cc05fec6c09e8b19.pdf>
- Armstrong, C. M. & LeHew, M. L. A.** (2011). Sustainable Apparel Product Development: In Search of a New Dominant Social Paradigm for the Field Using Sustainable Approaches. *Fashion Practice The Journal of Design Creative Process & the Fashion Industr*, 3(1), pp. 29–62. <https://doi.org/10.2752/175693811X12925927157018>
- Asaro, P. M.** (2008). From mechanisms of adaptation to intelligence amplifiers: the philosophy of W. Ross Ashby. *The Mechanical Mind in History*, pp. 149–184. doi:<https://doi.org/10.7551/mitpress/9780262083775.001.0001>
- Ashby, W.** (1958). Requisite variety and its implications for the control of complex systems. *Cybernetica*, 1, pp. 83–99. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0718-9_28
- Ashby, W. R.** (1960). Design for a Brain- The origin of adaptive behavior. *Cybernetics*, 304. doi:<https://doi.org/SYST ASHB>
- Asif, F. M., Bianchi, C., Rashid, A. & Nicolescu, C. M.** (2012). Performance analysis of the closed loop supply chain. *Journal of Remanufacturing*, 2(1), p. 4. doi:<https://doi.org/10.1186/2210-4690-2-4>
- Ávila Gutierrez, M. J. & Córdoba Roldán, A.** (2012). *Dirección de proyectos Lean*. Sevilla Técnica. Sevilla técnica publicación del Colegio Oficial de Ingenieros Técnicos Industriales de Sevilla. Recuperado de: <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/50672>
- Bai, C. & Sarkis, J.** (2017). Improving green flexibility through advanced manufacturing technology investment: Modeling the decision process. *International Journal of Production Economics*, 188, pp. 86–104. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2017.03.013>
- Bauer, H., Baur, C., Camplone, G., George, K., Ghinslazoni, G. & Huhn, W.** (2015). *Industry 4.0 - How to Navigate Digitization of the Manufacturing Sector*. McKinsey & Company. doi:<https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Benyus, J. M.** (1997). *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*. Innovation. Perennial. doi:<https://doi.org/10.2307/4450504>
- Berkel, R., Willems, E. & Lafleur, M.** (1997). The Relationship between Cleaner Production and Industrial Ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 1(1), pp. 51–66. doi:<https://doi.org/10.1162/jiec.1997.1.1.51>

- Bi, Z.** (2011). Revisiting system paradigms from the viewpoint of manufacturing sustainability. *Sustainability*, 3(9), pp. 1323–1340. doi:<https://doi.org/10.3390/su3091323>
- Böhringer, C., Moslener, U., Oberndorfer, U. & Ziegler, A.** (2012). Clean and productive? Empirical evidence from the German manufacturing industry. *Research Policy*, 41(2), pp. 442–451. doi:<https://doi.org/10.1016/j.respol.2011.10.004>
- Bonabeau, E., Dorigo, M. & Theraulaz, G.** (1999). *From Natural to Artificial Swarm Intelligence. Neural Models of Language Processes*. Oxford University Press.
- Bras, B. & Hammond, R.** (1996). Towards Design for Remanufacturing – Metrics for Assessing Remanufacturability. *Proceedint International Workshop on Reuse*, 5–22. Recuperadode:<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.475.7485>
- Caldeira, J. L., Azevedo, R. C., Silva, C. A. & Sousa, J. M. C.** (2007). Supply-chain management using ACO and beam-ACO algorithms. In *IEEE International Conference on Fuzzy Systems* (pp. 1–6). IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/FUZZY.2007.4295615>
- Camacho, A. M., Marín, M. M., Sebastián, M. A. & Seguí, V. J.** (2009). Mechanical Analysis of Indentation Processes According to Geometrical and Lubrication Parameters (pp. 395–405). <https://doi.org/10.1063/1.3273656>
- Ceschin, F.** (2014). *Sustainable Product-Service Systems*. *Futures*. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-319-03795-0>
- Charter, M. & Gray, C.** (2008). Remanufacturing and product design: designing for the 7th generation. *International Journal of Product Development*. doi:<https://doi.org/10.1504/IJPD.2008.020406>
- Cheng, Y., Zhang, Y., Lv, L., Liu, J., Tao, F. & Zhang, L.** (2012). Analysis of cloud service transaction in cloud manufacturing. *IEEE 10th International Conference on Industrial Informatics*, pp. 320–325. doi:<https://doi.org/10.1109/INDIN.2012.6301212>
- Cicirello, V. A. & Smith, S. F.** (1991). Improved Routing Wasps for Distributed Factory Control. *Forbes*, 26–32. Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.21.2285>
- Cicirello, V. & Smith, S.** (2001). Wasp nests for self-configurable factories. In *Proceedings of the fifth international conference*. (pp. 473–480). Nueva York, EE.UU.: ACM Press. doi:<https://doi.org/10.1145/375735.376420>
- Clark, B., Foster, J. B., De, T. & Roig, D. P.** (2009). Imperialismo ecológico y la fractura metabólica global Intercambio desigual y el comercio de guano/nitratos. *International Journal of Comparative Sociology*, 50, pp. 311–334. Recuperado de: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=12426097005>

- Corry, P. & Kozan, E.** (2004). Ant colony optimisation for *machine layout problems*. *Computational Optimization and Applications*, 28(3), pp. 287–310. doi:<https://doi.org/10.1023/B:COAP.0000033965.99769.98>
- Dangelico, R. M., Pujari, D. & Pontrandolfo, P.** (2017). Green Product Innovation in Manufacturing Firms: A Sustainability-Oriented *Dynamic Capability Perspective*. *Business Strategy and the Environment*, 26(4), pp. 490–506. doi:<https://doi.org/10.1002/bse.1932>
- de Guimarães, J. C. F., Severo, E. A. & Vieira, P. S.** (2017). Cleaner production, project management and Strategic Drivers: *An empirical study*. *Journal of Cleaner Production*, 141, pp. 881–890. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.09.166>
- de Oliveira, J. A., Silva, D. A. L., Guardia, M., Do Nascimento Gambi, L., de Oliveira, O. J. & Ometto, A. R.** (2017, August 29). How can Cleaner Production practices contribute to meet ISO 14001 requirements? Critical analysis from a survey *with industrial companies*. *Clean Technologies and Environmental Policy*, pp. 1–14. doi:<https://doi.org/10.1007/s10098-017-1363-8>
- Deloitte.** (2015). Industry 4.0. Challenges and solutions for the digital transformation and use of exponential technologies. Deloitte, 1–30. Recuperado de: <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/ch/Documents/manufacturing/ch-en-manufacturing-industry-4-0-24102014.pdf>
- Despeisse, M., Mbaye, F., Ball, P. D. & Levers, A.** (2012a). The emergence of sustainable manufacturing practices. *Production Planning & Control*, 23(5), pp. 354–376. doi:<https://doi.org/10.1080/09537287.2011.555425>
- Despeisse, M., Mbaye, F., Ball, P. D. & Levers, A.** (2012b). The emergence of sustainable manufacturing practices. *Production Planning & Control*, 23(5), pp. 354–376. doi:<https://doi.org/10.1080/09537287.2011.555425>
- Dornfeld, D.** (2012). Green Manufacturing: Axes of Resiliency. Recuperado de: <http://green-manufacturing.blogspot.com.es/2012/07/axes-of-resiliency.html>
- Dornfeld, D. A.** (2013). *Green manufacturing: fundamentals and applications*. Springer.
- Dornfeld, D. A.** (2014). Moving towards *green and sustainable manufacturing*. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing- Green Technology*, 1(1), 63–66. doi:<https://doi.org/10.1007/s40684-014-0010-7>
- Dües, C. M., Tan, K. H. & Lim, M.** (2013). Green as the new Lean: how to use Lean practices as a catalyst to *greening your supply chain*. *Journal of Cleaner Production*, 40, pp. 93–100. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.12.023>

Dunn, R. F. & Bush, G. E. (2001). Using process integration *technology for CLEANER production*. *Journal of Cleaner Production*, 9(1), pp. 1–23. doi:[https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(00\)00021-4](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(00)00021-4)

Eia. (2017). Annual Energy Outlook 2017 with projections to 2050. Recuperado de: [https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383\(2017\).pdf](https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/0383(2017).pdf)

Esquer, J., Arvayo, J. A., Alvarez-Chavez, C. R., Munguia-Vega, N. E. & Velazquez, L. (2017). Cleaner production in a *remanufacturing process of air compressors*. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 23(1), pp. 83–91. doi:<https://doi.org/10.1080/10803548.2016.1190558>

European Comission. (n.d.). Packaging and Packaging Waste - Environment - European Commission. Recuperado de: <http://ec.europa.eu/environment/waste/packaging/legis.htm>

Ferreira, J. D. (2013). *Bio-Inspired Self-Organisation in Evolvable Production Systems*. KTH Royal Institute of Technology.

Ferguson, M. E. & Souza, G. C. (2010). *Closed-Loop Supply Chains: New Developments to Improve the Sustainability of Business Practices*. CRC Press. Recuperado de: <https://books.google.es/books?id=nKUNYz8R1RQC&pg=PP1&dq=Closed%20loop%20supply%20Chains%3B%20New%20developments%20to%20improve%20the%20sustainability%20of%20Business%20Practices&lr&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q=Closed%20loop%20supply%20Chains&f=false>

Foster, J. B. (1999). Marx's Theory of Metabolic Rift: *Classical Foundations for Environmental Sociology*. *American Journal of Sociology*, 105(2), pp. 366–405. doi:<https://doi.org/10.1086/210315>

Fratila, D. (2010). Macro-level environmental comparison of *near-dry machining and flood machining*. *Journal of Cleaner Production*, 18(10–11), pp. 1031–1039. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.01.017>

Fratila, D. (2014). Environmentally friendly Manufacturing Processes in the Context of *Transition to Sustainable Production*. In *Comprehensive Materials Processing* (Vol. 8, pp. 163–175). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00815-3>

Fratila, D. (2014). Environmentally friendly Manufacturing Processes in the Context of *Transition to Sustainable Production*. In *Comprehensive Materials Processing* (pp. 163–175). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096532-1.00815-3>

Fresner, J. (1998). Cleaner production as *a means for effective environmental management*. *Journal of Cleaner Production*, 6(3–4), pp. 171–179. doi:[https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(98\)00002-X](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(98)00002-X)

- Giret, A. & Trentesaux, D.** (2016). Artefacts and Guidelines for Designing Sustainable Manufacturing Systems (pp. 93–101). Springer International Publishing. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-30337-6_9
- Gómez Cívicos, J. I.** (n.d.). Ingeniería Verde: Doce principios para la Sostenibilidad.
- Gong, B., Guo, D., Zhang, X. & Cheng, J.** (2017). An approach for evaluating cleaner production performance in iron and steel *enterprises involving competitive relationships*. Journal of Cleaner Production, 142, pp. 739–748. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.008>
- Govindan, K., Diabat, A. & Madan Shankar, K.** (2015). Analyzing the *drivers of green manufacturing* with fuzzy approach. Journal of Cleaner Production, 96, pp. 182–193. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.054>
- Graedel, T.** (1994). *Industrial ecology: definition and implementation*. Industrial Ecology and Global Change, pp. 23–42. doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9780511564550.005>
- Gunasekaran, A. & Spalanzani, A.** (2012). Sustainability of manufacturing and services: *Investigations for research and applications*. International Journal of Production Economics, 140(1), pp. 35–47. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2011.05.011>
- Guo, Z., Liu, H., Zhang, D. & Yang, J.** (2017). Green Supplier Evaluation and Selection in Apparel Manufacturing *Using a Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making Approach*. Sustainability, 9(4), 650. doi:<https://doi.org/10.3390/su9040650>
- Guzmán-Hernández, T. D. J., Araya-Rodríguez, F., Castro-Badilla, G. & Obando-Ulloa, J. M.** (2016). Uso de la energía solar en sistemas de producción agropecuaria: *producción más limpia y eficiencia energética*. Revista Tecnología En Marcha, 29(8), 46. doi:<https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2984>
- Haapala, K. R., Catalina, A. V., Johnson, M. L. & Sutherland, J. W.** (2012). Development and Application of Models *for Steelmaking and Casting Environmental Performance*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 134(5), 051013. doi:<https://doi.org/10.1115/1.4007463>
- Haapala, K. R., Zhao, F., Camelio, J., Sutherland, J. W., Skerlos, S. J., Dornfeld, D. A., & Rickli, J. L.** (2013). A Review of *Engineering Research in Sustainable Manufacturing*. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 135(4), 041013-1-041013-16. doi:<https://doi.org/10.1115/1.4024040>
- Hadeli, Valckenaers, P., Kollingbaum, M. & Van Brussel, H.** (2004). *Multi-agent coordination and control using stigmergy*. Computers in Industry, 53(1), 75–96. doi:[https://doi.org/10.1016/S0166-3615\(03\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0166-3615(03)00123-4)

- Hajmohammad, S., Vachon, S., Klassen, R. D. & Gavronski, I.** (2013). Lean management and supply *management: their role in green practices and performance*. *Journal of Cleaner Production*, 39, pp. 312–320. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.07.028>
- Hartini, S. & Ciptomulyono, U.** (2015). The Relationship between Lean and *Sustainable Manufacturing* on Performance: Literature Review. *Procedia Manufacturing*, 4(less), pp. 38–45. doi:<https://doi.org/10.1016/j.promfg.2015.11.012>
- Heijungs, R.** (1994). A generic *method for the identification* of options for cleaner products. *Ecological Economics*, 10(1), pp. 69–81. doi: [https://doi.org/10.1016/0921-8009\(94\)90038-8](https://doi.org/10.1016/0921-8009(94)90038-8)
- Hillary, R., et al.** (1997). Environmental management systems and cleaner production. Wiley. Recuperado de: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IisScript=iicacr.xis&expresion=GESTION&cantidad=50&formato=1&proxdoc=301&ascendente=&tc=>
- Hilson, G. (2003).** Defining “cleaner production” and “pollution prevention” in the mining context. *Minerals Engineering*, 16(4), pp. 305–321. doi:[https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00012-8](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00012-8)
- Holland, J. H.** (1992). Complex adaptive systems. *Daedalus*, 121(1), pp. 17–30. doi:<https://doi.org/10.2307/20025416>
- Holland, J. H.** (2006). *Studying complex adaptive systems*. *Journal of Systems Science and Complexity*, 19(1), pp. 1–8. doi:<https://doi.org/10.1007/s11424-0060001-z>
- Holweg, M.** (2007). *The genealogy of lean production*. *Journal of Operation Management*, 25, pp.420–437. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jom.2006.04.001>
- Ijomah, W. L.** (2010). *The application of remanufacturing in sustainable manufacture*. *Proceedings of the ICE - Waste and Resource Management*, 163(4), pp. 157–163. doi:<https://doi.org/10.1680/warm.2010.163.4.157>
- Ijomah, W. L., McMahon, C. A., Hammond, G. P. & Newman, S. T.** (2010). Development of robust design-for-remanufacturing *guidelines to further the aims of sustainable development*. *International Journal of Production Research*, 45(45), pp. 18–19. doi:<https://doi.org/10.1080/00207540701450138>
- Ilgın, M. A. & Gupta, S. M.** (2010). Environmentally conscious manufacturing and product recovery (ECMPRO): A review of the state of the art. *Journal of Environmental Management*, 91(3), pp. 563–591. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.09.037>
- Imai, M.** (2007). *Gemba Kaizen. A Commonsense, Low-Cost Approach to Management*. In *Das Summa Summarum des Management* (pp. 7–15). McGraw-Hill. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-8349-9320-5_2

- Imai, M. & Bildhauser, L.** (1986). *The Key to Japan's Competitive Success*. Kaizen forum. Random House Business Division. Recuperado de: pt.kaizen.com
- Ingarao, G., Di Lorenzo, R. & Micari, F.** (2011). *Sustainability issues in sheet metal forming processes: an overview*. *Journal of Cleaner Production*, 19(4), pp. 337–347. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.10.005>
- Ioppolo, G., Cucurachi, S., Salomone, R., Saija, G. & Ciraolo, L.** (2014). *Industrial ecology and environmental lean management: Lights and shadows*. *Sustainability (Switzerland)*, 6(9), pp. 6362–6376. doi:<https://doi.org/10.3390/su6096362>
- Jayal, A. D., Badurdeen, F., Dillon, O. W. & Jawahir, I. S.** (2010). *Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels*. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(3), pp. 144–152. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.03.006>
- Kim, M.-S. & Sarkar, B.** (2017). *Multi-stage cleaner production process with quality improvement and lead time dependent ordering cost*. *Journal of Cleaner Production*, 144, pp. 572–590. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.052>
- Kimura, F., Kato, S., Hata, T. & Masuda, T.** (2001). *Product Modularization for Parts Reuse in Inverse Manufacturing*. *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, 50(1), pp. 89–92. doi:[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62078-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62078-2)
- King, A. M., Burgess, S. C., Ijomah, W. & McMahon, C.** (2006). *Reducing waste: repair, recondition, remanufacture or recycle?* *Sustainable Development*, 267, pp. 257–267. doi:<https://doi.org/10.1002/sd>
- Kjaerheim, G.** (2005). *Cleaner production and sustainability*. *Journal of Cleaner Production*, 13(4), pp. 329–339. doi:[https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(03\)00119-7](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(03)00119-7)
- Krajnc, D. & Glavič, P.** (2005). *How to compare companies on relevant dimensions of sustainability*. *Ecological Economics*, 55(4), pp. 551–563. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.12.011>
- Krill, M. & Thurston, D. L.** (2005). *Remanufacturing: Impacts of Sacrificial Cylinder Liners*. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 127(3), 687. doi:<https://doi.org/10.1115/1.1961946>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T. & Hoffmann, M.** (2014). *Industry 4.0*. *Business and Information Systems Engineering*, 6(4), pp. 239–242. doi:<https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Leahu-Aluas, S.** (2010). *Sustainable Manufacturing—An Overview for Manufacturing Engineers*. *Sustainable Manufacturing*. Recuperado de: http://www.sustainablemanufacturing.biz/media/DIR_17101/9543103a2878dfb8ffff83b8ffffd524.pdf

- Lee, H. B., Cho, N. W. & Hong, Y. S.** (2010). A hierarchical end-of-life decision model for determining the *economic levels of remanufacturing* and disassembly under environmental regulations. *Journal of Cleaner Production*, 18(13), pp. 1276–1283. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.04.010>
- Levin, S. A.** (1998). Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems*, 1(5), pp. 431–436. doi:<https://doi.org/10.1007/s100219900037>
- Loayza Perez, J. & Silva Meza, V.** (2014). Los procesos *industriales sostenibles* y su contribución en la prevención de problemas ambientales. *Industrial Data*, 16(1), 108. doi:<https://doi.org/10.15381/idata.v16i1.6425>
- Mantovani, A., Tarola, O. & Vergari, C.** (2017). End-of-pipe or cleaner production? *How to go green in presence of income inequality and pro-environmental behavior*. *Journal of Cleaner Production*, 160, pp. 71–82. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.01.110>
- Maxwell, D. & der Vorst, R.**(2003). Developing sustainable products and services. *Journal of Cleaner Production*, 11(8 SPEC.), pp. 883–895. doi:[https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(02\)00164-6](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(02)00164-6)
- Mebratu, D.** (1998). Sustainability and sustainable development : *historical and, 9255(98), pp. 493–520.*
- Miller, J. H. & Page, S. E.** (2007). *Complex Adaptive Systems. An introduction to computational models of social life*. Princeton University Press. Recuperado de: <https://www.worldcat.org/title/complex-adaptive-systems-an-introduction-to-computational-models-of-social-life/oclc/760073369>
- Mollenkopf, D., Stolze, H., Tate, W. L. & Ueltschy, M.** (2010). *Green, lean, and global supply chains*. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 40(1/2), pp. 14–41. doi:<https://doi.org/10.1108/09600031011018028>
- Monden, Y.** (2012). *Toyota production system: an integrated approach to just-in-time*. *Journal of Chemical Information and Modeling* (Vol. 53). CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Mont, O., Dalhammar, C. & Jacobsson, N.** (2006). *A new business model for baby prams based on leasing and product remanufacturing*. *Journal of Cleaner Production*, 14(17), pp. 1509–1518. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.01.024>
- More, D. & Less, W.** (2000). *Promoting Cleaner Pproduction investments in developing countries issues and possible strategies*. *Cleaner Production*, (April), pp. 1–12. Recuperado de: <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/8187/-Promoting%20Cleaner%20Production%20Investments%20in%20Developing%20Countries-20001582.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

- Moreira, F., Alves, A. C. & Sousa, R. M.** (2010). *Towards eco-efficient lean production systems*. *Balanced Automation Systems for Future Manufacturing Networks*, pp. 100–108. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-14341-0_12
- Morrow, W. R., Qi, H., Kim, I., Mazumder, J. & Skerlos, S. J.** (2007). *Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing*. *Journal of Cleaner Production*, 15(10), pp. 932–943. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2005.11.030>
- Mourtzis, D. & Doukas, M.** (2014). *The Evolution of Manufacturing Systems: From Craftsmanship to the Era of Customisation*. *Handbook of Research on Design and Management of Lean Production Systems*, pp. 1–29. doi:<https://doi.org/10.4018/978-1-4666-5039-8>
- Nambiar, A. N.** (2010). *Modern manufacturing paradigms – A comparison*. *International Multiconference of Engineers and Computer Scientists, III*, 6. doi:<https://doi.org/1>
- Nasr, N. & Thurston, M.** (2006). *Remanufacturing : A Key Enabler to Sustainable Product Systems*. *Proceedings of LCE*, 15–18. Recuperado de: <https://www.mech.kuleuven.be/lce2006/key4.pdf>
- Ocampo, L. A. & Clark, E. E.** (2015). *A sustainable manufacturing strategy framework: the convergence of two fields*. *Asian academy of management journal*, 20(2), pp. 29–57. Recuperado de: http://web.usm.my/aamj/20022015/aamj20022015_2.pdf
- Oliveira Neto, G. C., Leite, R. R., Shibao, F. Y. & Lucato, W. C.** (2017). *Framework to overcome barriers in the implementation of cleaner production in small and medium-sized enterprises: Multiple case studies in Brazil*. *Journal of Cleaner Production*, 142, pp. 50–62. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.150>
- Östlin, J., Sundin, E. & Björkman, M.** (2008). *Importance of closed-loop supply chain relationships for product remanufacturing*. *International Journal of Production Economics*, 115(2), pp. 336–348. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2008.02.020>
- Pampanelli, A. B., Found, P. & Bernardes, A. M.** (2014). *A Lean & Green Model for a production cell*. *Journal of Cleaner Production*, 85, pp. 19–30. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.014>
- Peters, T.** (2011). *Nature as measure: The Biomimicry Guild*. *Architectural Design*, 81(6), pp. 44–47. doi:<https://doi.org/10.1002/ad.1318>
- Pettersen, J.** (2009). *Defining lean production: some conceptual and practical issues*. *The TQM Journal*, 21(2), pp. 127–142. doi:<https://doi.org/10.1108/17542730910938137>
- Pezzullo, P. C. & Sandler, R.** (2007). *Revisiting the Environmental Justice Challenge to Environmentalism*. *Environmental Justice and Environmentalism*, 1–24. Recuperado de: <https://books.google.es/books?id=f1RprvuftvAC&lpg=PA135&dq=clean%20production%20in%20productive%20process&lr&hl=es&pg=PA135#v=onepage&q=clean%20production%20in%20productive%20process&f=false>

- Pham, D. T., Afify, A. A. & Koç, E.** (2007). *Manufacturing cell formation using the Bees Algorithm*. 3rd International Virtual Conference on Intelligent Production Machines and Systems (IPROMS 2007), pp. 523–528. Recuperado de: <http://www.citeulike.org/user/andremun/article/6592266>
- Porter, M. E. & Linde, C. van der.** (1995). Green and competitive: ending the stalemate. *Harvard Business Review*, 28(6), pp. 128–129. doi:[https://doi.org/10.1016/0024-6301\(95\)99997-E](https://doi.org/10.1016/0024-6301(95)99997-E)
- Rahani, A. R. & al-Ashraf, M.** (2012). *Production Flow Analysis through Value Stream Mapping: A Lean Manufacturing Process Case Study*. *Procedia Engineering*, 41, pp. 1727–1734. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.375>
- Ramani, K., et al.** (2010). Integrated Sustainable Life Cycle Design: A Review. *Journal of Mechanical Design*, 132(9), 091004. doi:<https://doi.org/10.1115/1.4002308>
- Rashid, A., Asif, F. M. A., Krajnik, P. & Nicolescu, C. M.** (2013). Resource conservative manufacturing: An essential change in business and technology paradigm for sustainable manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 57, pp. 166–177. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.012>
- Riechmann, J.** (2005). *¿Cómo cambiar hacia sociedades sostenibles? Reflexiones sobre biomimesis y autolimitación*. *Isegoría: Revista de Filosofía Moral y Política.*, 32(32), pp. 21–41. doi:<https://doi.org/10.3989/isegoria.2005.i32.459>
- Sahajwalla, V., Pahlevani, F., Maroufi, S. & Rajarao, R.** (2016). Green Manufacturing: A Key to Innovation Economy. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(4), pp. 273–275. doi:<https://doi.org/10.1007/s40831-016-0087-z>
- Sakao, T. & Shimomura, Y.** (2007). *Service Engineering: a novel engineering discipline for producers to increase value combining service and product*. *Journal of Cleaner Production*, 15(6), pp. 590–604. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.05.015>
- Salem, A. H. & Deif, A. M.** (2017). Developing a Greenometer for green manufacturing assessment. *Journal of Cleaner Production*, 154, pp. 413–423. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.196>
- Shadbegian, R. J. & Gray, W. B.** (2005). Pollution abatement expenditures and plant-level productivity: A production function approach. *Ecological Economics*, 54(2–3), pp. 196–208. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.12.029>
- Shin, D., Curtis, M., Huisingh, D. & Zwetsloot, G. I.** (2008). Development of a sustainability policy model for promoting cleaner production: a knowledge integration approach. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.06.006>
- Sreejith, P. & Ngoi, B. K.** (2000). Dry machining: Machining of the future. *Journal of Materials Processing Technology*, 101(1–3), pp. 287–291. doi:[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00445-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00445-3)

- Stock, T. & Seliger, G.** (2016). Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0. *Procedia CIRP*, 40(Icc), pp. 536–541. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- Sutherland, J. W., Adler, D. P., Haapala, K. R. & Kumar, V.** (2008). *A comparison of manufacturing and remanufacturing energy intensities with application to diesel engine production*. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 57(1), pp. 5–8. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.004>
- Sutherland, J. W., et al.** (n.d.). Environmentally benign manufacturing: status and vision for the future. Recuperado de: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.515.5597&rep=rep1&type=pdf>
- Tan, J. & Zailani, S.** (2009). *Green value chain in the context of sustainability development and sustainable competitive advantage*. *Global Journal of Environmental Research*, 3(3), pp. 234–245. Recuperado de: <https://pdfs.semanticscholar.org/0348/309593a8473e32dd742f747eb19689c7ae7b.pdf>
- Tao, F., Cheng, Y., Zhang, L. & Nee, A. Y. C.** (2017). Advanced manufacturing systems: socialization characteristics and trends. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(5), pp. 1079–1094. doi:<https://doi.org/10.1007/s10845-015-1042-8>
- Thakur, A. & Gangopadhyay, S.** (2016a). *Dry machining of nickel-based super alloy as a sustainable alternative using TiN/TiAlN coated tool*. *Journal of Cleaner Production*, 129, pp. 256–268. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.074>
- Thakur, A. & Gangopadhyay, S.** (2016b). *State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 100, pp. 25–54. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.10.001>
- Toffel, M. W.** (2004). *Strategic Management of Product Recovery*. *California Management Review*, 46(2), pp. 120–141. doi: <https://doi.org/10.2307/41166214>
- Tran, T. Van, Schnitzer, H., Braunegg, G. & Le, H. T.** (2017). Development of an optimization *mathematical model by applying an integrated environmental indicator for selecting alternatives in cleaner production programs*. *Journal of Cleaner Production*, 154, pp. 295–308. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.04.009>
- US EPA, O.** (n.d.). *Lean Manufacturing and the Environment: Research on Advanced Manufacturing Systems and the Environment and Recommendations for Leveraging Better Environmental Performance*. Recuperado de: <https://www.epa.gov/lean/lean-manufacturing-and-environment-research-advanced-manufacturing-systems-and-environment-and>
- Vieira, L. C. & Amaral, F. G.** (2016). Barriers and strategies applying Cleaner Production: a systematic review. *Journal of Cleaner Production*, 113, pp. 5–16. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.11.034>

Wang, D., Wu, S., Li, C. & Zhu, J. (2013). Efficient and Clean Production Practice of Large-Scale Sintering Machine. *ISIJ International*, 53(9), pp. 1665–1672. doi:<https://doi.org/10.2355/isijinternational.53.1665>

Westkämper, E. (2008). Manufuture and Sustainable Manufacturing. In *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier* (pp. 11–14). Londres, Inglaterra: Springer London. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-84800-267-8_3

Womack, J. P. & Jones, D. T. (1997). Lean Thinking—Banish Waste and Create Wealth in your Corporation. *Journal of the Operational Research Society*, 48(11), pp. 1148–1148. doi:<https://doi.org/10.1038/sj.jors.2600967>

Womack, J. P. & Jones, D. T. (2005). *Lean Solutions : How Companies and Customers Can Create Value and Wealth Together*. Free Press. Free Press. Recuperado de: <https://www.lean.org/WhoWeAre/NewsArticleDocuments/ACF61A0.pdf>

Womack, J. P., Jones, D. T. & Roos, D. (2008). *The Machine That Changed the World*, (June), 352. Recuperado de: http://books.google.com/books?id=dP_c3EzWUusC&pgis=1

Wu, P. & Low, S. P. (2013a). *Lean and Cleaner Production*. Berlin, Alemania: Springer Berlin Heidelberg. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-642-42062-7>

Wu, P. & Low, S. P. (2013b). Modelling the Lean Production Philosophy. In *Lean and Cleaner Production* (pp. 47–65). Berlin, Alemania: Springer Berlin Heidelberg. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-642-42062-7_3

Young, P., Byrne, G. & Cotterell, M. (1997). Manufacturing and the environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13(7), pp. 488–493. doi:<https://doi.org/10.1007/BF01624609>

Zhang, F. & Xie, J. (2017). Green Manufacturing Process of Shougang Jingtang Steel Plant (pp. 17–29). doi:https://doi.org/10.1007/978-3-319-52333-0_2

Zhao, F., Ogaldez, J. & Sutherland, J. W. (2012). Quantifying the water inventory of machining processes. *CIRP Annals- Manufacturing Technology*, 61(1), pp. 67–70. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.027>

Zhou, B. (2016). Lean principles, practices, and impacts: a study on small and medium-sized enterprises (SMEs). *Annals of Operations Research*, 241(1–2), pp. 457–474. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-012-1177-3>

II

ARQUITECTURA ECO-HOLONICA PARA MODELAR LA TECNOSFERA DESDE LA PERSPECTIVA DE LOS MODELOS BIOINSPIRADOS

María Jesús Ávila Gutiérrez y Juan Ramón Lama Ruiz

1. Introducción

El estudio de los seres vivos, el entorno que les rodea y los ecosistemas ha sido durante mucho tiempo ejemplo y fuente de inspiración para muchos investigadores desde las formas microscópicas hasta el complejo comportamiento de individuos, grupos y comunidades, este hecho se conoce como biomímesis (Torben, 2009; Vincent, 2009) (imitar la naturaleza a la hora de reconstruir los sistemas productivos humanos, con el fin de hacerlos compatibles con la biosfera).

La naturaleza no solo nos ha servido de inspiración, sino que las características de sus estructuras y materiales, la eficiencia de sus procesos, el aprovechamiento de sus recursos o la optimización de sus funciones, ha sido objeto de análisis para tratar de conseguir su copia y simulación, orientadas hacia el futuro de nuevas fuentes de energía, sistemas técnicos sensibles e inteligentes, robótica avanzada y productos innovadores. La naturaleza continuamente está en evolución y ha resuelto situaciones de eliminación y nuevo paso de especies e individuos de una manera sostenible y efectiva, durante millones de años. Las estrategias de mutación, emergencia, recombinación, derivación, simbiosis o mutualismo, dan desde la naturaleza ideas a los ingenieros de diseño para transformar los sistemas técnicos, manifestando nuevas soluciones, combinando y reordenando las ya existentes, alterando su entorno o condiciones de uso o creando alianzas y cooperación.

En este apartado se hace una exposición del diseño bioinspirado para conducir la ingeniería bioinspirada hacia el diseño de procesos de fabricación de sostenibilidad tomando a los sistemas naturales como referencia. La propuesta de diseño de sistemas técnicos bio-inspirado constituye una puesta en valor de la soluciones sostenibles al capitalizar en el proceso de diseño el Know-how acumulado por la naturaleza , a lo largo de millones de años de forma sostenible como se encuentra en los ecosistema productivos naturales en los que todo se recicla, el flujo de materia en los ciclos tróficos se mantiene mediante energías renovables y las sustancias que se incorporan son inocuas y no tóxicas, todo ello se lleva a cabo de la forma más eficiente, optima y adaptada al contexto.

El diseño bioinspirado desde una perspectiva general plantea un conjunto de principios ontológicos derivado de la soluciones observadas en los sistemas naturales

para su articulación en la configuración de soluciones de diseño de productos o sistemas técnicos.

Muchas son las investigaciones sobre los enfoques bioinspirados asociados a los sistemas técnicos entre algunas encontramos el modelado de los sistemas técnicos biológicos para la reconfiguración dinámica de los mismos (Ueda, Kito, & Fujii, 2006) o su comportamiento autónomo y cooperativo mediante agentes inteligentes (Ueda *et al.*, 2006); comparación de los principales paradigmas de fabricación naturales como son los biónicas, fractales y holónicos (Tharumarajah, 2003), y modelos inspirados en la auto-organización para dotar a los sistemas técnicos con capacidad de adaptación al ambiente.

La biomimesis (Torben, 2009; Vincent, 2009; Wehrspann, 2011) es la base de los modelos bioinspirados ya que trata de “imitar a la naturaleza (Bios – Vida, Mímesis – Imitar)”.

En el momento en el que se presenta un problema, se busca una situación similar en un entorno natural, analizando las relaciones entre los elementos implicados, se analiza la viabilidad de la solución expresada en dicho ambiente y se extrapola para cumplir el requerimiento técnico o procesal buscado.

2. Enfoques bioinspirados

Existen diferentes enfoques de diseño biomimético (Pandremenos, Vasiliadis, & Chryssolouris, 2012), cada uno con ventajas e inconvenientes inherentes. Estos enfoques pueden tener diferentes resultados en términos de sostenibilidad global. Mientras que algunos autores emplean el biomimetismo como un método para aumentar la sostenibilidad de lo que han creado (Nosonovsky & Bhushan, 2012; Zari, 2006), el biomimetismo también se utiliza en algunos casos simplemente como una fuente de innovación (Rawlings, Bramble, & Staniland, 2012).

En cuanto a trabajos relacionados con los enfoques bioinspirados en fabricación podemos encontrar aplicaciones a nivel de cadena de suministro sostenible (Sivakumar, Balasubramanya, & Sundaresan, 2012), en el ámbito de la robótica (Habib, 2011), nanotecnología (Sleytr, Schuster, & Pum, 2003), y modelado 3D para fabricación rápida (Rapid Manufacturing) (Chen, 2007) y una amplia revisión de los enfoques bioinspirados para los sistemas de producción evolutivos enfocado a la auto-organización formulado por Ferreira en su tesis doctoral recogida en (Ferreira, 2013).

Dentro de los marcos de trabajo sostenibles que incorpora la biomimesis se encuentra la ecología industrial que incluye modelos esto modelos provenientes de cadenas tróficas y de enfoques como Cradle to Cradle C2C (de la cuna a la cuna) o de ciclo cerrado y modelos a nivel de organismos provenientes de la teoría de los sistemas vivientes como veremos en apartados posteriores.

En la Figura 1, se recoge la evolución de las publicaciones en los últimos años de distintos marcos de trabajo o paradigmas para la sostenibilidad de fabricación que incluyen un enfoque de biomimesis que se pasa a explicar en los siguientes apartados.

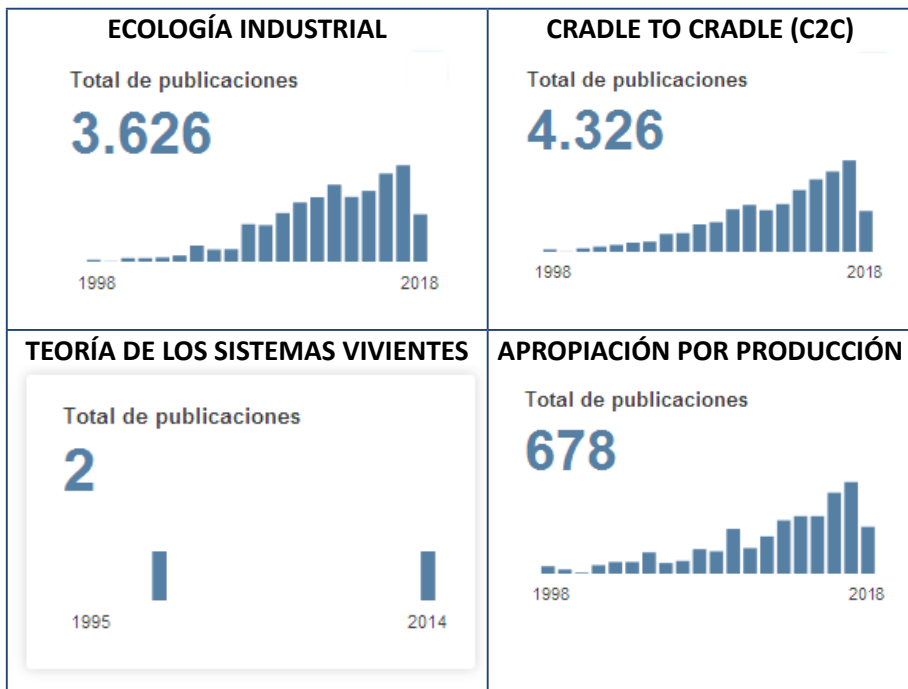


Figura 1. Publicaciones de Paradigmas de fabricación Bio-inspirados.

Fuente: elaboración propia.

De entre los distintos paradigmas encontramos la teoría de los sistemas vivientes como enfoque o paradigma poco aplicado, lo que puede suponer un enfoque potencial a estudiar para su aplicación en los sistemas técnicos.

2.1. Ecología industrial

La Ecología Industrial (EI) (Seoanez, 1998) es un marco de trabajo interdisciplinario que intenta asimilar el funcionamiento de los ecosistemas industriales al de los naturales, con una interrelación entre industrias, el medio social y natural una tendencia a cerrar el ciclo de materia y a hacer eficientes los procesos internos. Esta relación entre industrias plantea cerrar el ciclo de materia y, por lo tanto, obtener un nivel cero de residuos. Esto lo consigue en parte usando los subproductos y residuos de una industria como materia prima de otras, como pasa en los ecosistemas naturales (Despeisse, Ball, Evans, & Levers, 2012).

La Ecología Industrial (EI) pretende comprender los principios de organización de los ecosistemas naturales y utilizar dichos principios para la reestructuración de la base industrial. Su objetivo es la optimización en el manejo de flujos de materiales y

energía, utilizando de forma más eficiente los recursos (Ayres & Ayres, 2002; Erkman, 1997). Finalmente, otros estudios tratan de establecer una analogía entre los ciclos técnicos y naturales (Despeisse *et al.*, 2012; Dijkema & Basson, 2009; Isenmann, 2003a; Tilley, 2003).

En la Figura 2 se muestra la analogía de los sistemas naturales y técnicos en cuanto a flujo de materia centrándose en el procedimiento de reciclaje natural que se lleva a cabo en la naturaleza, sobre los sistemas industriales. Implica que los residuos o salidas de materia de unas actividades sean las entradas para otros (residuo = alimento). Con respecto a la energía, debe fluir asemejándose a las cadenas tróficas en las interacciones entre organismos, resultando la energía procedente del sol la única entrada al sistema (Aguayo, Marcos, Sánchez, & Lama, 2007).

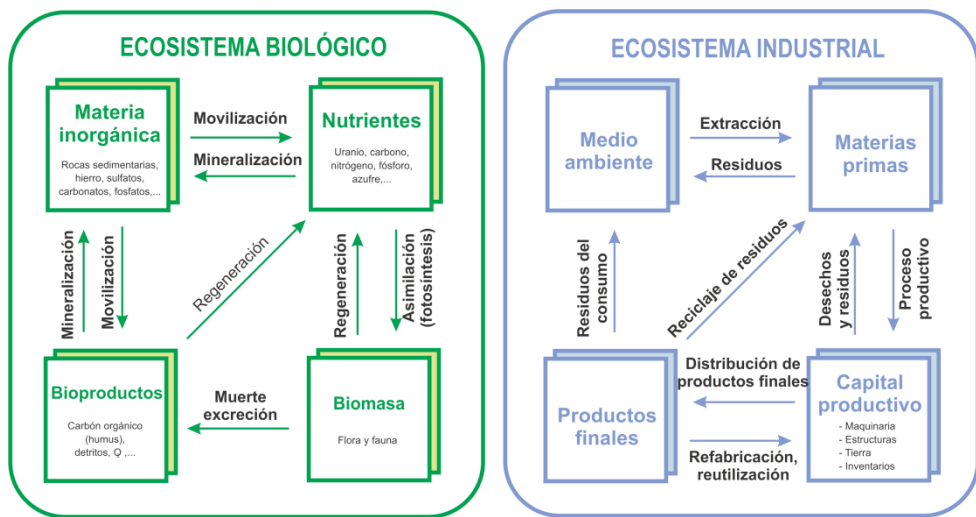


Figura 2. Comparación de los ciclos de flujo de materiales entre un ecosistema natural y un Ecosistema industrial.

Fuente: elaboración propia. Adaptado de (Mena, Chamorro, & Miranda, 1992).

Con el propósito de establecer una analogía entre los sistemas técnicos y naturales a nivel de entidades, se formula una propuesta que queda recogida en la Tabla 1.

Entre los ámbitos de estudio clásicos de la ecología industrial (Ayres & Ayres, 2002; Berkel, Willems, & Lafleur, 1997; Despeisse *et al.*, 2012; Erkman, 1997; Isenmann, 2003b, 2003a; Pakarinen, Mattila, Melanen, Nissinen, & Sokka, 2010; Tilley, 2003) se encuentran el análisis de flujo de materia (AFM) (Burström, 1999; Sendra, Gabarrell, & Vicent, 2007), substancias (AFS) (Kleijn, Huele, & Van Der Voet, 2000; Olsthoorn & Boelens, 1998; van der Voet, 1996), flujo de energía (S. Wang, Cao, & Chen, 2017) y agua en los ecosistemas industriales, análisis de ciclo de vida, etc.

Tabla 1. Puntos centrales de la analogía.

Concepto	Ecosistema Natural	Ecosistema Industrial
Unidades de estudio	Biosfera Porción de tierra habitada por la vida	Sistema Técnico
	Ecosistema Un nivel de estudio ecológico que incluye a los organismos en un área con sus factores abióticos con los cuales interacciona. Una comunidad y su ambiente físico	Ciudades, Distritos industriales
	Comunidad Todos los organismos que no habitan en un área particular. Un conjunto de diferentes especies viviendo juntas con potencial interacción	Edificios, Carreteras, Complejos industriales en interacción
	Población Un grupo de individuos de una misma especie que viven en un área geográfica particular	Complejo industrial, Parque industrial
	Organismo Un ser vivo completo	Planta industrial
	Sistema de órganos Un grupo de órganos que lleva a cabo una o más funciones	Conjunto de Máquinas
	Órganos Centro especializado de la función de un cuerpo compuesto de diferentes tipos de tejidos	Máquina unidad
	Tejidos Un grupo de células con una estructura y función común	Estructura soporte de la máquina
	Células Nivel más bajo de la organización donde aparecen las propiedades de la vida	Componentes internos de la máquina
	Orgánulos Uno o varios cuerpos con funciones especializadas	Funciones de las máquinas, elementos o piezas de un conjunto
	Moléculas	Procesos básicos de la máquina

Concepto	Ecosistema Natural	Ecosistema Industrial
Grado de independencia	El organismo realiza actividades independientes	La planta industrial realiza muchas actividades esencialmente independientes
Uso de recursos	Utiliza energía y la transforma en materia	Gasta energía y transforma materiales diversos para su uso
Subproductos	Genera residuos energéticos y materiales	Emite energía y genera residuos sólidos
Producción	Se reproduce en su misma especie	Construye: no se reproduce pero genera productos no orgánicos
Sensibilidad al exterior	Responde fácil a estímulos externos	Responde a estímulos externos: precio, consumo, recursos disponibles,...
Ciclo de vida	Tiene un tiempo de vida finito	Tiene un tiempo de vida útil
Utilidad de los recursos	Los recursos son utilizados para respiración, excreción y crecimiento	Se puede enfocar al análisis de ciclo de vida de un producto individual, o analizar la reintegración de los materiales a la biosfera

Fuente: elaboración propia. Adaptado de (Shu, Ueda, Chiu, & Cheong, 2011).

La EI es una disciplina que va ampliándose y redefiniéndose desde su creación. Actualmente también incluye aspectos como la responsabilidad social corporativa, el consumo responsable, la producción y transporte sustentable, la economía ambiental y ecológica, etc. La EI puede ser aplicada en la agricultura, en el turismo, en la economía, en la gestión de la energía y en muchos otros campos. Este dinamismo implica que cada vez sea más necesario aplicar nuevas herramientas (Aguayo González, Peralta Álvarez, Lama Ruiz, & Soltero Sánchez, 2011) para acercarse a ella, tales como: estudio de sistemas complejos, metodología de redes sociales, estudio de escenarios, teoría de sistemas ecológicos, etc.

Especial atención ha adquirido el enfoque bio-inspirado de sistemas técnicos en los niveles de eco-parques industriales, eco-industrias y eco-procesos de fabricación (Liwarska-Bizukojc, Bizukojc, Marcinkowski, & Doniec, 2009), siendo concebidos a partir de analogías existentes en las redes tróficas de los ecosistemas, así como el flujo de energía, agua y sustancias desde principios de ciclicidad, toxicidad (inocuidad) y eficiencia o eco-efectividad.

Desde el punto de vista natural en las cadenas tróficas (Borrett, Carter, & Hines, 2015), dentro de los ecosistemas existen organismos que pueden ser clasificados como productores, consumidores o descomponedores de primer o segundo orden.

Si adoptamos un punto de vista técnico nos encontramos con los ecosistemas industriales formados por organismos que son las plantas industriales productoras, consumidoras o descomponedoras de primer o segundo orden, por lo que los procesos naturales llevados a cabo por los organismos en los ecosistemas naturales pueden verse reflejados en los ecosistemas industriales y las relaciones entre las diferentes plantas industriales que se encuentran dentro de ese ecosistema técnico como se recoge en la Figura 3.

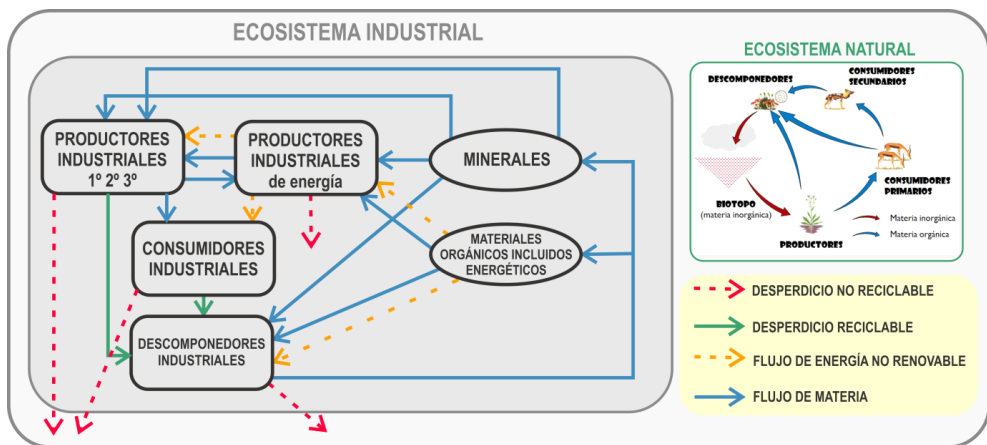


Figura 3. Cadena trófica del sistema técnico.

Fuente: elaboración propia. Adaptado de (Liwarska-Bizukojc *et al.*, 2009).

Detrás del enfoque de ecosistemas técnicos basado en redes tróficas, tiene un especial interés el análisis de relaciones intra-específica entre seres vivos (procesos o plantas industriales) e inter-específicas entre seres vivos de distintas especies existentes en las distintas comunidades del ecosistema. Entre las relaciones inter-específicas tiene un especial interés las relaciones de simbiosis (Zhang, Zheng, & Fath, 2014). Además, cabe destacar que existen herramientas de gran interés para el análisis metabólico y modelado de los ecosistemas conocido como ENA (Ecological Network Analysis) (Fath, Scharler, Ulanowicz, & Hannon, 2007; Ulanowicz, 2004).

Existen publicaciones de gran interés en revistas de gran impacto para la ciencia e ingeniería de la fabricación tal y como es la revista ASME, tratando los principios ecológicos para mejorar la ciclicidad de materia en la redes de fabricación (Layton, Bras, & Weissburg, 2016).

Muchas son las métricas que se han desarrollado para entender la relación entre la estructura y el comportamiento de los sistemas ecológicos (Bascompte & Jordano, 2007; Fath & Halnes, 2007). Las medidas estructurales y las métricas utilizadas con mayor frecuencia por los ecólogos pueden calcularse utilizando matrices binarias de las estructuras tal y como se muestra en la Figura 4.

Todos los cálculos se basan en si existe o no relación tomando como datos “ceros” y “unos” y completando las relaciones entre los actores que se relacionan.

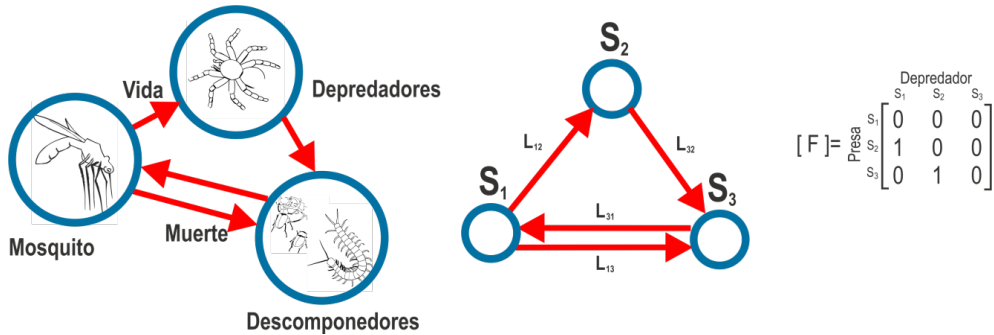


Figura 4. Ecosistema (izquierda), relaciones (centro) y representación matricial(derecha).

Fuente: elaboración propia.

Las siguientes métricas son las que normalmente utilizan los ecólogos para llevar a cabo las evaluaciones de las cadenas tróficas (en su término en inglés Food Chain o FW) (Briand, 1983; J.H. & Cherrett, 1989; Ontoya, Montoya, & Sol, 2002; Power, 2007; Schoener, 1989):

- **Número de especies o actores (N).** El número total de actores en una red, a veces se denomina “riqueza de especies”. Representada por el número de filas y columnas de la matriz de la cadena trófica [F].
- **Número de enlaces (L).** El número de enlaces directos o interacciones entre los actores en una red. Representada por el número total de interacciones no nulas en la matriz [F].
- **Densidad de enlaces (L_d).** La relación del número total de enlaces y la cantidad total de agentes en una red.
- **Número de presas (n_{presas}).** Actores que son comidos por al menos otro. Representado por el número de filas no nulas en la matriz [F]. “Presa” en una red industrial transfiere material o energía para ser utilizado por otros; es decir, que son los **productores**.
- **Número de depredadores (n_{depredadores}).** Actores que comen al menos a otro. Representado por el número de columnas diferentes de cero en la matriz [F]. “Depredadores” en una red industrial reciben materia o energía de los demás; es decir, que son los **consumidores**.
- **Relación presa-depredador (P_r).** La relación del número de actores comidos por otro con el número de actores que se alimentan de otro. Es decir, la proporción de presas-depredadores o productores-consumidores. Este es el número de filas no nulas de la matriz [F] entre el número de columnas no nulas.

- **Fracción depredador Especializada (P_s).** El número de depredadores (consumidores) comiendo sólo un actor, dividido por el número total de consumidores en la red. Esta es la suma del número de columnas con sólo un elemento distinto de cero en la matriz [F] dividido por el número total de columnas con elementos no nulos.
- **Generalización (G).** El número promedio de presas comidas por los depredadores en una red, lo que corresponde a la media de los productores interaccionando con un consumidor en una red industrial. Generada por la suma de las columnas en una matriz [F] y dividiendo esta cifra por el número de columnas con elementos no nulos (el número de depredadores / consumidores).
- **Vulnerabilidad (V).** El número promedio de depredadores por presa en una red, que corresponde al promedio de consumidores interactuando con un productor en una red industrial. Generada por la suma de las filas en una matriz [F] y dividiendo por el número total de filas con elementos no nulos (el número de presas/ productores).
- **Ciclicidad ($\lambda_{\text{máx}}$).** Representa una medida de la fuerza y presencia de vías cíclicas en el sistema. Se obtiene encontrando el valor propio real máximo de la transpuesta de la matriz [F].

Las fórmulas para estos parámetros vienen representadas por ecuaciones que relacionan los actores filas y columnas. Todos los cálculos representados por las ecuaciones se basan en información binaria de si existe o no un enlace entre dos actores en la matriz, lo que hace que estas métricas sean muy adecuadas para su aplicación a redes de fabricación, ya que elimina la necesidad de la obtención de datos de materiales y energía a menudo propiedad interna de los fabricantes.

En los ecosistemas, los descomponedores (lombrices, hongos, y bacterias, por ejemplo) son responsables de la descomposición de la materia orgánica muerta y la distribución de los nutrientes al sistema, a menudo conocidos como los “recicladores de la biosfera.” Esta descomposición y redistribución crean una estructura fija cíclica que puede medirse con la ciclicidad como métrica ecológica. Estas métricas ecológicas se puede aplicar a sistemas técnicos industrial, específicamente, a los parques industriales (EIP) (Schoener, 1989).

2.2. Manufactura en ciclo cerrado o cradle to cradle (c2c)

Este enfoque tiene como nivel de bioinspiración el ecosistema, y distintas dimensiones como procesos, función, material y sustancia.

El paradigma C2C (Cradle to Cradle) se inicia con la publicación en 2002, por los autores Michael Braungart y William McDonough, del libro Cradle to Cradle:

rediseñando la forma en que hacemos las cosas (William. McDonough, 2002) y más recientemente con su publicación “El ciclo ascendente. Hacia el diseño sostenible para la abundancia” (W. McDonough & Braungart, 2013). Posteriormente a la introducción del término C2C han aparecido contribuciones de gran interés desde el punto de vista del diseño como las de Aguayo *et al.* (Aguayo González *et al.*, 2011) en su publicación “Ecodiseño: ingeniería sostenible de la cuna a la cuna (C2C).

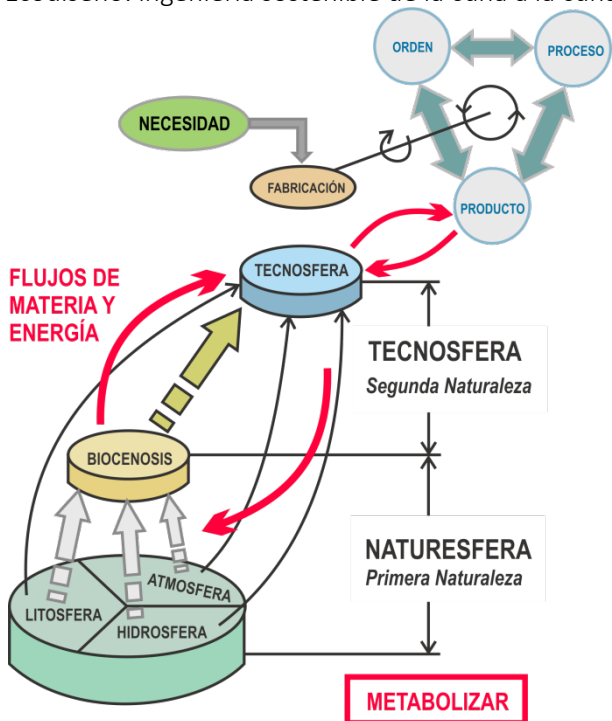


Figura 5. Metabolismo industrial sobre la biosfera y la tecnosfera.

Fuente: elaboración propia.

El planteamiento de C2C tiene como objetivo que la fabricación constituya una actividad que colabora con la naturaleza creando valor ambiental, ofreciendo una oportunidad para regenerar el daño ocasionado a la biosfera, el posicionamiento de este paradigma frente a otras propuestas de sostenibilidad ambiental queda recogida en la Figura 6 (Aguayo González *et al.*, 2011) a través del concepto de ecoefectividad.

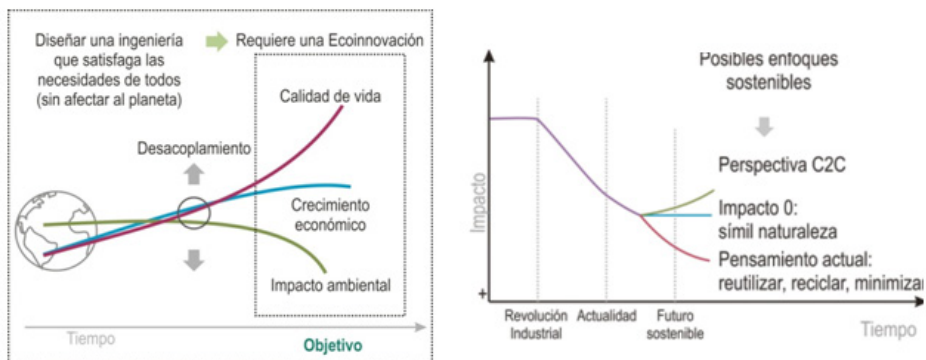


Figura 6. Planteamiento del paradigma de diseño y fabricación bajo C2C.

Fuente: elaboración propia. Adaptado de (Aguayo González et al., 2011).

Uno de los conceptos fundamentales del marco de trabajo de C2C frente a otros paradigmas en el de Eco-efectividad “Hacer la cosas correctas maximizando los efectos positivos” frente al de Eco-eficiencia que es “hacer la cosas bien minimizando los efectos negativos” (Salguero, Gonzalez, Lama, & Peralta, 2014).

En el marco de Cradle to Cradle (William. McDonough, 2002) en diseño y fabricación se establecen dos metabolismos de plantas, procesos y productos industriales en base a los tipos de nutrientes como puede verse en la Figura 7, estos se clasifican en nutrientes biológicos que determinan un metabolismo biológico sobre la biosfera que permite integrarlo en los ciclos biogeoquímicos de degradación, los otros tipos de nutrientes son los técnicos que determinan el metabolismo técnico sobre la tecnosfera que degrada los materiales mediante procesos de infrarreciclado y suprarreciclado en la plantas de manufactura inversa reincorporándolos a la tecnosfera.

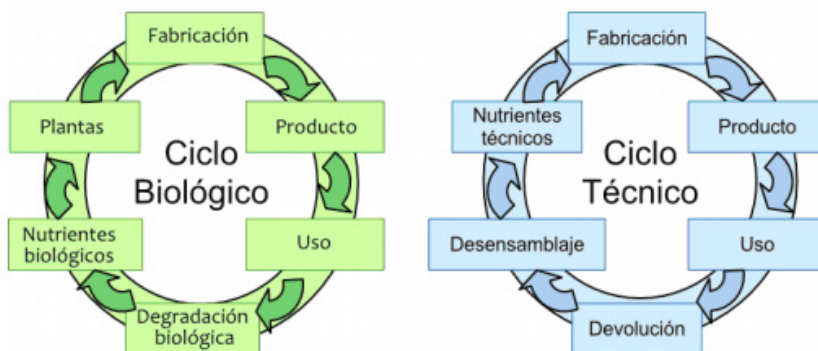


Figura 7. Nutrientes y metabolismos asociados al marco de Diseño y Fabricación C2C.

Fuente: elaboración propia. Adaptado de (William. McDonough, 2002).

2.3. Modelo de apropiación por producción o fabricación

Proveniente de análisis socio-históricos (Toledo, 2013) se ha formulado un modelo que recoge la forma en que las sociedades se han apropiado a lo largo de la historia de los recursos naturales para su transformación que se recoge en la Figura 8.

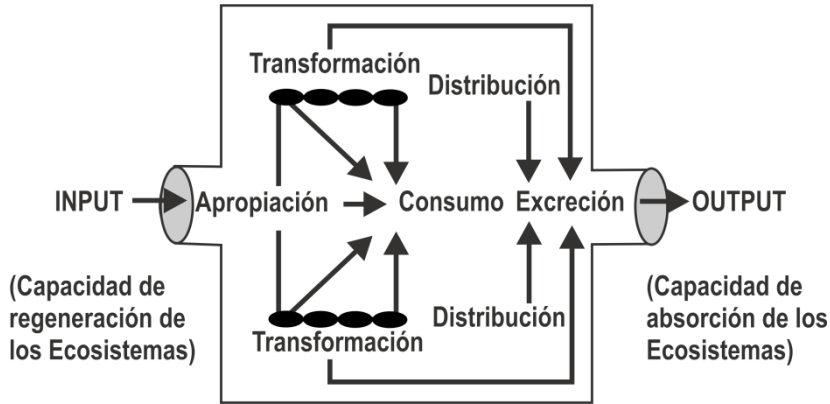


Figura 8. Proceso general del metabolismo (de materia y energía) entre sociedad y naturaleza.

Fuente: elaboración propia. Adaptado de (Toledo, 2013).

El metabolismo entre la naturaleza y la sociedad contiene dos dimensiones o esferas: una material (visible) y otra inmaterial (invisible). El metabolismo social comienza cuando los seres humanos agrupados en la sociedad se apropian de materiales y energías de la naturaleza (input) y finaliza cuando depositan desechos, emanaciones o residuos en los espacios naturales (output).

Entre esta entrada y salida ocurren además unos procesos por medio de los cuales las energías y materiales apropiados circulan, se transforman y terminan consumiéndose como puede verse en la Figura 8. Por tanto, el proceso general del metabolismo social tiene tres tipos de flujos de energía y materiales: los flujos de entrada, los flujos interiores y los flujos de salida. El proceso metabólico se representa por cinco fenómenos que son: la apropiación (A), la transformación (T), la circulación (C), el consumo (Co) y la excreción (E).

La **apropiación (A)** constituye la forma primaria de intercambio entre la sociedad humana y la naturaleza. Mediante A, la sociedad se nutre de materiales, energías, agua y servicios que los seres humanos y sus artefactos requieren como individuos biológicos (energía endosomática) y como conjunto social (energía exosomática) para mantenerse y reproducirse. Este proceso lo realiza siempre una unidad de apropiación, la cual puede ser una organización, una planta industrial, una comunidad, o un solo individuo.

El **proceso de transformación (T)** implica todos aquellos cambios producidos sobre los productos extraídos de la naturaleza, los cuales ya no son consumidos

en su forma original. En sus formas más simples, T incluye la transformación de la materia (metalurgia, industria nuclear, biotecnología, petroquímica, nanotecnología, etcétera).

El **proceso de circulación (C)** aparece en el momento en el que las unidades de apropiación dejan de consumir todo lo que producen y de producir todo lo que consumen. Aparece el intercambio económico.

En el **proceso metabólico del consumo (Co)** se ve envuelta toda la sociedad, independientemente de su posición en la cadena metabólica. Este proceso puede ser entendido a partir de la relación que existe entre las necesidades del ser humano, social e históricamente determinados, y los satisfactores proporcionados por medio de los tres primeros procesos (A+T+C).

De nuevo, en el **proceso de excreción (E)**, que es el acto por el cual la sociedad humana arroja materiales y energía hacia la naturaleza (incluyendo basuras, emanaciones, gases, sustancias y calor), también se ve envuelta toda la sociedad y todos los procesos metabólicos.

El modelo propuesto tiene interés para el análisis del metabolismo social e industrial y su caracterización en los procesos industriales, agrarios y del metabolismo urbano.

2.4. Teoría de los sistemas vivientes

El planteamiento de los sistemas de fabricación basados en los sistemas vivientes trata de abordar el diseño de productos o procesos de fabricación en la planta industrial como una caja de cristal en base a la analogía con los procesos metabólicos que se dan en el interior de los seres vivos. Actualmente no existe ninguna publicación de la teoría de los sistemas vivientes aplicado a los sistemas de fabricación. Esto hace que tenga un interés especial estudiar esta teoría y ver su aplicabilidad a los sistemas de fabricación para su proyección en la arquitectura Eco-holónica que se mostrará en apartados posteriores.

La teoría de los sistemas vivientes (en su término en inglés Living System Theory:LST) se puede considerar como un ejemplo de la teoría de los sistemas vivos de Bertalanffy (Von Bertalanffy, 1969). Es un marco conceptual, desarrollado para integrar los resultados de los estudios científicos y teóricos en biología, psicología, neurología, ciencias sociales, economía y gestión. LST sirve como teoría unificada de la ciencia que se ocupa de la estructura jerárquica de los sistemas vivos (Miller, 1978). Esta teoría también es aplicable a entidades no vivientes ya que hay analogías comparables entre sistemas vivos y no vivos (Ham, 2015; Stephenson, 2013; G. X. Wang, Luo, Pei, Yan, & Shang, 2016).

Sobre la Teoría de los sistemas vivos de Miller se elabora toda una teoría cuya parte más interesante para nosotros se resume en la 0. Se trata de un esquema general o

plantilla en la que puede encajar un posible modelo de un sistema viviente, desde una célula hasta el mundo entero. Esto no quiere decir que obligatoriamente haya que ajustarse a este esquema cuando se modeliza un sistema viviente, sino que dependerá de los objetivos para los que se construya el modelo. En todo caso, es una ayuda para no olvidar algún aspecto importante en el modelado de sistemas.

Tabla 2. Los veinte subsistemas críticos de la Teoría de los Sistemas Vivientes de Miller (Miller, 1978).

Localización del proceso	Tipo de proceso	Subsistema/Subprocesos
<i>Etapa de entrada al sistema</i>	Información	Transductor de entrada
	Materia-Energía	Ingestor
<i>Etapa a través del Sistema</i>	Información	Transductor interno
		Canal y red
		Decodificador
		Asociador
		Memoria
		Decisor
		Codificador
		Temporizador
	Materia-Energía e Información	Reproductor
		Límite
	Materia-Energía	.Distribuidor
		Convertidor
		Productor
Almacén de Materia-Energía		
Motor		
Estructura		
<i>Etapa de salida del Sistema</i>	Información	Transductor de Salida
	Materia-Energía	Excretor

Cada uno de estos subsistemas y subprocesos esenciales para la vida quedan caracterizados por un símbolo como los que se encuentran representados en la

Figura 9. Estos símbolos nos permiten el modelado de cualquier tipo de sistema vivo de forma simplificada diferenciando entre los símbolos de materia-energía e información. Posteriormente al modelado, la teoría de los sistemas vivos de Miller nos permite el análisis de cada uno de los subsistemas y subprocesos que forman parte del sistema objeto de estudio.



Figura 9. Símbolos para los subsistemas de la Teoría de los Sistemas Vivos (Miller, 1978).

En relación a la teoría de los sistemas vivos no existen muchas publicaciones y puede considerarse una teoría potencial para su uso conjunto con la holónica.

3. Propuesta de arquitectura abierta eco-holónica

En este apartado formulamos una arquitectura abierta Eco-holónica distinguiendo dos aspectos que posteriormente serán desarrollados: (1) Eco-holón: donde se efectúa un esbozo (Ávila-Gutiérrez, 2017; Ávila-Gutiérrez, Aguayo-González, Marcos-Bárcena, Lama-Ruiz, & Peralta-Álvarez, 2017) de la arquitectura del holón que la configura, (2) Eco-holarquía: en la misma se expone el canon y la estrategia que constituye la holarquías de los distintos holones. Esta propuesta es en la que tendrá asiento el marco de inspiración biónico y de sostenibilidad que hemos expuesto en apartados precedentes.

3.1. Eco-holon

Un sistema holónico en general y de fabricación en particular, localizado o distribuido se integrara evolutivamente con otros holones de los ecosistemas naturales y tiene en su forma más básica una estructura y unos procesos metabólicos asociados (Ayes, 1998) , como puede verse en la Figura 10.

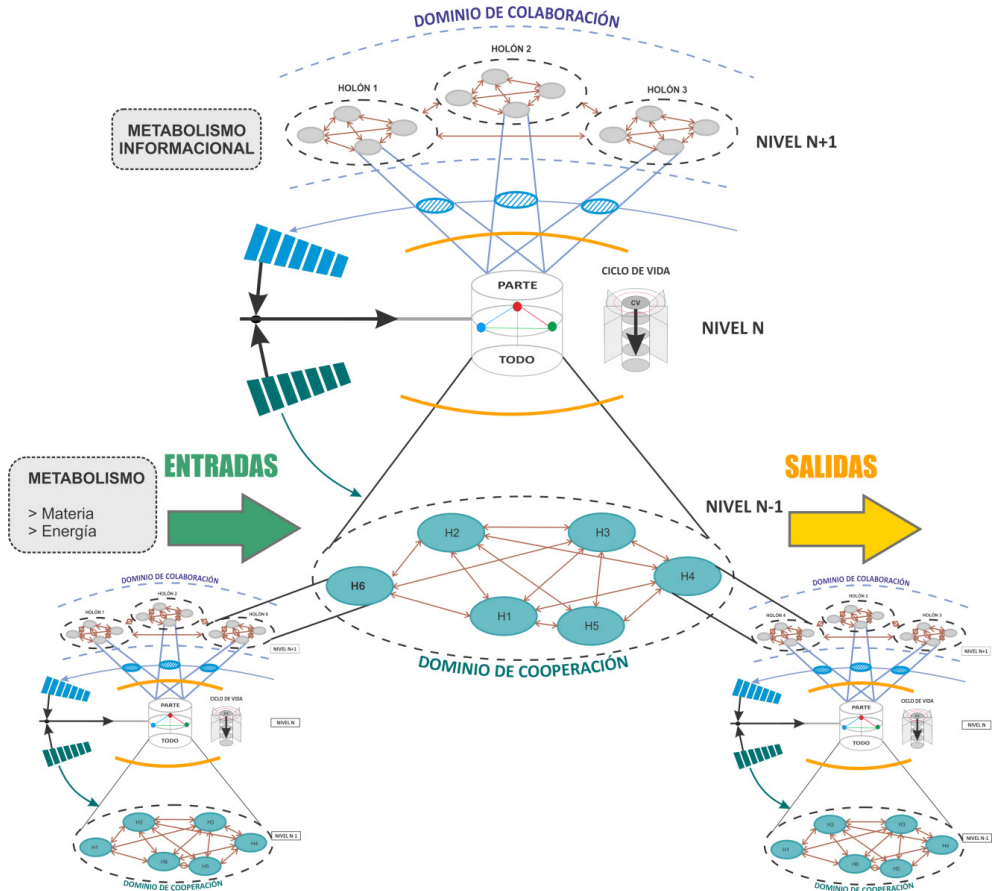


Figura 10. Arquitectura básica Eco-holónica para la fabricación localizada y distribuida sostenible. (Ávila-Gutiérrez, 2017).

Al ser la estructura ontológica holónica frente a las biológicas o fractales (Tharumarajah, 2003), de una variedad físico-bio-psico-socio-cultural (Aguayo-González, 2003; Koestler, 1967, 1983, 1989), se justifica que se proponga como la arquitectura de la variedad requerida que a través de mecanismos de filtro y amplificadores de variedad, permite la adaptación a entornos cambiantes.

Como concepto central de la arquitectura Eco-holónica tenemos al ECO-HOLON. Un Eco-holón es un holón que se encuentra en equilibrio evolutivamente estable con las holarquias del dominio de colaboración y del dominio de cooperación, mediante una acción dialéctica. Su referencia biónica sería un organismo que se encuentra integrado en forma armónica y estable en los dominios de colaboración, transformando la materia, energía e información que lo constituyen y le dan sentido como ser vivo permitiendo su co-evolución con el entorno. Todo Eco-holón posee unas propiedades que pasamos a exponer de forma sintética. Entre las propiedades más significativas de los Eco-holones podemos encontrar:

1. Un Eco-holón es TODO/PARTE (Van Leeuwen & Norrie, 1997): Un Eco-holón puede ser parte de otro Eco-holón o integrar distintos Eco-holones o Eco-holarquías en interacción armónica, constituyendo dominios de colaboración, formando entidades integradas en equilibrio dinámico multiescala y multinivel.
 - a) Como todo constituye o está formado por distintos dominios de cooperación que transforma materia energía e información, de forma situada y sensible al contexto en el que se integra a través del dominio de colaboración en base a requerimientos y oportunidades derivadas bajo la regulación y control.
 - b) Como parte el Eco-holón se integra en distintos dominios de colaboración de otros Eco-holones que forman el ecosistema holónico, en los que sensoriza obteniendo información y actúa de forma evolutivamente estable para garantizar la sostenibilidad.
2. Un Eco-holón es una entidad AUTONOMA (Fletcher, Garcia-Herreros, Christensen, Deen, & Mittmann, 2000): Posee capacidad intencional de crear y controlar la ejecución de sus propios planes o estrategias de forma autorregulada, bajo principios de vida e inteligencia.
3. Un Eco-holón es una entidad COLABORATIVA (Uljeru, Brennan, & Walker, 2002): Se integra en una o más Eco-holarquía de nivel superior denominadas dominios de colaboración, formando las Eco-holarquías de nivel $n+1$. Esta integración es una propiedad del Eco-holón en cuanto a su expresión como parte. El contexto local es fundamental para el Eco-holón, por los recursos locales materiales, valores, cultura. Estos ayudan a resolver los problemas locales por las oportunidades que ofrece.
4. Un Eco-holón es una entidad COOPERATIVA (Fletcher *et al.*, 2000): Integra otros Eco-holones y procesos en el nivel $n-1$ en el que un conjunto de entidades que realizan conjuntamente planes aceptables para desarrollar una función. De la cooperación se derivan propiedades emergentes en el nivel $n-1$. Es una propiedad del Eco-holón en cuanto a todo.
5. Un Eco-holón es AUTOASERTIVO (Aguayo *et al.*, 2007): Está dotado de capacidad de imponer ante otros Eco-holones formas de comportamiento e interacción, ideas, criterios o pensamientos para desarrollar unos planes. La autoasertividad es una manifestación del carácter autopoietico que tienen los Eco-holones
6. El Eco-holón es ADAPTATIVO y se AUTOREGULA (Leitão & Restivo, 2006): Está dotado de capacidad de cambiar su modo de cooperación, colaboración y autoasertividad para desarrollar una función confiriéndole resiliencia. Puede ser interna o externa del holón. Propiedades derivadas de la autorregulación son la resiliencia y comportamiento autoregenerativo, que evite la destrucción de

los ecosistemas en que opera. Estas estrategias pueden establecerse mediante principios de la vida, CAS, variedad de Ashby y enfoques top-down y bottom up.

7. El Eco-holón es PRODUCTO/PROCESO (Baïna, Panetto, & Morel, 2009; Bajic & Chaxel, 1997; Presley & Liles, 2001; Tonshoff, Winkler, & Aurich, 1994): Un holón es una entidad integrada por otros Eco-holones (procesos) como todo, que transforma material, energía e información, y los procesos que se dan en los dominios de cooperación, junto a sus actuaciones o puesta en práctica en los dominios de colaboración. Esto determinan que el Eco-holón como PRODUCTO de la interacción de los dominios de cooperación (Eco-holón como todo) y colaboración (Eco-holón como parte) sea una entidad dinámica y en continua evolución adaptativa desde la resiliencia.
 - a. HOLARQUIA (Clegg, 2007; Hsieh, 2008; Van Leeuwen & Norrie, 1997). Conjunto de Eco-holones que constituyen un dominio de Cooperación en el Eco-holón como todo para transformar materia, energía e información o el Dominio de colaboración en el que se integra el Eco-holón como parte, formando dominios de cooperación de otros Eco-holones. El estudio de las Eco-holarquías puede ser multinivel o multiescala.
 - b. EL CICLO DE VIDA DEL HOLÓN (Terzi, Panetto, Morel, & Garetti, 2007). El Eco-holón contempla las etapas del ciclo de vida, las vistas de la complejidad (estructura y flujos) y los grados de especificidad de mismo como entidad particular, parcial o general según el grado de concreción o especialización del mismo. El ciclo de vida integra el conocimiento implícito (biológico) y explícito (psicológico) que constituye la estrategia y el canon (procedimientos), mecanismos de aprendizaje y la autorregulación.
8. HOLONOMÍA. Es la forma en que un Eco-holón manifiesta y materializa los atributos Eco-holónicos confiriéndole y haciéndole ser una entidad singularizada y con identidad propia.

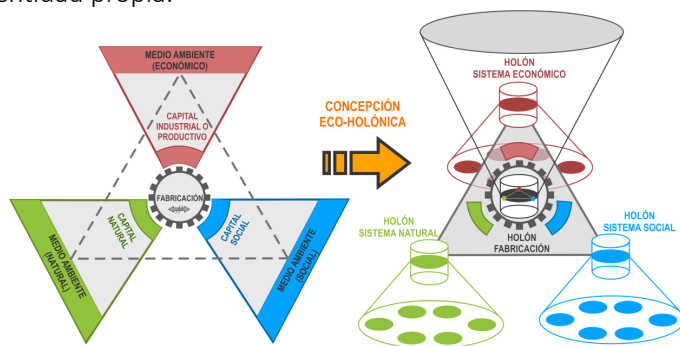


Figura 11. Concepción Eco-holónica de un sistema de fabricación para la Excelencia en Sostenibilidad.

Una vez expuestos de forma preliminar los rasgos más generales de las estructuras Eco-holónicas, como entidades de inspiración bio-psico-socio-cultural, se puede concluir que son los elementos más moleculares sobre los que poder edificar la arquitectura de sostenibilidad, dando lugar a la arquitectura Eco-holónica.

Como hemos comentado la sostenibilidad (Abdul Rashid, Evans, & Longhurst, 2008; Jayal, Badurdeen, Dillon, & Jawahir, 2010; Westkämper, 2008; Young, Byrne, & Cotterell, 1997), solo es posible implementarla desde la imitación de la naturaleza para constituir un todo sin solución de continuidad entre la tecnosfera y la naturasfera desde los principios de vida e inteligencia. Ello determina que el diseño biónico o la biomimesis (Rosa, Viganò, & Rovida, 2010; Shimomura, 2010; Torben, 2009; Vincent, 2009; Wehrspann, 2011) constituya una estrategia básica para la implementación y evaluación de la sostenibilidad y su excelencia.

El modelo propuesto, por tanto, está compuesto de distintas vistas Eco-holárquicas que a su vez están formadas por Eco-holones u otras organizaciones Eco-holónicas de menor tamaño. Cada Eco-holón es una unidad organizacional autónoma que ejecuta aquellos procesos para los cuales es más competente. Los Eco-holones cooperan entre sí a fin de que se ejecuten todos los procesos que son necesarios para producir los productos y/o prestar los servicios que le han sido encomendados.

A efectos de modelado, esta arquitectura Eco-holónica queda caracterizada en las siguientes dimensiones y niveles que se corresponden con un nivel diferente que será estudiado para encontrar los enfoques bioinspirados de los mismos:

- **Eco-Holarquía de nivel N+1:** define el DOMINIO COLABORATIVO y los requerimientos Eco-holónicos. En el ámbito de Fabricación se puede corresponder con el **Nivel macro-holónico o Cadena de suministro.**
- **Eco-Holón de nivel N:** actúa como interfaz de adaptación de la variedad Eco-holónica entre los niveles N-1 y N+1. En el ámbito de Fabricación se puede corresponder con el **Nivel meso-holónico o de Organización.**
- **Eco-Holarquía de nivel N-1:** define el DOMINIO COOPERATIVO y la competencia o capacidades Eco-holónicas. En el ámbito de Fabricación se puede corresponder con el **Nivel micro-holónico o de Sistema de Fabricación.**

Uno de los Eco-holones que constituirán la Eco-holarquía del sistema de fabricación se corresponde con el Eco-holón de diseño para la Sostenibilidad. El Eco-holón de diseño sostenible articula las soluciones bio-inspiradas para establecer el genoma o los genes “soluciones de diseño bioinspirado” en los sistemas vivientes que garantizan la variedad de los sistemas de fabricación que constituyen la tecnosfera de modo que se obtenga una sostenibilidad de calidad.

4. Conclusiones

En este trabajo se ha dado una visión de los modelos de referencia para los sistemas técnicos sostenibles bioinspirados haciendo una correspondencia entre los sistemas naturales y la tecnosfera, de modo que, el realizar la trasposición de los sistema de fabricación a sistemas técnicos naturales hacia los enfoques bioinspirados resulta de gran interés.

Esta teoría nos permite además de permitir modelar los metabolismos a través de las cadenas tróficas existentes en los ecosistemas, establecer métricas simples para poder así establecer su valoración y así naturificar la tecnosfera con el objetivo de poder acercar la naturaleza a la sociedad mediante un sistema técnico naturificado.

5. Referencias bibliográficas

Abdul Rashid, S., Evans, S. & Longhurst, P. (2008). A comparison of four sustainable manufacturing strategies. *International Journal of Sustainable Engineering*, 1(3), pp. 214–229. doi:<https://doi.org/10.1080/19397030802513836>

Aguayo-González, F. (2003). *Diseño y fabricación de productos en sistemas holónicos. Aplicación al desarrollo de un módulo holónico de diseño.*

Aguayo, F., Marcos, M., Sánchez, M. & Lama, J. R. (2007). *Sistemas Avanzados de Fabricación Distribuida.* Ra- Ma.

Aguayo González, F., Peralta Álvarez, M. E., Lama Ruiz, J. & Soltero Sánchez, V. (2011). *Ecodiseño: ingeniería sostenible de la cuna a la cuna (C2C).* RC Libros.

Ávila-Gutiérrez, M. J. (2017). *Tesis Doctoral: Arquitectura de referencia eco-holónica para ingeniería de fabricación sostenible. Una propuesta para concebir la fabricación como naturaleza.* Universidad de Cádiz. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=122203>

Ávila-Gutiérrez, M. J., Aguayo-González, F., Marcos-Bárcena, M., Lama-Ruiz, J. R. & Peralta-Álvarez, M. E. (2017). Arquitectura holónica de referencia para empresas de fabricación sostenibles distribuidas. *DYNA*, 84(200), 160. doi:<https://doi.org/10.15446/dyna.v84n200.53095>

Ayres, R. U. (1998). Industrial metabolism: work in progress (pp. 195–228). Springer Netherlands. doi:https://doi.org/10.1007/978-94-017-3511-7_10

Ayres, R. U. & Ayres, L. (2002). *A handbook of industrial ecology.* Edward Elgar Pub.

Bañina, S., Panetto, H. & Morel, G. (2009). New paradigms for a product oriented modelling: Case study for traceability. *Computers in Industry*, 60(3), pp. 172–183. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compind.2008.12.004>

Bajic, E. & Chaxel, F. (1997). Towards a holon-product oriented management. *Intelligent Manufacturing Systems 1997 (Ims'97)*, 30(14), Int Federat Automat Control; IFAC Tech Comm Adv Mf. doi:[https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)42711-X](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)42711-X)

- Bascompte, J. & Jordano, P.** (2007). Plant-Animal Mutualistic Networks: The Architecture of Biodiversity. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 38(1), pp. 567–593. doi:<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.38.091206.095818>
- Berkel, R., Willems, E. & Lafleur, M.** (1997). The Relationship between Cleaner Production and Industrial Ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 1(1), pp. 51–66. doi:<https://doi.org/10.1162/jiec.1997.1.1.51>
- Borrett, S. R., Carter, M. & Hines, D. E.** (2015). Six General Ecosystem Properties are more Intense in Biogeochemical Cycling Networks than Food Webs. *ArXiv Preprint*, (3), 28. doi:<https://doi.org/10.1093/comnet/cnw001>
- Briand, F.** (1983). Environmental control of Food Web structure. *Ecology*, 64(2), 11. doi:<https://doi.org/10.2307/1937073>
- Burström, F.** (1999). Materials Accounting and Environmental Management in Municipalities. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*, 01(03), pp. 297–327. doi:<https://doi.org/10.1142/S1464333299000247>
- Chen, Y.** (2007). 3D texture mapping for rapid manufacturing. *Computer-Aided Design and Applications*, 4(1–6), pp. 761–771. doi:<https://doi.org/10.1080/16864360.2007.10738509>
- Clegg, B. T.** (2007). Building a holarchy using business process-oriented holonic (ProH) modeling. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part A: Systems and Humans*, 37(1), pp. 23–40. doi:<https://doi.org/10.1109/TSMCA.2006.886343>
- Despeisse, M., Ball, P. D., Evans, S. & Levers, A.** (2012). Industrial ecology at factory level: a prototype methodology. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(10), pp. 1648–1664. doi:<https://doi.org/10.1177/0954405412449937>
- Dijkema, G. P. J. & Basson, L.** (2009). Complexity and Industrial Ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 13(2), pp. 157–164. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00124.x>
- Erkman, S.** (1997). Industrial ecology: An historical view. *Journal of Cleaner Production*, 5(1–2), pp. 1–10. doi:[https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(97\)00003-6](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(97)00003-6)
- Fath, B. D. & Haines, G.** (2007). Cyclic energy pathways in ecological food webs. *Ecological Modelling*, 208(1), pp. 17–24. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.04.020>
- Fath, B. D., Scharler, U. M., Ulanowicz, R. E. & Hannon, B.** (2007). Ecological network analysis: network construction. *Ecological Modelling*, 208(1), pp. 49–55. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2007.04.029>
- Ferreira, J. D.** (2013). *Bio-Inspired Self-Organisation in Evolvable Production Systems*.

- Fletcher, M., Garcia-Herreros, E., Christensen, J. H., Deen, S. M. & Mittmann, R.** (2000). An open architecture for holonic cooperation and autonomy. In *Proceedings - International Workshop on Database and Expert Systems Applications, DEXA* (Vol. 2000–Janua, pp. 224–230). IEEE Comput. Soc. doi:<https://doi.org/10.1109/DEXA.2000.875031>
- Habib, M. K.** (2011). Biomimetics: innovations and robotics. *International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems*, 4(2), 113. doi:<https://doi.org/10.1504/IJMMS.2011.039263>
- Ham, D. H.** (2015). Modelling work domain knowledge with the combined use of abstraction hierarchy and living systems theory. *Cognition, Technology and Work*, 17(4), pp. 575–591. doi:<https://doi.org/10.1007/s10111-015-0338-y>
- Hsieh, F. S.** (2008). Holarchy formation and optimization in holonic manufacturing systems with contract net. *Automatica*, 44(4), pp. 959–970. doi:<https://doi.org/10.1016/j.automatica.2007.09.006>
- Isenmann, R.** (2003a). Industrial ecology : its perspective of understanding nature as model, 158(June), pp. 143–158.
- Isenmann, R.** (2003b). Industrial ecology : its perspective of understanding nature as model. *Sustainable Development*, 11(June), pp. 143–158. doi:<https://doi.org/10.1002/sd.213>
- J.H., L. & Cherrett, J. M.** (1989). Food Webs. In *Food webs* (pp. 43–78). Recuperado de: http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-009-5925-5_1
- Jayal, A. D., Badurdeen, F., Dillon, O. W. & Jawahir, I. S.** (2010). Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2(3), pp. 144–152. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2010.03.006>
- Kleijn, R., Huele, R. & Van Der Voet, E.** (2000). Dynamic substance flow analysis: The delaying mechanism of stocks, with the case of PVC In Sweden. *Ecological Economics*, 32(2), pp. 241–254. doi:[https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00090-7](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00090-7)
- Koestler, A.** (1967). The ghost in the machine. *London: Hutchinson*. Recuperado de: http://arpast.org/newsevents/articles/article59.pdf%5Cnhttps://scholar.google.fr/scholar?q=Koestler+The+Ghost+in+the+Machine&btnG=&hl=fr&as_sdt=0,5#2
- Koestler, A.** (1983). *Janus: a summing up*. Pan.
- Koestler, A.** (1989). The Act of Creation. *Journal of nervous and mental disease*, 140. Arkana.
- Layton, A., Bras, B. & Weissburg, M.** (2016). Ecological Principles and Metrics for Improving Material Cycling Structures in Manufacturing Networks. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(10), 101002. doi:<https://doi.org/10.1115/1.4033689>

- Leitão, P. & Restivo, F.** (2006). ADACOR: A holonic architecture for agile and adaptive manufacturing control. *Computers in Industry*, 57(2), pp. 121–130. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compind.2005.05.005>
- Liwerska-Bizukojc, E., Bizukojc, M., Marcinkowski, A. & Doniec, A.** (2009). The conceptual model of an eco-industrial park based upon ecological relationships. *Journal of Cleaner Production*, 17(8), pp. 732–741. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.11.004>
- McDonough, W.** (2002). *De la cuna a la cuna: Rehaciendo la forma en que hacemos las cosas*. Nueva York, North Point Press. Mc Graw-Hill.
- McDonough, W. & Braungart, M.** (2013). *The Upcycle. The Upcycle: Beyond Sustainability-Designing for Abundance*. North Point Press.
- Mena, A., Chamorro, A. & Miranda, F. J.** (1992). Diseño para el medio ambiente: hacia una integración entre innovación y medio ambiente.
- Miller, J.** (1978). *Living systems*. McGraw-Hill. Recuperado de: <http://www.citeulike.org/group/2050/article/1808240>
- Nosonovsky, M. & Bhushan, B.** (2012). Green Tribology: Biomimetics, Energy Conservation and Sustainability. *Green Energy and Technology*, 49. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-642-23681-5>
- Olsthoorn, A. & Boelens, J.** (1998). Substance flow analysis with FLUX. *Institute for Environmental Studies Report*. Recuperado de: https://scholar.google.es/scholar?q=Substance+flow+analysis+with+FLUX.+Report+no.+W98%5C15.+Institute+for+Environmental+Studies&btnG=&hl=es&as_sdt=0%2C5
- Montoya, J. M. & Solé, R. V.** (2002). Small world patterns in food webs. *Journal of Theoretical Biology*, 214(3), pp. 405–12. doi:<https://doi.org/10.1006/jtbi.2001.2460>
- Pakarinen, S., Mattila, T., Melanen, M., Nissinen, A. & Sokka, L.** (2010). Sustainability and industrial symbiosis-The evolution of a Finnish forest industry complex. *Resources, Conservation and Recycling*, 54(12), pp. 1393–1404. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.05.015>
- Pandremenos, J., Vasiliadis, E. & Chryssolouris, G.** (2012). Design architectures in biology. *Procedia CIRP*, 3(1), pp. 448–452. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.077>
- Power, M. E.** (2007). Top-Down and Bottom-Up Forces in Food Webs : Do Plants Have Primacy. *Ecology*, 73(3), pp. 733–746. Recuperado de: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2307/1940153/full>
- Presley, A. R. & Liles, D. H.** (2001). A holon-based process modeling methodology. *International Journal of Operations & Production Management*, 21(5/6), 565. doi:<https://doi.org/10.1108/01443570110390336>

- Rawlings, A. E., Bramble, J. P. & Staniland, S. S.** (2012). Innovation through imitation: biomimetic, bioinspired and biokleptic research. *Soft Matter*, 8(25), 6675. doi:<https://doi.org/10.1039/c2sm25385b>
- Rosa, F., Viganò, R. & Rovida, E.** (2010). Design in Nature and Engineering : Knowledge Transfer Through a Data-Base of Biological Solutions. *Proceedings of the TMCE 2010*, pp. 1–11.
- Salguero, A., Gonzalez, F., Lama, J. & Peralta, M. E.** (2014). Modelo MGE2: Metodología Sostenible para la certificación integral ISO-C2C-LEED. *DYNA*, 89(5). doi:<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.6036/7062>
- Schoener, T.** (1989). Food webs from the small to the large. *Ecology*, 70(6), pp. 1889–1589. doi:<https://doi.org/10.2307/1938088>
- Sendra, C., Gabarrell, X. & Vicent, T.** (2007). Material flow analysis adapted to an industrial area. *Journal of Cleaner Production*, 15(17), pp. 1706–1715. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.019>
- Seoanez, M.** (1998). Ecología industrial. *Edic. Mundi, Madrid, España*. Recuperado de: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:ecología+industrial#3>
- Shimomura, M.** (2010). The New Trends in Next Generation Biomimetics Material Technology : Learning from Biodiversity. *Science & Technology Trends*, pp. 53–75.
- Shu, L. H., Ueda, K., Chiu, I. & Cheong, H.** (2011). Biologically inspired design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(2), pp. 673–693. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.06.001>
- Sivakumar, N., Balasubramanya, A. & Sundaresan, C. N.** (2012). Sustainable Supply Chain Excellence : A Biomimetic Perspective. *IUP Journal of Supply Chain Management*, 9(1), pp. 21–40. Recuperado de: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bth&AN=78153539&site=ehost-live>
- Sleytr, U. B., Schuster, B. & Pum, D.** (2003, May). Nanotechnology and Biomimetics with 2-D Protein Crystals. *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. doi:<https://doi.org/10.1109/MEMB.2003.1213637>
- Stephenson, G. V.** (2013). The Application of Living Systems Theory for Missions to Mars.
- Terzi, S., Panetto, H., Morel, G. & Garetti, M.** (2007). A holonic metamodel for product traceability in Product Lifecycle Management. *International Journal of Product Lifecycle Management*, 2(3), 253. doi:<https://doi.org/10.1504/IJPLM.2007.016292>
- Tharumarajah, A.** (2003). From fractals and bionics to holonics. In *Agent-Based Manufacturing: Advances in the Holonic Approach* (pp. 11–30). Berlín, Alemania: Springer Berlin Heidelberg. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-662-05624-0_2
- Tilley, D. R.** (2003). Industrial Ecology and Ecological Engineering Opportunities for Symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 7(2), pp. 13–32.

- Toledo, V. M.** (2013). El metabolismo social: una nueva teoría socioecológica. *Relaciones*, 136, pp. 41–71. doi:<https://doi.org/0185-3929>
- Tonshoff, H. K., Winkler, M. & Aurich, J. C.** (1994). Product modelling for holonic manufacturing systems, Proceedings of the Fourth International Conference on Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology § IEEE Comput. Soc. Press. doi:<https://doi.org/10.1109/CIMAT.1994.389084>
- Torben, L.** (2009). Biomimetics as a design methodology- Possibilities and challenges. *International Conference on Engineering Design*, (August).
- Ueda, K., Kito, T. & Fujii, N.** (2006). Modeling biological manufacturing systems with bounded-rational agents. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1), pp. 469–472. doi:[https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60461-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60461-2)
- Ulanowicz, R. E.** (2004). Quantitative methods for ecological network analysis. *Computational Biology and Chemistry*, 28(5–6), pp. 321–339. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compbiolchem.2004.09.001>
- Ulieru, M., Brennan, R. W. & Walker, S. S.** (2002). The holonic enterprise: a model for Internet-enabled global manufacturing supply chain and workflow management. *Integrated Manufacturing Systems*, 13(08), pp. 538–550. doi:<https://doi.org/10.1108/09576060210448125>
- van der Voet, E.** (1996). *Substances from cradle to grave: Development of a methodology for the analysis of substance flows through the economy and the environment of a region with case studies on cadmium and nitrogen compounds*. Institute of Environmental Sciences (CML).
- Van Leeuwen, E. H. & Norrie, D.** (1997). Holons and holarchies. *Manufacturing Engineer*, 76(2), pp. 86–88. doi:<https://doi.org/10.1049/me:19970203>
- Vincent, J. F. V.** (2009). Biomimetics – a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*, 223(8), pp. 919–939. doi:<https://doi.org/10.1243/09544119JEIM561>
- Von Bertalanffy, L.** (1969). *General system theory: Foundations, development, applications*.
- Wang, G. X., Luo, K., Pei, D. M., Yan, Y. & Shang, S. H. H. X. W.** (2016). Design Knowledge Modeling of Complex Products Based on the Living Systems Theory, pp. 1819–1825.
- Wang, S., Cao, T. & Chen, B.** (2017). Urban energy–water nexus based on modified input–output analysis. *Applied Energy*, 196, pp. 208–217. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.02.011>
- Wehrspann, P.** (2011). *Biology as a Muse: Exploring the Nature of Biological Information and its Effect on Inspiration for Industrial Designers*.

Westkämper, E. (2008). Manufuture and Sustainable Manufacturing. In *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier* (pp. 11–14). Londres, Inglaterra: Springer London. doi:https://doi.org/10.1007/978-1-84800-267-8_3

Young, P., Byrne, G. & Cotterell, M. (1997). Manufacturing and the environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 13(7), pp. 488–493. doi:<https://doi.org/10.1007/BF01624609>

Zari, M. P. (2006). Biomimetic Approaches To Architectural Design for Increased Sustainability. *Design*, (April), 2006. Recuperado de: <http://www.academia.edu/download/35781420/033-PEDERSENZARI.pdf>

Zhang, Y., Zheng, H. & Fath, B. D. (2014). Ecological network analysis of an industrial symbiosis system: A case study of the Shandong Lubei eco-industrial park. *Ecological Modelling*. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.05.005>

III

LA FRACTURA METABÓLICA Y ECONOMÍA CIRCULAR EN EL DISEÑO, DESARROLLO Y FABRICACIÓN DE PRODUCTOS

Ana De las Heras García de Vinuesa y Antonio Córdoba Roldán

1. Introducción

La evolución de la industria y sus instalaciones han ido desarrollando un sistema industrial para la satisfacción de la demanda social de productos, servicios y sistemas que, desde la Revolución Industrial (de Vries, 1994), ha supuesto un impacto sobre el planeta debido a los efectos del sistema capitalista sobre la interacción metabólica (intercambio de materia) entre la naturaleza y la sociedad en la economía lineal. Este fenómeno se denomina *fractura metabólica* (Foster, 2000) y fue acuñado por primera vez por Marx (Marx, 1894).

La fractura metabólica (Figura 1) tiene su origen en los modos de intercambio de materia y energía entre la sociedad y la naturaleza, conocido como metabolismo social. Los recursos obtenidos por el ser humano de la naturaleza (capital natural) (B. Clark & Foster, 2009) son utilizados en las actividades económicas y permiten a la sociedad llevar a cabo su crecimiento y expansión a largo tiempo.

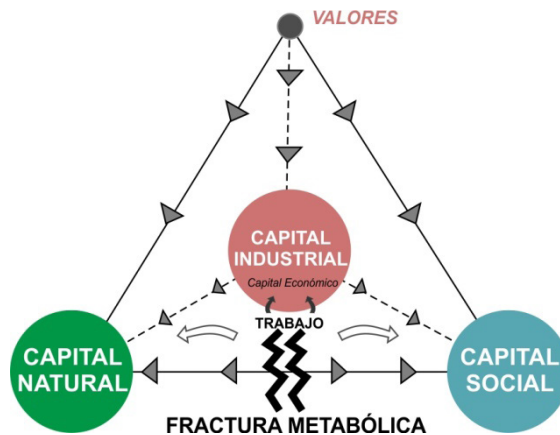


Figura 1. Fractura metabólica.

Fuente: elaboración propia.

Esta situación con un creciente interés por los beneficios económicos hace que las actividades industriales se lleven a cabo sin analizar las consecuencias naturales o sociales (van der Giesen, Kleijn, Kramer, & Guinée, 2013). Así mismo, los nutrientes asimilados por la tecnosfera y tomados de la naturasfera, se transforman sin control en productos elaborados y se devuelven al ambiente un conjunto de salidas alteradas

que, por su nueva condición, no puede ser asimiladas por los procesos naturales. Emerge de esta situación la primacía del metabolismo social sobre el natural provocando la desintegración de la sociedad y la naturaleza creándose dos sistemas independientes en coexistencia dentro de la ecosfera: la biosfera (naturesfera) y la tecnosfera, lo que provoca el distanciamiento entre el capital natural y el social.

A lo largo del siglo XIX y la primera mitad del siglo XX se incrementa la distancia entre los dos sistemas (naturesfera y tecnosfera) (Hudson, 2009) con la generación de impactos debido a la sobreexplotación y agotamiento de los recursos naturales y humanos provocando alta contaminación atmosférica, acuática y terrestre, daño a la salud humana, cambios en la usabilidad del suelo, deforestación y destrucción de bosques y explotación de la energía no renovables .

El capital natural de los ecosistemas, que incluye los intercambios de materia y energía entre los seres vivos y la naturesfera, es inocuo y sostenible por naturaleza, ya que respeta el conjunto global de estructuras naturales y recursos (JENSEN, 1993). Por el contrario, el capital social, posee una estructura de intercambio de nutrientes diferentes donde la situación del ser humano (herramientas y tecnología propias) potencia la posición superior sobre el resto de seres vivos y lo aleja de los procesos eficientes y equilibrados característicos de la biosfera (González de Molina & Toledo, 2014).

El desequilibrio de los capitales natural y social existente viene originado por estos errores (B. Clark & Foster, 2009): relaciones jerárquicas complejas de explotación, dependencia de recursos de la naturesfera unido a la gran demanda de productos por parte del mercado, y la ineficiencia del trabajo y los procesos productivos donde el ser humano se posiciona como otro recurso más de la producción.

Existe, por tanto, una relación directa entre el origen de la fractura metabólica y la industria, teniendo gran responsabilidad la concepción del trabajo y la actividad productiva en la solución del impacto social y ambiental. Derivado de esta situación, surgen conceptos, herramientas y técnicas en un nuevo movimiento “sostenible” donde se trabaja por entender cómo debe ser desarrollada la explotación del medio y utilizarla de forma inteligente como creadora de valor, herramienta de crecimiento y evolución en consonancia con la naturesfera y los recursos que ésta ofrece y que son necesarios para su evolución.

2. Sostenibilidad

La fractura metabólica supone el reflejo de la situación de explotación masiva de recursos naturales y de la creciente desnaturalización de los procesos productivos y de la industria en general. Esta tendencia se ha hecho fuerte desde que en la Segunda Revolución Industrial la producción en masa supuso una elevada demanda y, por tanto, un consumo de recursos muy por encima de las capacidades de la naturesfera.

“Satisfacer las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de futuras generaciones” (ONU, 1987) implica un cambio en la mentalidad del ser humano implicado en la industria y sus procesos asociados, donde prevalece la idea de mitigar los impactos producidos por la tecnosfera asemejando la estructura de los procesos a la naturaleza y albergando un equilibrio entre el capital ambiental, económico y social.

La evolución de la importancia de considerar el desarrollo sostenible como eje central cuyo objetivo se centra en la mitigación de la fractura metabólica, ha provocado que este concepto marxista haya evolucionado hacia una estrategia operativa denominada Triple Bottom Line (Triple E, 3E) (Elkington, 1998; Gou & Xie, 2017) (Figura 2).

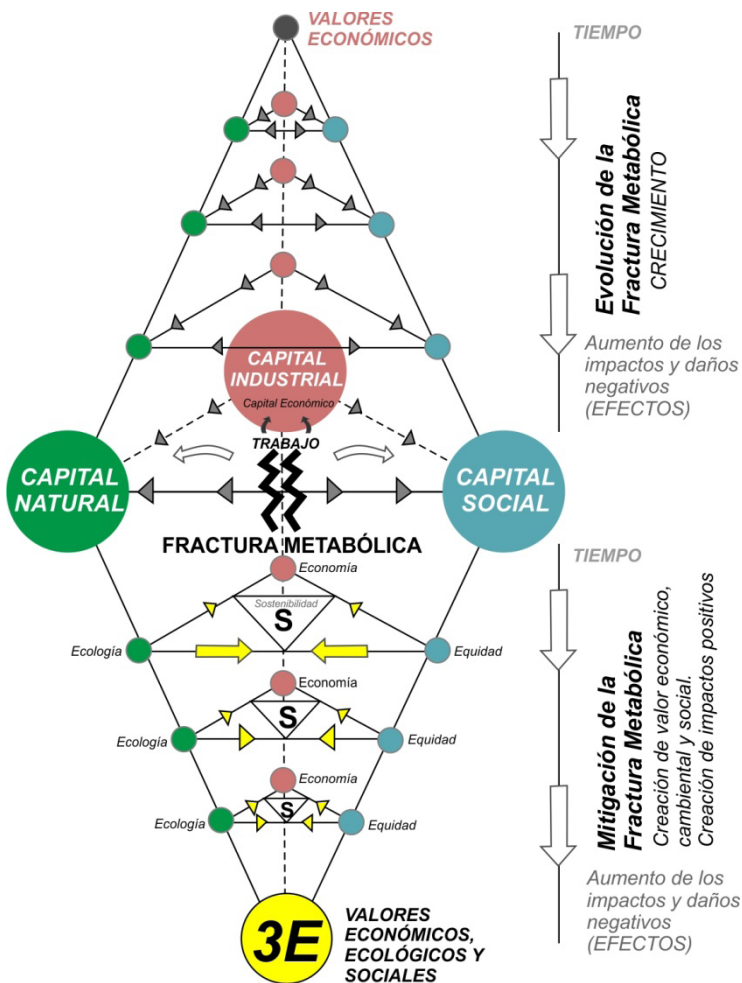


Figura 2. Evolución de la fractura metabólica hacia la Triple Bottom Line.

Fuente: elaboración propia.

En la Figura 2 se observa cómo la evolución de la fractura metabólica en el tiempo se encuentra influenciada por el aumento de los impactos y daños negativos como resultado de una primacía de los valores económicos que, provocan un alejamiento del capital natural y social (Anvari & Turkay, 2017). Una vez que se determina la finalidad del desarrollo sostenible donde se apuesta por la reducción y eliminación de la fuente del daño así como la creación de valor de esta situación, existe una evolución de las estrategias sostenibles consideradas que suponen el comienzo del cambio.

La sociedad toma conciencia del problema ambiental generado y de la magnitud de este. En la industria comienza a establecerse legislación para el control de la contaminación y se implantan tecnologías de “final de tubería”, que capturan la contaminación e impiden la dilución en el ambiente. Así mismo, aparecen estrategias proactivas que plantean la *prevención* de la contaminación, incluso con el desarrollo de soluciones que van más allá de la eficiencia y control de los procesos productivos, fijando el objetivo en cerrar el ciclo de vida del producto eliminando los efectos desde las causas (María Estela Peralta Álvarez, Marcos Bárcena, & Aguayo González, 2016). En este punto se centra la propuesta actual de fabricación de productos, donde la evolución hacia esta perspectiva hace que la sostenibilidad sea un concepto dinámico y multidimensional cuyo objetivo de eliminación y reducción de los impactos (causas y efectos de los impactos) está asociado a las tres dimensiones fundamentales con igual participación en su evaluación: *económica* (rentabilidad y viabilidad técnica del negocio), *ecológica* (compatibilidad de las actividades con el medio ambiente y sus ciclos) y *equidad* (atención a la calidad de vida y el bienestar humano), así mismo en la articulación de soluciones de productos y procesos de fabricación ecoinnovadores.

En la Triple Bottom Line (Elkington, 1998) se desarrolla la búsqueda del valor simultáneamente en las tres dimensiones de forma fractalizada (Figura 3) donde interactúan dinámicamente en el proceso de búsqueda, evaluación y desarrollo de soluciones sostenibles (M. Estela Peralta Álvarez, Marcos Bárcena, & Aguayo González, 2017).

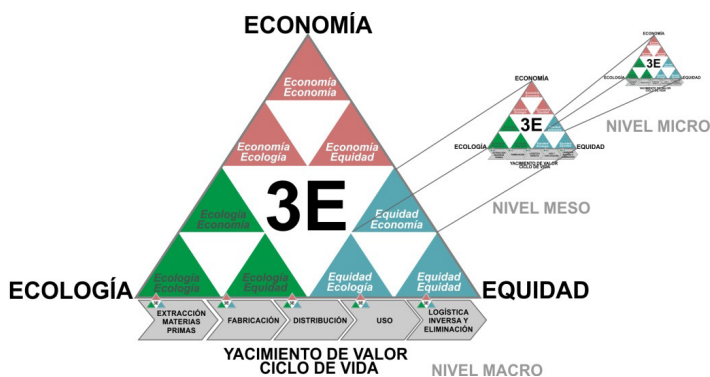


Figura 3. Triple Bottom Line. Estructura Fractal.

Fuente: elaboración propia.

La aplicación de esta nueva estrategia de eco-innovación en las actividades de diseño y fabricación de productos hace posible la aportación de los medios necesarios para entender y medir el progreso sostenible, creando valor constante y potenciado la calidad de las soluciones en las tres dimensiones simultáneamente, obteniendo valor de cada una de ellas por la complementariedad que ofrecen las otras dos (Govindan, Khodaverdi, & Jafarian, 2013). En este sentido, fomenta la gestión y diseño de etapas, procesos, materiales y sustancias desde el punto de vista de la salud humana y del planeta (Aguayo González, Peralta Álvarez, Lama Ruíz, & Soltero Sánchez, 2011).

Con el dinamismo operacional del triángulo fractal en el proceso de búsqueda de soluciones, se maximizan los valores de todas las áreas implicadas en el diseño y fabricación de productos, a través de un *ecodiseño* inteligente (van der Velden, Kuusk, & Köhler, 2015) con la satisfacción de todos los agentes implicados en el proyecto. De esta manera se alcanza una triple cuenta de resultados derivados de la sinergia de las tres dimensiones sostenibles. La tendencia a alcanzar esta visión en su totalidad en los proyectos industriales permite cumplir el objetivo actual de la economía del bienestar, donde la calidad de vida y el crecimiento económico se desacoplan del impacto ambiental que se está produciendo sobre el medio ambiente.

3. Paradigmas de la sostenibilidad

A raíz de esta nueva visión del concepto de desarrollo sostenible, y para la consecución del objetivo de mitigar la fractura metabólica y crear un ecosistema global sostenible, surgen una serie de paradigmas que detallan el conjunto de prácticas y saberes que definen una disciplina científica durante un período específico y que son compartidos por la comunidad científica (Kuhn, 1962).

En la ciencia actual, los paradigmas son vertebrados sobre un conjunto de principios, técnicas y herramientas que estructuran los marcos de trabajo (Fleck, 1986). Estos marcos de trabajo, cuyo desarrollo se verá con detalle en el siguiente epígrafe, son las estructuras metodológicas y teóricas que son desarrolladas y aplicadas por la comunidad científica y, por tanto, aceptadas como patrón de trabajo.

El cambio hacia un sistema global sostenible implica una amplia transformación de las actividades y de un desarrollo específico desde la perspectiva de la eco-innovación. Los paradigmas que permiten integrar de forma sinérgica las tres dimensiones de la sostenibilidad permiten a los agentes involucrados en los procesos de diseño y fabricación de productos llevar a cabo una gestión clara y ordenada de la planificación y diseño sostenible. En cuanto a los paradigmas existentes para abordar el desarrollo sostenible cabe destacar:

- a. Ecología Industrial (Graedel & Allenby, 2002).
- b. Capitalismo Natural (Hawken, Lovins, & Lovins, 2010).

- c. Permacultura (Veteto & Lockyer, 2008).
- d. Natural Step (Upham, 2000a).
- e. Economía Circular (Geissdoerfer, Savaget, Bocken, & Hultink, 2017).

3.1. Ecología industrial

La Ecología Industrial (Hertwich, 2008; Jelinski, Graedel, Laudise, McCall, & Patel, 1992; Thomas, 1997) es una práctica de gestión ambiental orientada a transformar un sistema industrial en analogía con un sistema natural. Busca caracterizar un sistema industrial como sostenible.

Con el objetivo de conseguir eliminar el concepto de residuo, plantea la gestión de las entradas y salidas de un sistema, haciendo que los desechos de unos procesos sean recursos para otros (Pauliuk, Arvesen, Stadler, & Hertwich, 2017). Con este planteamiento, y teniendo en cuenta la capacidad de carga del planeta, la estructura lineal convencional del sistema industrial es transformada en un ciclo cerrado de materia con la proyección de una producción limpia y un consumo responsable (Hertwich, 2008).

En la actualidad conviven tres tipos de sistemas industriales: Sistema industrial convencional, a punto de extinguirse, con filosofía lineal donde se plantea una fuente de recursos ilimitados que provocan unos residuos también ilimitados; Sistema industrial semicircular, donde las empresas han comenzado a tomar conciencia del desarrollo sostenible y poseen el objetivo de reducir consumos y residuos debido a la limitación de estos; y por último, el objetivo último de la ecología industrial y la tendencia a la que, cada vez más organizaciones se suman, y es la adopción de un sistema que minimiza impactos generados y posibilita reducir costes de producción a través de la eficiencia energética y de recursos (Hoffman, Corbett, Joglekar, & Wells, 2014; Kraines & Wallace, 2008).

3.2. Capitalismo Natural

El Capitalismo Natural (A. Lovins & Lovins, 2001; L. H. Lovins & Lovins, 2001) hace referencia a los recursos naturales y a los servicios que los ecosistemas ofrecen y que hacen posibles todas las actividades de la industria y la prestación de servicios actuales (Hawken *et al.*, 2010). El capitalismo natural es una propuesta de desarrollo sostenible elaborada por Paul Hawken y Amory Lovins donde se plantea transformar la actual economía de consumo excesivo descontrolada, en una economía del bienestar, garantizando las necesidades de las generaciones futuras y conservando los recursos naturales (Birkin, 2001).

Para responder a este objetivo plantean cuatro principios basados en las tres dimensiones de la sostenibilidad (Aguayo González *et al.*, 2011) (Figura 4):

- Aumentar de forma radical la producción de recursos: Incrementar la productividad natural de los recursos gestionándolos adecuadamente y minimizando los residuos y la contaminación al medio gracias a las nuevas técnicas sostenibles y al diseño respetuoso con el medio ambiente.
- Orientación hacia un modelo biológico inspirado en la naturaleza eliminando el concepto de residuo.
- Creación de un modelo socioeconómico de mercado basado en soluciones sostenibles y no en los propios productos, lo que implica cambiar la forma de valoración económica hacia el flujo de servicios.
- Reinvertir en el capital natural reconstruyendo ecosistemas para que vuelvan a caracterizarse por sus servicios iniciales de calidad y recuperen los recursos biológicos perdidos por las actividades humanas.



Figura 4. Capitalismo natural.

Fuente: elaboración propia.

3.3. Permacultura

Este nuevo paradigma concebido para integrar la vivienda y el paisaje con el objetivo de conseguir minimizar el uso de recursos, produciendo menos residuos y conservando la naturaleza y todos los elementos que la componen (Jelinek, 2017; Vitari & David, 2017).

Este modelo, desarrollado en Australia por Bill Mollison y Dave Holmgren (Akhtar, Lodhi, & Shah Khan, 2015; Holmgren, 2002), permite formar sistemas sostenibles integrando armónicamente la vivienda y el paisaje, ahorrando materiales y produciendo menos desechos, a la vez que se conservan los recursos naturales, es decir, crear un diseño ecológico. Ha tenido gran resonancia en la agricultura y arquitectura. Íntimamente unido al concepto de permacultura se encuentra el de diseño regenerativo (Akhtar, Lodhi, Khan, & Sarwar, 2016).

La permacultura se asienta sobre tres principios (Aguayo González *et al.*, 2011; Hathaway, 2016):

1. Personas: Satisfacer las necesidades básicas implicará la eliminación de la degradación destructiva de la Tierra.
2. Planeta: Cuidar el planeta no llevando a cabo actividades degradantes y agresivas y restaurando el valor perdido en las últimas décadas.
3. Recursos: Es necesario que los recursos y los excedentes vayan destinados a la obtención de los dos objetivos anteriores. Teniendo en cuenta la capacidad de carga del planeta, pueden limitarse las actividades humanas medidas a partir de la huella ecológica (Doménech Quesada, 2007).
4. Para poder llevar a cabo los objetivos anteriores, se han definido los siguientes principios de diseño (figura 5) (Rhodes, 2015; Veteto & Lockyer, 2008):
 - Observa e interactúa
 - Captura y almacena energía
 - Obtén más rendimiento.
 - Aplica la autoregulación y acepta la retroalimentación.
 - Usa y valora los servicios y recursos renovables.
 - Deja de producir desperdicios.
 - Diseña desde los patrones hacia los detalles.
 - Integrar más que segregar.
 - Usar soluciones lentas y pequeñas.
 - Usar y valorar la diversidad.
 - Usar los bordes y valorar lo marginal.
 - Usar y responder creativamente al cambio.

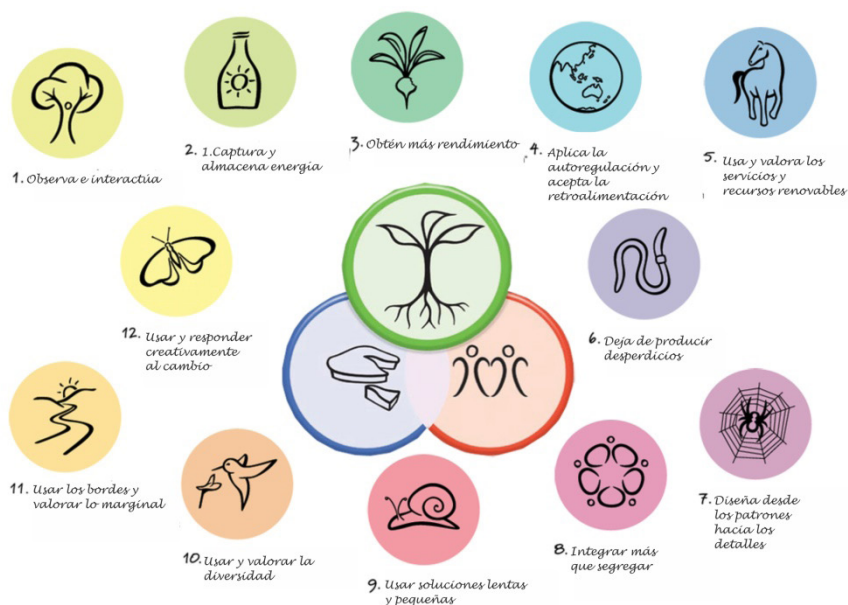


Figura 5. Principios de la Permacultura.

Fuente: elaboración propia.

3.4. Natural Step

El Natural Step es un paradigma para la educación, asesoramiento y la investigación dentro de los ámbitos del desarrollo sostenible creado por Karl-Henrik Robèr (Robert, 2002).

Para resolver el problema del desarrollo sostenible propone una transformación de la sociedad a través de la eco-innovación aportando un conjunto de herramientas y métodos para el análisis ambiental y para el diseño y fabricación de productos con los cuales “paso a paso” la sociedad es capaz de construir un futuro mejor (Upham, 2000a).

Según la ética del Natural Step, el desarrollo sostenible consiste en encontrar la manera óptima de satisfacer las necesidades básicas humanas sin perjudicar o destruir el equilibrio medioambiental, social y económico (Upham, 2000b). Para ello, las actividades humanas con las cuales se satisfagan las necesidades demandadas por la sociedad, no deben utilizar los recursos naturales sin respetar al medio ambiente o destruyendo los ecosistemas (Upham, 2000a).

La industria debe prescindir de todas aquellas sustancias perjudiciales, es decir, no debe general sustancias que, dañando el medio ambiente, tengan el poder de acumularse durante años en el planeta causando un impacto negativo (Zimmerman & Kibert, 2007). Las actividades industriales deben potenciar la biodiversidad y aumentar el poder de la naturaleza para regenerarse y renovarse a sí misma,

convirtiendo las salidas de material en entradas de otros procesos, usando los recursos de forma eficiente, respetando los flujos y no forzando la producción y la destrucción (Aguayo González *et al.*, 2011).

3.5. Economía circular

La Economía Circular (Bocken, de Pauw, Bakker, & van der Grinten, 2016; Geissdoerfer *et al.*, 2017) es un paradigma económico que se interrelaciona con la sostenibilidad, y cuyo objetivo es que el valor de los productos, los materiales y los recursos (agua, energía,...) se mantenga en la economía durante el mayor tiempo posible, y que se reduzca al mínimo la generación de residuos. Se trata de implementar una nueva economía, circular-no lineal-, basada en el principio de «cerrar el ciclo de vida» de los productos, los servicios, los residuos, los materiales, el agua y la energía (Witjes & Lozano, 2016).

La economía circular es la intersección de los aspectos ambientales, sociales y económicos con la propuesta de un nuevo modelo de sociedad que utiliza y optimiza los stocks y los flujos de materiales, energía y residuos y su objetivo es la eficiencia del uso de los recursos (Tukker, 2015). En un contexto de escasez y fluctuación de los costes de las materias primas, la economía circular contribuye a la seguridad del suministro y a la reindustrialización del territorio (Ghisellini, Cialani, & Ulgiati, 2016).

Así mismo, este paradigma promueve que las salidas de unos procesos puedan servir de entradas para otros. Persigue una máxima donde el producto debe ser diseñado para ser desensamblado (Lieder & Rashid, 2016). La economía circular consigue convertir nuestros residuos en materias primas. La economía circular descansa en varios principios (Circular, 2017):

- La eco-concepción: considera los impactos medioambientales a lo largo del ciclo de vida de un producto y los integra desde su concepción.
- La ecología industrial y territorial: establecimiento de un modo de organización industrial en un mismo territorio caracterizado por una gestión optimizada de los stocks y de los flujos de materiales, energía y servicios.
- La economía de la “funcionalidad”: privilegiar el uso frente a la posesión, la venta de un servicio frente a un bien.
- El segundo uso: reintroducir en el circuito económico aquellos productos que ya no se corresponden a las necesidades iniciales de los consumidores.
- Fomentar el reciclaje y el reuso: dividir los materiales en nutrientes biológicos y técnicos frente a la economía lineal que no los separa y, por tanto, se complican las actividades relacionadas con la logística inversa.

- La valorización: aprovechar energéticamente los residuos que no se pueden reciclar.

Existe una fuerte motivación económica y empresarial a favor de la economía circular y la eficiencia de los recursos. De hecho, la Comisión Europea, como órgano colegiado, ha adoptado la eficiencia de los recursos como un pilar central de su estrategia económica estructural del Horizonte 2020. En la siguiente figura puede observarse un esquema de la dinámica central de este paradigma en cuanto a la creación de ciclos cerrados.

La economía circular, por tanto, se hace necesario desarrollar una contextualización histórica de su evolución.

La siguiente figura muestra una división temporal de la economía circular, basado en la revisión de las publicaciones referidas a la evolución histórica del paradigma (Blomsma & Brennan, 2017; Ghisellini *et al.*, 2016; Kirchherr, Reike, & Hekkert, 2017; Lieder & Rashid, 2016; Masi, Day, & Godsell, 2017; Winans, Kendall, & Deng, 2017) (Figura 6).

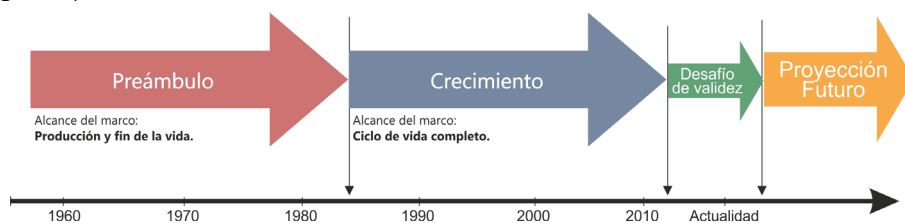


Figura 6. Evolución histórica de la Economía Circular.

Como se observa en la Figura 6 existen 4 etapas diferenciadas en la evolución del concepto a nivel de investigaciones y publicaciones: preámbulo, crecimiento, desafío de validez y proyección de futuro. A continuación se trata de establecer las características globales de cada una de esas etapas (Blomsma & Brennan, 2017).

1960 - 1985 Preámbulo: Durante este período, el debate sobre residuos y recursos se ocupa del papel del manejo de residuos, con especial atención a los efectos contaminantes de los desechos. El alcance de este periodo se centra principalmente con los procesos al final de la vida (EoL) de los residuos industriales y municipales, junto con las medidas preventivas que se centraron en la producción del sistema industrial (Murray, Skene, & Haynes, 2017). Como resultado, se enfatizaron las estrategias de manejo de desechos como la incineración más limpia, la conversión de residuos en energía, el reciclaje y el compostaje (J. H. Clark, Farmer, Herrero-Davila, & Sherwood, 2016).

Durante esta primera etapa, dos fueron los desarrollos claves en la evolución: El primero fue una reiteración de la idea de una gestión responsable de los recursos naturales planteada anteriormente por pensadores como Thomas Malthus, John

Stuart Mill y Hans Carl (Lacy & Rutqvist, 2015). El segundo desarrollo clave que contribuyó al encuadre del debate sobre residuos y recursos durante este período fue el progreso en los campos académicos de biología, ecología, física, pensamiento sistémico y ciencias administrativas y empresariales, así como la interacción entre estos campos.

Se crearon nuevas disciplinas, tales como economía ambiental y diseño ecológico o ecodiseño donde el concepto de bucles y ciclos fue explorado por primera vez de manera sistemática (Bocken *et al.*, 2016; Witjes & Lozano, 2016). Estos campos generaron nuevos conocimientos, actitudes e ideas, como una disposición a aprender de la naturaleza y el uso de sistemas naturales como modelo para la sociedad humana, específicamente la idea de que los sistemas industriales pueden ser desarrollados basados en la eficiencia y la calidad de sus ciclos (D'Amato *et al.*, 2017; Saavedra, Iritani, Pavan, & Ometto, 2018; Vescan *et al.*, 2017).

1985 - 2013 Crecimiento: Desde 1985 en adelante, se posiciona el desperdicio como una fuerza positiva, como un recurso y una fuente de valor (Hultman & Corvellec, 2012; O'Brien, 2008). El reciclaje se reformuló de manera más explícita como fuente de materias primas, y la conversión de residuos en energía nuevamente se convirtió en una estrategia aceptable en el sistema industrial como una sinergia entre entradas y salidas de los procesos (Haas, Krausmann, Wiedenhofer, & Heinz, 2015). Esta situación vino originada por la discusión más amplia sobre el desarrollo sostenible, provocada por el informe Brundtland (ONU, 1987) Específicamente, durante este período el desarrollo sostenible se enmarcó como una oportunidad, y abordar este desafío global se convirtió en un medio de administrar el riesgo, ahorrar costos y como un medio para generar crecimiento económico e innovación (Hart & Milstein, 2003).

La complejidad de este debate aumentó y las respuestas claras permanecieron ausentes, surgiendo una brecha de conocimiento en relación con lo que constituye un manejo de recursos y desperdicios significativos y accionables. En respuesta, surgieron conceptos globales como *pérdida cero*, *eficiencia de los recursos*, *responsabilidad ampliada del productor*, *consumo y producción sostenibles*, y *economía verde* (Silva, Stocker, Mercieca, & Rosano, 2016). En torno a muchos de estos conceptos generales, las comunidades académicas y los programas de investigación se unieron para dirigir iniciativas prácticas que implementaban estrategias alternativas de residuos y recursos (Blomsma & Brennan, 2017; D'Amato *et al.*, 2017; Ghisellini *et al.*, 2016; Winans *et al.*, 2017).

2013 - Actualidad, Desafío de Validez: A partir de 2013, se está llevando a cabo un tipo diferente de compromiso con el concepto, que anuncia el período de desafío de validez permitiendo un compromiso más crítico (Bocken *et al.*, 2016; J. H. Clark *et al.*, 2016). La situación actual puede caracterizarse como la aparición de

interpretaciones, dependiendo del sector en el que nos encontremos (negocios, industrial, economía,..) lo que implica que la claridad teórica o paradigmática para el desarrollo de un modelo común para establecer la economía circular está aún en proceso (Linder, Sarasini, & van Loon, 2017).

Comienza a existir un cambio fundamental en la política donde emerge la tendencia de incorporar el desmontaje y la reutilización en los productos como normativa en proceso de desarrollo e implantación (Blomsma & Brennan, 2017). Así mismo, se encuentra en discusión la falta de herramientas y lenguaje apropiados así como la necesidad de aumentar el desarrollo de estrategias que amplíen los beneficios tanto sociales como ambientales (Bocken *et al.*, 2016; Lewandowski, 2016; Valkokari *et al.*, 2014).

Proyección de futuro: En este periodo, que se proyecta en la próxima década se deja latente la necesidad de desarrollo del paradigma orientándolo a los pilares básicos de la cuarta revolución industrial (Reuter, 2016), donde la digitalización y la conectividad pueden servir como driver de innovación donde incorporar la gestión de datos y las potencialidades de las *smart factories* para el aumento de conexiones para la creación de ciclos cerrados entre fábricas (de Oliveira & Soares, 2017; Kempkes, Fendel, von Smuda, Wilms, & Zahn, 2017) .

La consolidación y evolución de la economía circular se centra en el desarrollo de un modelo que ayude a disminuir el uso de los recursos, a reducir la producción de residuos y a limitar el consumo de energía. Así mismo, su carácter innovador y ecosistémico (Geissdoerfer *et al.*, 2017; Jawahir & Bradley, 2016; Pagoropoulos, Pigosso, & McAlone, 2017; Witjes & Lozano, 2016) hace que la adaptación a la Industria 4.0 pueda evolucionar como una transición natural de las estrategias de los sistemas industriales (Haas *et al.*, 2015).

4. Conclusiones

Del análisis realizado en este capítulo destaca la importancia de la inclusión de la sostenibilidad en la industria y del cambio de concienciación hacia la fabricación limpia orientando las investigaciones y avances hacia programas europeos como el Horizonte 2020 donde se sitúa la eco-innovación como eje central del proceso productivo.

Así mismo, se extrae la potencialidad del paradigma de Economía circular que supone una nueva estructura para el nuevo modelo de fabricación basado en la eco-efectividad y la eco-eficiencia, líneas guías para mitigar la fractura metabólica y crear un ecosistema global sostenible.

5. Referencias bibliográficas

- Aguayo González, F., Peralta Álvarez, M. E., Lama Ruíz, J. R. & Soltero Sánchez, V. M.** (2011). *Ecodiseño. Ingeniería sostenible de la cuna a la cuna (C2C)* (1º). Madrid, España: RC Libros.
- Akhtar, F., Lodhi, S. A., Khan, S. S. & Sarwar, F.** (2016). Incorporating permaculture and strategic management for sustainable ecological resource management. *Journal of Environmental Management*, 179, pp. 31–37. doi:<http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.04.051>
- Faiza Akhtar, Suleman Aziz Lodhi & Safdar Shah Khan** (2015) “Permaculture approach: linking ecological sustainability to businesses strategies”, *Management of Environmental Quality: An International Journal*, Vol. 26 Issue: 6, pp.795-809, doi:<https://doi.org/10.1108/MEQ-01-2015-0001>
- Anvari, S. & Turkay, M.** (2017). The facility location problem from the perspective of triple bottom line accounting of sustainability. *International Journal of Production Research*, 55(21), pp. 6266–6287. doi:<http://doi.org/10.1080/00207543.2017.1341064>
- Birkin, F.** (2001). Steps to natural capitalism. *Sustainable Development*, 9(1), pp. 47–57. doi:<http://doi.org/10.1002/sd.153>
- Blomsma, F. & Brennan, G.** (2017). The Emergence of Circular Economy: A New Framing Around Prolonging Resource Productivity. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), pp. 603–614. doi:<http://doi.org/10.1111/jiec.12603>
- Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C. & van der Grinten, B.** (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), pp. 308–320. doi:<http://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Circular, F. E.** (2017). Economía Circular. Recuperado el 15 de octubre de 2017, de: <http://economiecircular.org>
- Clark, B. & Foster, J. B.** (2009). Ecological Imperialism and the Global Metabolic Rift. *International Journal of Comparative Sociology*, 50(3–4), pp. 311–334. doi:<http://doi.org/10.1177/0020715209105144>
- Clark, J. H., Farmer, T. J., Herrero-Davila, L. & Sherwood, J.** (2016). Circular economy design considerations for research and process development in the chemical sciences. *Green Chemistry*, 18(14), pp. 3914–3934. doi:<http://doi.org/10.1039/C6GC00501B>
- D’Amato, D., Droste, N., Allen, B., Kettunen, M., Lähtinen, K., Korhonen, J., & Toppinen, A.** (2017). Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues. *Journal of Cleaner Production*, 168, pp. 716–734. doi:<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.053>
- de Oliveira, S. F. & Soares, A. L.** (2017). A PLM Vision for Circular Economy (pp. 591–602). doi:http://doi.org/10.1007/978-3-319-65151-4_52

- de Vries, J.** (1994). The Industrial Revolution and the Industrious Revolution. *The Journal of Economic History*, 54(2), pp. 249–270. doi:<http://doi.org/10.1017/S0022050700014467>
- Doménech Quesada, J. L.** (2007). *Huella ecológica y desarrollo sostenible*. Madrid, España: AENOR.
- Elkington, J.** (1998). ACCOUNTING FOR THE TRIPLE BOTTOM LINE. *Measuring Business Excellence*, 2(3), pp. 18–22. doi:<http://doi.org/10.1108/eb025539>
- Fleck, L.** (1986). *La génesis y el desarrollo de un hecho científico : introducción a la teoría del estilo de pensamiento y del colectivo de pensamiento*. Madrid, España: Alianza.
- Foster, J. B.** (2000). *Marx's Ecology: Materialism and Nature*. Nueva York: EE.UU. Monthly Review Press, Ed.
- Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P. & Hultink, E. J.** (2017). The Circular Economy – A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, 143, pp. 757–768. doi:<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- Ghisellini, P., Cialani, C. & Ulgiati, S.** (2016). A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, pp. 11–32. doi:<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.09.007>
- González de Molina, M. & Toledo, V. M.** (2014). *The Social Metabolism*, 3. Cham: Springer International Publishing. doi:<http://doi.org/10.1007/978-3-319-06358-4>
- Gou, Z. & Xie, X.** (2017). Evolving green building: triple bottom line or regenerative design? *Journal of Cleaner Production*, 153, pp. 600–607. doi:<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.077>
- Govindan, K., Khodaverdi, R. & Jafarian, A.** (2013). A fuzzy multi criteria approach for measuring sustainability performance of a supplier based on triple bottom line approach. *Journal of Cleaner Production*, 47, pp. 345–354. doi:<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.04.014>
- Graedel, T. & Allenby, B.** (2002). *Industrial Ecology*. (P. Hall, Ed.). New York, U.S.A.
- Haas, W., Krausmann, F., Wiedenhofer, D. & Heinz, M.** (2015). How Circular is the Global Economy?: An Assessment of Material Flows, Waste Production, and Recycling in the European Union and the World in 2005. *Journal of Industrial Ecology*, 19(5), pp. 765–777. doi:<http://doi.org/10.1111/jiec.12244>
- Hart, S. L. & Milstein, M. B.** (2003). Creating sustainable value. *Academy of Management Executive*, 17(2), pp. 56–67. doi:<http://doi.org/10.5465/AME.2003.10025194>
- Hathaway, M. D.** (2016). Agroecology and permaculture: addressing key ecological problems by rethinking and redesigning agricultural systems. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 6(2), pp. 239–250. doi:<http://doi.org/10.1007/s13412-015-0254-8>

Hawken, P., Lovins, A. B. & Lovins, L. H. (2010). *Natural Capitalism: The Next Industrial Revolution*. Earthscan.

Hertwich, E. G. (2008). Consumption and the Rebound Effect: An Industrial Ecology Perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 9(1–2), pp. 85–98. doi:<http://doi.org/10.1162/1088198054084635>

Hoffman, A. J., Corbett, C. J., Joglekar, N. & Wells, P. (2014). Industrial Ecology as a Source of Competitive Advantage. *Journal of Industrial Ecology*, 18(5), pp. 597–602. doi:<http://doi.org/10.1111/jiec.12196>

Holmgren, D. (2002). *Permaculture. Principles & Pathways Beyond Sustainability* (1º). Australia: Permanent Publications.

Hudson, P. (2009). *The Industrial Revolution*. Nueva York: EE.UU.: Bloomsbury Publishing Plc.

Hultman, J. & Corvellec, H. (2012). The European Waste Hierarchy: From the Sociomateriality of Waste to a Politics of Consumption. *Environment and Planning A*, 44(10), pp. 2413–2427. doi:<http://doi.org/10.1068/a444668>

Jawahir, I. S. & Bradley, R. (2016). Technological Elements of Circular Economy and the Principles of 6R-Based Closed-loop Material Flow in Sustainable Manufacturing. *Procedia CIRP*, 40, pp. 103–108. doi:<http://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.067>

Jelinek, R. (2017). A permaculture primer: Using eco-theory to promote knowledge acquisition, dissemination and use in the sales organization. *Industrial Marketing Management*, 65, pp. 206–216. doi:<http://doi.org/10.1016/j.indmarman.2017.03.009>

Jelinski, L. W., Graedel, T. E., Laudise, R. A., McCall, D. W. & Patel, C. K. (1992). Industrial ecology: concepts and approaches. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89(3), pp. 793–797. doi:<http://doi.org/10.1073/pnas.89.3.793>

JENSEN, M. C. (1993). The Modern Industrial Revolution, Exit, and the Failure of Internal Control Systems. *The Journal of Finance*, 48(3), pp. 831–880. doi:<http://doi.org/10.1111/j.1540-6261.1993.tb04022.x>

Kempkes, P., Fendel, A., von Smuda, J., Wilms, H. & Zahn, H. (2017). Kreislaufwirtschaft 4.0- technologische Umbrüche, Herausforderungen und Lösungsansätze aus Sicht der Recyclingindustrie. *Chemie Ingenieur Technik*, 89(12), pp. 1706–1713. doi:<http://doi.org/10.1002/cite.201600112>

Kirchherr, J., Reike, D. & Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, pp. 221–232. doi:<http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>

Kraines, S. & Wallace, D. (2008). Applying Agent-based Simulation in Industrial Ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 10(1–2), pp. 15–18. doi:<http://doi.org/10.1162/108819806775545376>

Kuhn, T. (1962). *La estructura de las revoluciones científicas*. Chicago, EE.UU.: University of Chicago Press.

- Lacy, P. & Rutqvist, J.** (2015). *Waste to wealth: The circular economy*. Londres, Inglaterra: Palgrave MacMillan.
- Lewandowski, M.** (2016). Designing the Business Models for Circular Economy—Towards the Conceptual Framework. *Sustainability*, 8(1), 43. doi:<http://doi.org/10.3390/su8010043>
- Lieder, M. & Rashid, A.** (2016). Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry. *Journal of Cleaner Production*, 115, pp. 36–51. doi:<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.042>
- Linder, M., Sarasini, S. & van Loon, P.** (2017). A Metric for Quantifying Product-Level Circularity. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), pp. 545–558. doi:<http://doi.org/10.1111/jiec.12552>
- Lovins, A. & Lovins, H.** (2001). Natural capitalism: New frontiers for chemical engineering. *Chemical Engineer*, (716), pp. 36–37.
- Lovins, L. H. & Lovins, A. B.** (2001). Natural capitalism: Path to sustainability? *Corporate Environmental Strategy*, 8(5), pp. 99–108.
- Marx, K.** (1894). *Capital Volume III. The Process of Capitalist Production as a Whole*. Nueva York, EE.UU.: International Publishers, Ed.
- Masi, D., Day, S. & Godsell, J.** (2017). Supply Chain Configurations in the Circular Economy: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 9(9), 1602. doi:<http://doi.org/10.3390/su9091602>
- Murray, A., Skene, K. & Haynes, K.** (2017). The Circular Economy: An Interdisciplinary Exploration of the Concept and Application in a Global Context. *Journal of Business Ethics*, 140(3), pp. 369–380. doi:<http://doi.org/10.1007/s10551-015-2693-2>
- O'Brien, M.** (2008). *A crisis of waste? Understanding the rubbish society*. Nueva York, EE.UU.: Taylor & Francis Group.
- ONU.** (1987). *Por common Future: Brundtland Report*.
- Pagoropoulos, A., Pigosso, D. C. A. & McAlloone, T. C.** (2017). The Emergent Role of Digital Technologies in the Circular Economy: A Review. *Procedia CIRP*, 64, pp. 19–24. doi:<http://doi.org/10.1016/j.procir.2017.02.047>
- Pauliuk, S., Arvesen, A., Stadler, K. & Hertwich, E. G.** (2017). Industrial ecology in integrated assessment models. *Nature Climate Change*, 7(1), pp. 13–20. doi:<http://doi.org/10.1038/nclimate3148>
- Peralta Álvarez, M. E., Marcos Bárcena, M. & Aguayo González, F.** (2016). A Review of Sustainable Machining Engineering: Optimization Process Through Triple Bottom Line. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(10), 100801. doi:<http://doi.org/10.1115/1.4034277>

- Peralta Álvarez, M. E., Marcos Bárcena, M. & Aguayo González, F.** (2017). On the sustainability of machining processes. Proposal for a unified framework through the triple bottom-line from an understanding review. *Journal of Cleaner Production*, 142, pp. 3890–3904. doi:<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.071>
- Reuter, M. A.** (2016). Digitalizing the Circular Economy. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 47(6), pp. 3194–3220. doi:<http://doi.org/10.1007/s11663-016-0735-5>
- Rhodes, C. J.** (2015). Permaculture: regenerative – not merely sustainable. *Science Progress*, 98(4), pp. 403–412. doi:<http://doi.org/10.3184/003685015X14467291596242>
- Robert, K.-H.** (2002). *The Natural Step Story: Seeding a Quiet Revolution*. Suecia: New Society Press.
- Saavedra, Y. M. B., Iritani, D. R., Pavan, A. L. R. & Ometto, A. R.** (2018). Theoretical contribution of industrial ecology to circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 170, pp. 1514–1522. doi:<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.260>
- Silva, A., Stocker, L., Mercieca, P. & Rosano, M.** (2016). The role of policy labels, keywords and framing in transitioning waste policy. *Journal of Cleaner Production*, 115, pp. 224–237. doi:<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.069>
- Thomas, V. M.** (1997). Industrial Ecology: Towards Closing the Materials Cycle. *Journal of Industrial Ecology*, 1(2), pp. 149–151. doi:<http://doi.org/10.1162/jiec.1997.1.2.149>
- Tukker, A.** (2015). Product services for a resource-efficient and circular economy – a review. *Journal of Cleaner Production*, 97, pp. 76–91. doi:<http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.049>
- Upham, P.** (2000a). An assessment of The Natural Step theory of sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 8(6), pp. 445–454. doi:[http://doi.org/10.1016/S0959-6526\(00\)00012-3](http://doi.org/10.1016/S0959-6526(00)00012-3)
- Upham, P.** (2000b). Scientific consensus on sustainability: the case of The Natural Step. *Sustainable Development*, 8(4), pp. 180–190. doi:[http://doi.org/10.1002/1099-1719\(200011\)8:4<180::AID-SD143>3.0.CO;2-R](http://doi.org/10.1002/1099-1719(200011)8:4<180::AID-SD143>3.0.CO;2-R)
- Valkokari, K., et al.** (2014). Road-mapping the business potential of sustainability within the European manufacturing industry. *Foresight*, 16(4), pp. 360–384. doi:<http://doi.org/10.1108/FS-05-2012-0037>
- van der Giesen, C., Kleijn, R., Kramer, G. J. & Guinée, J.** (2013). Towards application of life cycle sustainability analysis. *Revue de Métallurgie*, 110(1), pp. 29–36. doi:<http://doi.org/10.1051/metal/2013058>
- van der Velden, N. M., Kuusk, K. & Köhler, A. R.** (2015). Life cycle assessment and eco-design of smart textiles: The importance of material selection demonstrated through e-textile product redesign. *Materials & Design*, 84, pp. 313–324. doi:<http://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.129>

Vescan, M. M., Soporan, V. F., Crişan, D. M., Lehene, T. R., Pădureţu, S. & Samuila, V. (2017). Engineering of the institutionalization of the circular economy at the level of casting production. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 209, 12096. doi:<http://doi.org/10.1088/1757-899X/209/1/012096>

Veteto, J. R. & Lockyer, J. (2008). Environmental Anthropology Engaging Permaculture: Moving Theory and Practice Toward Sustainability. *Culture & Agriculture*, 30(1–2), pp. 47–58. doi:<http://doi.org/10.1111/j.1556-486X.2008.00007.x>

Vitari, C. & David, C. (2017). Sustainable management models: innovating through Permaculture. *Journal of Management Development*, 36(1), pp. 14–36. doi:<http://doi.org/10.1108/JMD-10-2014-0121>

Winans, K., Kendall, A. & Deng, H. (2017). The history and current applications of the circular economy concept. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, pp. 825–833. doi:<http://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.123>

Witjes, S. & Lozano, R. (2016). Towards a more Circular Economy: Proposing a framework linking sustainable public procurement and sustainable business models. *Resources, Conservation and Recycling*, 112, pp. 37–44. doi:<http://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.04.015>

Zimmerman, A. & Kibert, C. J. (2007). Informing LEED's next generation with The Natural Step. *Building Research & Information*, 35(6), pp. 681–689. doi:<http://doi.org/10.1080/09613210701342367>

La ingeniería de proyectos ¿Cómo se forja la tecnosfera de una sociedad responsable?

IV

EL PROYECTO COMO METODOLOGÍA INSTRUCCIONAL DESDE LA TEORÍA DE VYGOTSKY PARA EL PENSAMIENTO AFECTIVO COMPLEJO

Antonio Córdoba Roldán y Ana De las Heras García de Vinuesa

1. Introducción

En el Real Decreto 1105/2014 se define la metodología didáctica como *“conjunto de estrategias, procedimientos y acciones organizadas y planificadas por el profesorado, de manera consciente y reflexiva, con la finalidad del posibilitar el aprendizaje del alumnado y el logro de los objetivos planteados”* (Ministerio de educación, 2015). Aguayo, F. y Lama, J.R. (1998) definen la metodología didáctica como *“un sistema de acciones físicas y/o mentales organizadas y estructuradas de un modo sistemático que permite hilvanar los distintos elementos, recursos y capacidades de que se dispone en el escenario docente para la consecución de un objetivo o sistemas de objetivos”*.

El artículo 7 del Decreto 111/2016 plantea una serie de recomendaciones de metodología didáctica, asimismo, en el anexo II de la Orden de 14 de julio de 2016 se indican las estrategias metodológicas a tener en cuenta en la materia de Tecnología:

- Adaptar el currículo de referencia al contexto del centro escolar.
- Eminente carácter práctico con capacidad para generar y fomentar la creatividad.
- La metodología de trabajo en esta materia será activa y participativa, haciendo al alumnado protagonista del proceso de enseñanza-aprendizaje.

En base a esta metodología didáctica las actividades desarrolladas estarán orientadas a la resolución de problemas tecnológicos y se materializarán principalmente mediante el trabajo por proyectos, sin olvidar que muchos problemas tecnológicos pueden resolverse técnicamente mediante el análisis de objetos y trabajos de investigación.

1.1. Trabajo por proyectos

El trabajo por proyectos como método para la resolución de problemas se desarrolla en varias fases diferenciadas:

- Una primera fase en la que se propone un desafío, problema o reto que el alumnado tiene que solventar.

- En la segunda fase el estudiante o alumno reúne y confecciona toda una serie de productos para poder alcanzar con éxito el reto final.
- En la última fase se realiza una evaluación de todo el proceso.

En el caso de proyectos que impliquen el diseño y construcción de un objeto o sistema técnico tendrá especial relevancia la documentación elaborada durante el proceso.

Mediante la metodología de análisis de objetos, el alumnado estudiará distintos aspectos de estos y de los sistemas técnicos, para llegar desde el propio objeto o sistema técnico hasta las necesidades que satisfacen y los principios científicos que en ellos subyacen. Se hará especial hincapié en el uso de recursos innovadores como los espacios personales de aprendizaje: portfolio, webquest, aprendizaje por proyectos, gamificación, clase al revés, etc.

1.2. Principios metodológicos

A partir de lo anteriormente expuesto y teniendo en cuenta que cada situación requiere una actuación particular y concreta, se definen los siguientes principios metodológicos a tener en cuenta en la metodología aplicada para las situaciones de aprendizajes propuestas en el presente trabajo:

- Adecuación del proceso de enseñanza-aprendizaje con los conocimientos previos del alumnado.
- Contextualización. Los contenidos propuestos tendrán relación directa con el entorno del alumnado.
- Socialización. Se fomentará el trabajo en equipo a través de la realización de actividades en grupos de alumnos, donde tengan que organizarse y repartirse las tareas y los tiempos, además de desarrollar el respeto, la tolerancia y la solidaridad entre compañeros. Todo esto se realizará a través del aprendizaje cooperativo.
- Autonomía. Se fomentará el desarrollo de la autonomía personal a través de las diferentes actividades propuestas.
- Creatividad. El alumno deberá utilizar sus propios recursos personales de ingenio, indagación e invención para el desarrollo de las actividades, poniendo en práctica los conocimientos adquiridos.

2. Metodología. Método de proyectos

El método de proyectos constituye un proceso en el cual los resultados del programa de estudios pueden ser identificados fácilmente, pero en el cual los resultados del proceso de aprendizaje de los estudiantes no son predeterminados o completamente predecibles. Este aprendizaje requiere el manejo, por parte de los estudiantes, de muchas fuentes de información y disciplinas que son necesarias para resolver problemas o contestar preguntas que sean realmente relevantes (Figura 1).

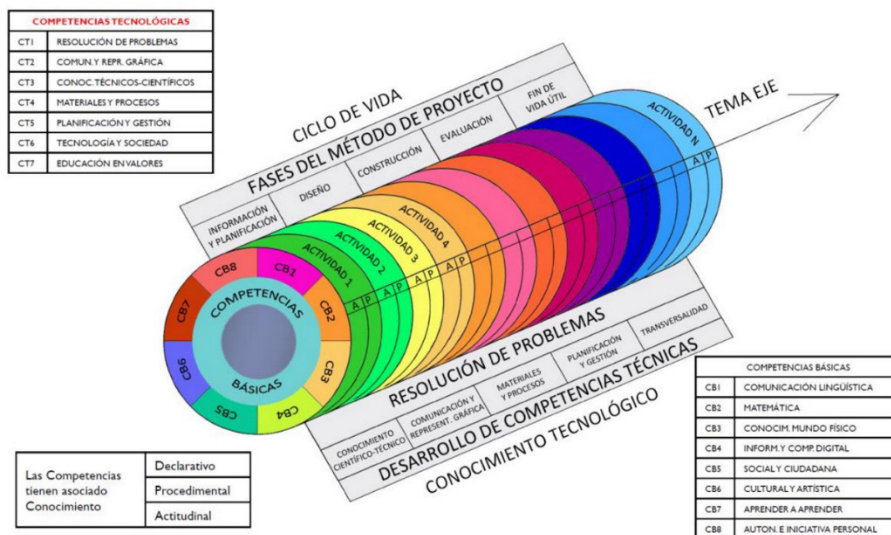


Figura 1. Ciclo de vida del método de proyectos.

Fuente: (Martínez Hervás & Lama Ruiz, 2017).

Con este método se desea que emerja de una visión de la educación en la cual los estudiantes tengan una mayor responsabilidad de su propio aprendizaje y posibilite la aplicación de habilidades y conocimientos adquiridos en el aula de clase en proyectos reales.

El método de proyectos busca enfrentar a los estudiantes a situaciones que los lleven a rescatar, comprender y aplicar aquello que aprenden como una herramienta para resolver problemas o proponer mejoras en las comunidades en donde se desenvuelven (Blanco Jimenez & Aguayo González, 2015).

Cuando se utiliza el método de proyectos como estrategia, los estudiantes estimulan sus habilidades más fuertes y desarrollan nuevas. Se motiva en ellos el amor por el aprendizaje, un sentimiento de responsabilidad y esfuerzo y un entendimiento del rol tan importante que tienen en sus comunidades mediante:

- Un conjunto de experiencias atractivas de aprendizaje que involucran a los estudiantes en proyectos complejos y del mundo real a través de los cuales desarrollan y aplican habilidades y conocimientos.
- Una estrategia que reconoce que el aprendizaje significativo lleva a los estudiantes a un proceso inherente de aprendizaje, a una capacidad de hacer trabajo relevante y a una necesidad de responsabilidad. Se pueden realizar proyectos fuera del aula donde pueden interactuar con sus comunidades, enriqueciéndose todos por dicha relación.

- El método de proyectos es una estrategia de aprendizaje que se enfoca a los conceptos centrales y principios de una disciplina, involucra a los estudiantes en la solución de problemas y otras tareas significativas, les permite trabajar de manera autónoma para construir su propio aprendizaje y culmina en resultados reales generados por ellos mismos.

El método de proyectos se caracteriza por: su afinidad con situaciones reales, relevancia práctica, enfoque orientado a los participantes, enfoque orientado a la acción, enfoque orientado al producto, enfoque orientado a procesos, el aprendizaje holístico – integral, la autoorganización, la realización colectiva y su carácter interdisciplinario.

2.1. Ciclo de vida del método de proyectos

El método de proyectos permite desarrollar el “modelo ideal” de una acción completa a través de las seis fases del proyecto: planificar, informar, decidir (Diseño), planificar; controlar; valorar y reflexionar (Figura 2).

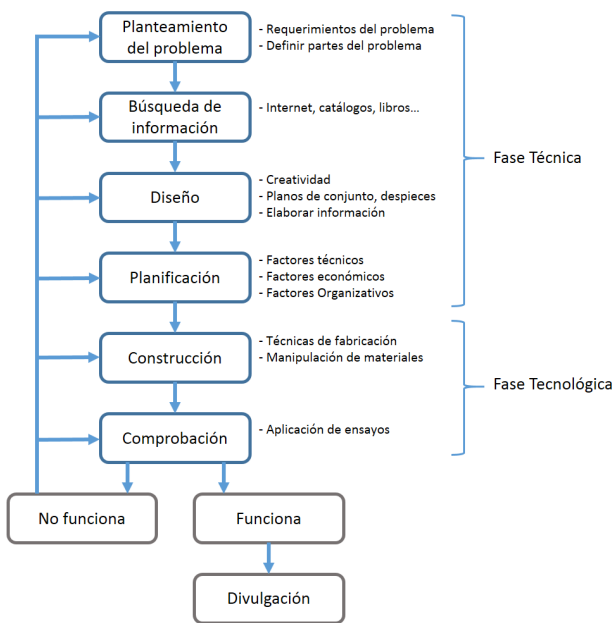


Figura 2. Fases del Método de pro.

Fuente: elaboración propia.

Informar: durante la primera fase los estudiantes (alumnos, aprendices) recopilan las informaciones necesarias para la resolución del problema o tarea planteada. El planteamiento de los objetivos/tareas del proyecto ha de remitirse a las experiencias de los aprendices.

Planificar: la fase de planificación se caracteriza por la elaboración del plan de trabajo, la estructuración del procedimiento metodológico y la planificación de los instrumentos y medios de trabajo.

Decidir/Diseñar: durante esta fase de toma de decisiones el docente tiene la función de comentar, discutir y, en caso necesario, corregir, las posibles estrategias de solución propuestas por los estudiantes. Es importante que los estudiantes aprendan a valorar los problemas, riesgos y beneficios asociados a cada una de las alternativas a optar. Un aspecto fundamental en el aprendizaje por proyectos es el proceso social de comunicación (negociación) que se establece en el grupo en el que los participantes deben aprender a tomar decisiones de forma conjunta.

Realización del proyecto/Construcción: durante esta fase se ejercita y analiza la acción creativa, autónoma y responsable. Se comparan los resultados parciales con el plan inicial y se llevan a cabo las correcciones necesarias, tanto a nivel de planificación como de realización. Este procedimiento de retroalimentación sirve para revisar los resultados parciales y como instrumento de autocontrol y evaluación tanto a nivel individual como grupal.

Controlar: concluida la tarea, los mismos estudiantes realizan una fase de autocontrol con el fin de aprender a evaluar mejor la calidad de su propio trabajo. Durante esta fase, el rol del docente es más bien el de asesor o persona de apoyo, sólo interviene en caso de que los estudiantes no se pongan de acuerdo en cuanto a la valoración de los resultados conseguidos.

Valorar, reflexionar (evaluar): se lleva a cabo una discusión final en la que el docente y los estudiantes comentan y discuten conjuntamente los resultados conseguidos. La función principal del docente es facilitar a todos los participantes una retroalimentación, no sólo sobre el resultado final sino sobre todo el proceso: errores y éxitos logrados, rendimiento de trabajo, vivencias y experiencias.

2.2. Competencias

En cuanto a las competencias estas se pueden clasificar en:

- **La competencia específica** (p. ej., los conocimientos técnicos).
- **La competencia metodológica** (p. ej., planificación y diseño de la secuencia del proyecto).
- **La competencia social** (p. ej., cooperación con los otros miembros del proyecto) y la competencia individual humana (p. ej., disposición para el trabajo en equipo).

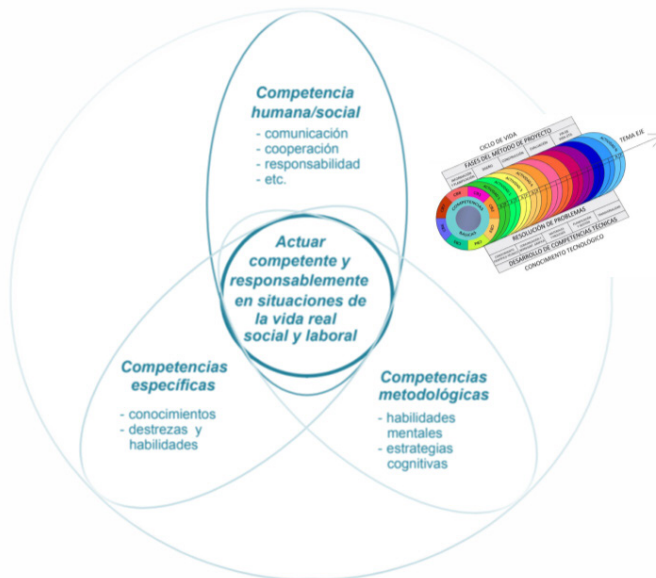


Figura 3. Competencias a desarrollar.

Fuente: elaboración propia.

En concreto se definen las siguientes competencias a desarrollar: competencia en el conocimiento y la interacción con el medio físico, autonomía e iniciativa personal, competencia en el tratamiento de la información y la competencia digital, competencia social ciudadana, competencia matemática, competencia en comunicación lingüística, competencia de aprender a aprender, competencia cultural y artística.

3. Propuesta de modelos de diseño instruccional

Dentro de los modelos de diseño instruccional referido a la unidad didáctica, el modelo considerado para efectuar el diseño instruccional se establece en el marco prescriptivo y se corresponde con el conjunto de principios de aprendizaje procedente del conductismo, cognitivismo, constructivismo y el conectivismo.

El conductismo es el conjunto de teorías del aprendizaje que estudia la conducta del ser humano y busca predecir y manipular dicha conducta a partir de la situación, la respuesta y el organismo. Se enfoca hacia la repetición de patrones de conducta hasta que estos se realizan de manera automática.

Por otro lado, el cognitivismo incluye teorías que se centran en el estudio de la mente humana para comprender cómo interpreta, procesa y almacena la información en la memoria. Este modelo de teorías asume que el aprendizaje se produce a partir de la experiencia, pero, a diferencia del conductismo, lo concibe no como un simple traslado de la realidad, sino como una representación de dicha realidad.

Por su parte el conectivismo integra los principios explorados por las teorías del caos, redes, complejidad y auto-organización. El punto de partida es el individuo. Su conocimiento personal se compone de una red, la cual alimenta a organizaciones e instituciones, las que a su vez retroalimentan a la red, proveyendo nuevo aprendizaje para los individuos, lo que les permite a su vez estar actualizados en su área mediante las conexiones que han formado.

Por último, el constructivismo es la teoría que establece que las personas aprenden asociando nuevas experiencias a conocimientos previos para construir conocimientos más complejos. Los principales referentes teóricos en los que se asienta son tres:

- **Teoría epistemológica de Piaget**, aportando nociones como el conocimiento como construcción, el proceso de equilibración y construcción de esquemas, y los niveles de desarrollo cognitivo.
- **Teoría del aprendizaje verbal significativo de Ausubel**, con aportaciones como el aprendizaje significativo y los conocimientos previos.
- **Teoría del origen sociocultural de los procesos psicológicos superiores de Vygotsky**, que propone la educación escolar como contexto de desarrollo, zona de desarrollo próximo y el profesor como mediador.

3.1. Constructivismo

El aprendizaje constructivista subraya el papel esencialmente activo de quien aprende, por lo que las acciones formativas deben estar centradas en el proceso de aprendizaje, en la creatividad del estudiante y no en los contenidos específicos. Las premisas que guían el proceso de diseño instruccional son:

- El conocimiento se construye a partir de la experiencia.
- El aprendizaje es una interpretación personal del mundo.
- El aprendizaje debe ser significativo y holístico, basado en la realidad de forma que se integren las diferentes tareas.
- El conocimiento conceptual se adquiere por la integración de múltiples perspectivas en colaboración con los demás.
- El aprendizaje supone una modificación de las propias representaciones mentales por la integración de los nuevos conocimientos.

Dentro del constructivismo existen varias vertientes que se describen a continuación:

- Vertiente genético-cognitiva (Jean Piaget): Se centra en cómo se construye el conocimiento partiendo desde la interacción con el medio.

- Vertiente sociocultural (Lev Vygotski): Vygotsky (1930) señalaba que la inteligencia se desarrolla gracias a ciertos instrumentos o herramientas psicológicas que el/la niño/a encuentra en su entorno social, entre los que el lenguaje se considera la herramienta fundamental.
- Vertiente cognoscitivista (David P. Ausubel): Ausubel (1970) difiere del supuesto de Piaget de que sólo se entiende lo que se descubre, ya que también puede entenderse lo que se recibe.

3.2. Piaget

Los principios generales del modelo de orientación Piaget basado en la teoría del desarrollo cognitivo sobre el aprendizaje son:

- Los objetivos pedagógicos deben, además de estar centrados en el alumno, partir de sus actividades.
- Los contenidos, no se conciben como fines, sino como instrumentos al servicio del desarrollo evolutivo natural.
- El principio básico de la metodología piagetiana es la primacía del método de descubrimiento.
- El aprendizaje es un proceso constructivo interno, de reorganización cognitiva que depende del nivel de desarrollo del sujeto.
- En el desarrollo del aprendizaje son importantes los conflictos cognitivos.
- La interacción social favorece el aprendizaje.
- La experiencia física supone una toma de conciencia de la realidad que facilita la solución de problemas e impulsa el aprendizaje.
- Las experiencias de aprendizaje deben estructurarse de manera que se privilegie la cooperación, la colaboración y el intercambio de puntos de vista en la búsqueda conjunta del conocimiento (aprendizaje interactivo).

Piaget tiene la concepción del aprendizaje como un equilibrio entre asimilación y acomodación, cuyo valor es el mismo del equilibrio de la interacción del intelecto y el medio: proceso de adaptación, influencia de las acciones físicas en las cosas, cooperación social y lenguaje.

3.3. Vygotsky

Vygotsky, en su modelo de orientación basado en la formación de equipos de trabajo (teoría de la zona de desarrollo próximo) tiene la concepción del aprendizaje como parte de su carácter social determinado por procesos de colaboración donde el alumno se

desarrolla en la vida intelectual con aquellos que le rodean. La interacción social es el origen y motor del aprendizaje. Por ello, Vygotsky plantea que el estudiante asume una disposición para aprender y comprometerse a trabajar para conseguirlo; por otro lado, el docente tiene la obligación de preparar el escenario y actuar como agente mediador entre el alumno y la cultura. Vygotsky concibe el aprendizaje como parte de su carácter social determinado por procesos de colaboración donde el alumno se desarrolla en la vida intelectual con aquellos que le rodean. Vygotsky establece las siguientes categorías.

La relevancia que adquieren para Vygotsky las interacciones con expertos (adultos o niños) y para Piaget las interacciones entre iguales, deriva de sus creencias opuestas acerca del modo en que la conversación externa afecta al pensamiento interno. Para Vygotsky el pensamiento (o habla interna) refleja claramente sus orígenes sociales en los dos sentidos de la palabra social: en sus orígenes, en la interacción y en su utilización como sistema simbólico culturalmente organizado, especialmente el lenguaje.

Para Piaget, por el contrario, la interacción es importante porque estimula el conflicto cognoscitivo y la conversación es un catalizador de cambios internos sin influencia directa de las formas y funciones del pensamiento.

En cuanto al modelo de aprendizaje activo de zonas de desarrollo, Vygotsky distingue dos niveles de desarrollo del individuo; por un lado, el nivel actual, lo ya aprendido, y lo que se encuentra en proceso de formación, lo que el individuo sería capaz de aprender con la ayuda de otras personas más capaces (Figura 4). Se fomenta el trabajo en grupos de estudiantes con distintos niveles o distintas capacidades de trabajo, para que el estudiante pueda aprender del compañero que tiene más conocimientos en la materia.

En el plano didáctico esto significa que quien enseña no puede limitarse solamente a transmitir al que aprende los conocimientos acumulados en la ciencia particular, sino, que debe estimular el desarrollo de las potencialidades del alumno, identificando lo que éste ya sabe y, sobre esa base, planteándole situaciones de aprendizaje en las que el alumno construya su propio conocimiento (Figura 5).

Por ello, es fundamental el trabajo en grupo de alumnos con distintos niveles o distintas capacidades de trabajo, para que el alumno pueda aprender del compañero que tiene más conocimientos en esa materia. En el plano didáctico esto significa que quien enseña no puede limitarse solamente a transmitir al que aprende los conocimientos acumulados en la ciencia particular, sino que debe estimular el desarrollo de las potencialidades del alumno (Carretero, 1997; Ferreiro, 1995), identificando lo que éste ya sabe y, sobre esa base, planteándole situaciones de aprendizaje en las que el alumno construya su propio conocimiento



Figura 1.6. Zonas de desarrollo según Vygotsky. Aguayo, F., Lama, J.R. (1998). "Didáctica de la Tecnología: fundamentos del diseño y desarrollo del currículum tecnológico"

Figura 4. Zonas de desarrollo según Vygotsky.

Fuente: (Aguayo González & Lama Ruiz, 1998).

Estos modelos de microdiseño instruccional de las situaciones didácticas de aprendizaje se ajustan a lo establecido en el marco prescriptivo y se han considerado para el desarrollo de las situaciones de aprendizaje los siguientes modelos:

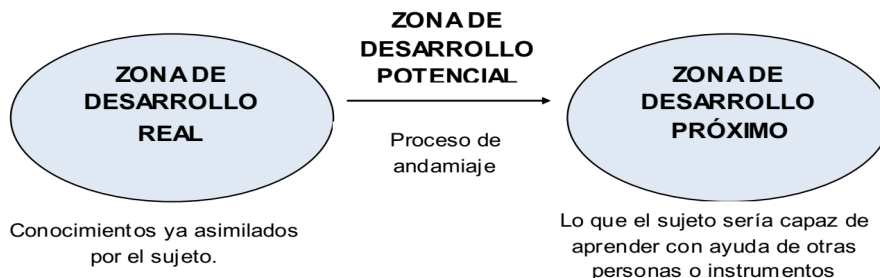


Figura 1.1. Teoría de la zona de desarrollo próximo de Vigotski
Fuente. *Elaboración propia*

Figura 5. Teoría de la zona de desarrollo próximo de Vygotsky.

Fuente: (Aguayo González & Lama Ruiz, 1998).

3.4. Conflicto cognitivo

El profesor deberá introducir conflictos cognitivos con el fin de motivar al estudiante y despertar su interés por la actividad.

La función mediacional de los profesores en el desarrollo de los conflictos cognitivos es de extraordinaria importancia y puede hacerse mediante tres tipos de actuaciones consistentes en:

- Transformar las divergencias objetivas en conflictos efectivos.
- Identificación de divergencias residuales.
- Organización de las intervenciones.

Intervenir en los conflictos para aprovechar sus posibilidades y conducirlos del modo más eficiente:

- Evitar la impotencia cognitiva.
- Afrontar los conflictos del alumno.
- Reformular el problema en etapas.
- Abrir nuevos conflictos.

4. Discusión. El pensamiento complejo

El pensamiento es aquello que se instala en la existencia a través de la actividad intelectual, pudiéndose decir que el pensamiento es un producto de la mente el cual puede emerger a través de actividades racionales del intelecto o por abstracciones de la imaginación (Escobar Mazariegos, 2011).

El significado de la palabra "complejidad" es vago y ambiguo; no existe una definición

universal, precisa (por ejemplo, formal) y ampliamente aceptada. La palabra latina original “complexus” significa “entrelazado” o “retorcido”, haciendo referencia a aquello que integra diversos elementos que interactúan (unión). Esta definición es similar a la propuesta por el diccionario Oxford, donde se define la complejidad como algo que está hecho de (generalmente varias) partes estrechamente conectadas. En base a ello, un proyecto sería más complejo si existieran más partes o fases, y más conexiones entre ellas.

La realidad, el pensamiento y el conocimiento son complejos, es por ello que para entender el mundo sea necesario adoptar una perspectiva de complejidad. Esto lleva a que el estudio y análisis de un fenómeno pueda hacerse desde una perspectiva holística (referido al estudio desde el todo o todo múltiple) y una perspectiva reduccionista (referido al estudio de las partes que integran el todo).

El concepto de pensamiento complejo fue propuesto por el filósofo Edgar Morin (1995), el cual se puede definir como a la capacidad de interconectar distintas dimensiones de lo real.

Ante el desarrollo de un proyecto multidimensional, interactivo y con fases y componentes aleatorios, el responsable del proyecto se ve en la necesidad de desarrollar una estrategia de pensamiento reflexiva (ni reduccionista, ni totalizante).

Matthew Lipman (1998) establece que el pensamiento complejo en la enseñanza es el pensamiento apto globalizar, contextualizar y unir, reconociendo al mismo tiempo características singulares, individuales y concretas. Para Lipman es necesaria una transformación en el ámbito educativo proponiendo incorporar la filosofía en todos los niveles como “driver innovador” para enseñar a pensar.

El pensamiento complejo se enfoca cuando existen fenómenos donde interactúan varios factores, combinando principios de regulación y no equilibrio, donde está presente la contingencia y el determinismo, la creación y la destrucción, el orden y el desorden; y en el cual los niveles de organización y las dinámicas no lineales se pueden identificar por retroalimentación entre los diferentes niveles.

El pensamiento complejo no es holístico, es decir, no se centra en lo global en lugar de en el análisis de lo particular, de los elementos. El objetivo del pensamiento complejo es poder articular el todo y las partes, lo global y lo particular en un flujo constante de intercambio.

Diversos estudios han propuesto diferentes medidas que definen la complejidad dentro de las disciplinas científicas. Tales medidas de complejidad son generalmente dependientes del contexto. Colwell (2005) define treinta y dos tipos de complejidad en doce disciplinas diferentes y dominios tales como complejidad de proyectos, estructural, técnica, computacional, funcional y operacional. La complejidad de los proyectos de ingeniería es invariablemente multidimensional. El desarrollo de

un proyecto complejo generalmente consiste en un gran número de miembros, elementos o agentes, que interactúan entre sí y con el entorno. Estas interacciones pueden generar un nuevo comportamiento colectivo, cuya manifestación puede estar en uno o más de los siguientes dominios: funcional, estructural, espacial o temporal. Un proyecto complejo es un sistema “abierto”, en el sentido termodinámico, que involucra principios de entropía, así como interacciones no lineales entre sus subsistemas que pueden exhibir, bajo ciertas condiciones, un grado de comportamiento desordenado (Elmaraghy, Elmaraghy, Tomiyama, & Monostori, 2012).

En ciencias humanas, las aplicaciones del pensamiento complejo son más recientes que en otras áreas como las ciencias naturales y de gestión. Desde una perspectiva compleja, la educación, por ejemplo, corresponde a una dinámica no lineal generada por una multiplicidad de fuerzas interactivas (gobierno, tecnología, acción de grupos sociales, la cultura, etc.). La dinámica puede converger creando patrones auto organizados o destruyendo estructuras regulares. En ambos procesos hay momentos de estabilización, reacciones (positivas o negativas), momentos de desestabilización y bifurcación en desarrollos desiguales (Ferrara, 2010).

Desde el punto de vista epistemológico, el pensamiento complejo se caracteriza por tres actitudes fundamentales:

- La necesidad de desarrollar un marco teórico que se enfrente a la perspectiva empirista y ecléctica todavía muy presente en la investigación cotidiana.
- La necesidad de inventar y desarrollar proyectos novedosos mediante la orientación constructivista que en lugar del positivismo conduce en la dirección de la imaginación conceptual.
- La necesidad de reintegrar a la producción de conocimiento en la sociedad, evitando una epistemología excesivamente abstracta, alejada de la sociología.

Para Morin (1981) la base para el pensamiento complejo se construye a partir de tres teorías: la teoría de la información y la comunicación, la cibernética y la teoría de sistemas, incluye herramientas esenciales para una teoría de la organización. En un segundo nivel están las contribuciones de Von Foerster (1984), Nicolis y Prigogine (1989) en relación con las ideas de autoorganización y los conceptos de la teoría del caos. Se pueden agregar elementos complementarios en forma de tres principios propuestos por Morin (2014): el principio dialógico; el principio de recursión organizacional; y el principio hologramático.

A través del principio dialógico, dos procesos o conceptos antagónicos, que deberían rechazarse, se unen de manera complementaria, esencial e inseparable para

entender una realidad dada. Dos nociones antagónicas se unen entonces para pensar los procesos organizativos, productivos y creativos en el mundo complejo. La noción dialógica de Morin implica complementariamente, antagonismo y competencia entre los elementos que están en diálogo; ampliando así la noción de la dialéctica.

El principio de recursión de la organización va más allá de un principio de retroalimentación propio de la teoría de los sistemas y la cibernética. La noción de regulación, presente en el principio de retroalimentación, se extiende por la noción de autoproducción y autoorganización. En base a este principio los seres humanos producen la sociedad dentro de sí misma y por sus interacciones; a su vez, la sociedad produce la humanidad de los individuos proporcionándoles por ejemplo el idioma y la cultura.

Por último, el principio hologramático resalta la aparente paradoja de ciertos sistemas, donde no solo la parte está en el todo, sino que la totalidad está en la parte. Teniendo en cuenta este principio se puede establecer que el individuo es parte de la sociedad, y que la sociedad está presente en cada individuo por ejemplo a través del lenguaje, la cultura y sus normas.

El pensamiento científico clásico se construyó sobre tres pilares: el orden, la separación y la razón. El pensamiento complejo, lejos de reemplazar la idea de orden por el de desorden, o viceversa, tiene como objetivo ponerlo en una perspectiva dialógica, orden, desorden y organización. Las ideas de orden y desorden ya no se excluyen unas a otras.

La noción de separación corresponde al principio cartesiano según el cual para estudiar un fenómeno este se debe dividir en elementos simples. El pensamiento complejo no sustituye la separación por inseparabilidad, sino que, una vez más, recurre a un diálogo que utiliza lo separable, pero insertándolo en lo inseparable.

El tercer pilar de la razón clásica se basa en los principios de inducción, deducción e identidad, es decir, el rechazo de la contradicción. De acuerdo con este principio Tarski (Tarski & Corcoran, 1983) enuncia que ningún sistema tiene suficientes métodos o formas de autoexplicarse.

En particular, la futura progresión de los proyectos de ingeniería puede volverse muy sensible a las condiciones en momentos dados lo cual puede generar en un "comportamiento caótico". Para el desarrollo de proyectos de ingeniería se deben considerar tres dimensiones de la complejidad; el resultado (producto), las tareas a realizar (sistema de fabricación) y la organización del proyecto (organización empresarial) (Eppinger & Salminen, 2001).

Un proyecto complicado podría referirse a un proyecto que tiene muchas fases, lo que dificulta su comprensión, quizás en virtud de su tamaño, mientras que complejo se refiere a un proyecto que contiene incertidumbre durante el proceso de desarrollo

o intrínsecamente en su diseño, ya que el resultado no es completamente predecible o controlado (Figura 6). La complejidad también puede estar en el nivel operativo, en la realización de las tareas en sí. Lo que es complicado no es necesariamente complejo, y viceversa, y lo que es complicado para una persona, puede ser complejo para otra persona con menos formación o con menos disponibilidad de herramientas tecnológicas.

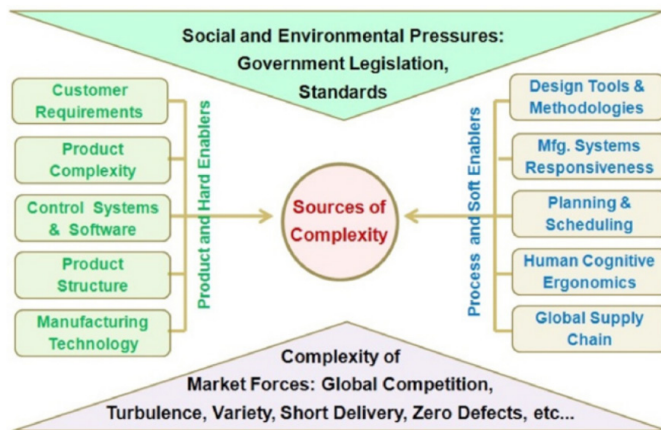


Figura 6. Generadores de complejidad en el proyecto.

Fuente: Elmaraghy *et al.*, 2012.

Por otro lado, un proyecto caótico sería aquel en el cual las pequeñas diferencias en las condiciones iniciales producen resultados muy diferentes. Los proyectos caóticos son difíciles de manejar y controlar, y la predicción a largo plazo es generalmente imposible. Un ejemplo clásico es el conocimiento tácito que se hace explícito cuando se descubre una explicación científica. Con este conocimiento científico y con el soporte de otros métodos y herramientas de ingeniería, los fenómenos inexplicables se vuelven difíciles, en vez de complejos o caóticos (Petroski, 2006).

La complejidad del diseño a menudo se combina con una mayor complejidad en la gestión de la configuración, ya que los clientes exigen especificaciones más exactas y más personalización. A continuación, se presenta un breve resumen de algunas investigaciones publicadas en esta área.

ElMaraghy y Urbanic (2004; 2003) consideran que los operadores humanos y su percepción de la complejidad de las tareas a desarrollar en un proyecto son un factor importante para establecer la complejidad del proyecto. En base a ello se establecen tres elementos de complejidad: cantidad absoluta de información, diversidad de información y contenido de la información (esfuerzo).

En educación, Piaget fue el autor pionero en reafirmar el pensamiento complejo. Recientemente se ha tratado de elaborar planes de estudio y metodologías que permitan la transición de un pensamiento simple a uno complejo. Es por ello que en el

ámbito de la educación se busque una perspectiva compleja del mundo que permita superar nociones basadas en la causalidad estricta y lineal que a menudo están presentes en la práctica educativa, así como en los libros de texto (Ferrara, 2010). Esta perspectiva compleja educacional aborda la necesidad de superar el proceso de fragmentación del conocimiento. En el ámbito educacional la interdisciplinariedad tiene un significado más preciso con respecto al proceso de aprendizaje, en el cual la selección y organización de los contenidos debe abordarse desde una perspectiva sistémica y compleja.

5. Conclusiones

El pensamiento complejo se sitúa entre la certeza y la incertidumbre, entre lo elemental y lo global, entre lo distinguible e indistinguible. Esta propuesta no trata de abandonar los principios de la ciencia clásica (orden, separación y lógica inductivo-deductivo-identidad), sino que se integran en ellos al mismo tiempo, generando una concepción más amplia. No se trata de abandonar el reduccionismo o la causalidad estricta, sino utilizarlos cuando sea necesario para facilitar la comprensión del objeto o sistema estudiado, combinando el objeto o sistema con sus aspectos complejos cuando están presentes. No se trata de negar la disciplina y la especialización en la confrontación con la multidisciplinariedad o la interdisciplinariedad, sino utilizar cada una de ellas cuando el problema a resolver lo requiera. Es decir, se trata de articular los principios de orden y desorden, separación y unión, autonomía y dependencia, los cuales están en el diálogo constante.

Uno de los mayores desafíos a los que se enfrenta la realización de proyectos de ingeniería es la creciente complejidad de los sistemas a resolver, los cuales se desarrollan en un entorno de cambio e incertidumbre. Esta complejidad se manifiesta en productos y procesos de fabricación, así como en estructuras de la empresa (H. A. ElMaraghy, Kuzgunkaya, & Urbanic, 2005). Los desafíos a los que se enfrenta el desarrollo de proyectos de ingeniería se caracterizan por la complejidad del resultado (diseño), el cual debe combinarse con un sistema de fabricación flexible y complejo, así como con procesos empresariales ágiles avanzados. Esto es particularmente importante en proyectos de diseño y desarrollo de productos complejos y de alto valor que son de naturaleza multidisciplinaria. Hoy en día esta es un área de actuación bastante amplia ya que la mayoría de los productos industriales y de consumo son complejos.

La educación es un área privilegiada para la construcción del pensamiento complejo, ya que la dinámica de los procesos educativos es compleja y su realidad del mundo donde los profesores y los estudiantes están inmersos también lo es (García Díaz, 1998). A pesar de que hay una fuerte intuición en esta dirección por parte de quienes trabajan en educación, también es cierto que en la acción pedagógica en el aula y en la selección y organización de los contenidos educativos, que se man-

fiestan en los planes de estudio y en la mayoría de los libros de texto disponibles, están aún lejos de alcanzar los cambios necesarios para superar la fragmentación disciplinaria del conocimiento, así como la práctica de presentar el contenido basado en una lógica de causalidad estricta, que restringe (y con mayor frecuencia evita) la retroalimentación entre contenidos, procedimientos, enfoques y entre educadores y estudiantes (Zabala Vidiella, 1999). Es por ello el gran interés de construir marcos teóricos para apoyar acciones pedagógicas que tienen en cuenta la complejidad de lo real y del aula. Hay que admitir que, cuando se habla de cambio de paradigma, la educación es un punto crucial.

6. Referencias bibliográficas

Aguayo González, F. & Lama Ruiz, J. R. (1998). *Didáctica de la tecnología: fundamentos del diseño y desarrollo del curriculum tecnológico*. Tébar.

Blanco Jimenez, B. & Aguayo González, F. (2015). *Deja que la electrónica te imprima de conocimiento*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.

Colwell, B. (2005). Complexity in Design. *Computer*, 38(10), pp. 10–12. doi:<http://doi.org/10.1109/MC.2005.334>

ElMaraghy, W. H. & Urbanic, R. J. (2004). Assessment of Manufacturing Operational Complexity. *CIRP Annals*, 53(1), pp. 401–406. doi:[http://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60726-4](http://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60726-4)

ElMaraghy, H. A., Kuzgunkaya, O. & Urbanic, R. J. (2005). Manufacturing Systems Configuration Complexity. *CIRP Annals*, 54(1), pp. 445–450. doi:[http://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60141-3](http://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60141-3)

Elmaraghy, W., Elmaraghy, H., Tomiyama, T. & Monostori, L. (2012). Complexity in engineering design and manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(2), pp. 793–814. doi:<http://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.05.001>

ElMaraghy, W. H. & Urbanic, R. J. (2003). Modelling of Manufacturing Systems Complexity. *CIRP Annals*, 52(1), pp. 363–366. doi:[http://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60602-7](http://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60602-7)

Eppinger, S. & Salminen, V. (2001). Patterns of Product Development Interactions.

Escobar Mazariegos, M. C. (2011). El pensamiento complejo de Edgar Morin y los siete saberes necesarios para la educación del futuro. Recuperado el 2 de octubre de 2018 de: <https://www.gestiopolis.com/pensamiento-complejo-edgar-morin-saberes-necesarios-educacion-futuro/>

Ferrara, N. F. (2010). The Complex Thinking: building of a new paradigm. *Revista Do Nomads.Usp*, 1.

García Díaz, J. E. (1998). *Hacia una teoría alternativa sobre los contenidos escolares*. Díada.

Lipman, M. (1998). *Pensamiento complejo y educación*. Ediciones de la Torre.

- Martinez Hervás, M. & Lama Ruiz, J. R.** (2017). *Los roles en los grupos de trabajo*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- Ministerio de educación, cultura y deporte.** (2015). Real Decreto 1105/2014. *Organic Chemistry Frontiers*, 3, pp. 169–546.
- Morin, E.** (1981). *El Método*. Cátedra.
- Morin, E.** (1995). *Introducción al pensamiento complejo*. Gedisa.
- Morin, E.** (2014). Complex Thinking for a Complex World: About Reductionism, Disjunction and Systemism. *Systema*, 2(1), pp. 14–22. doi:<http://doi.org/10.1007/BF02818316>
- Nicolis, G. & Prigogine, I. (Ilya).** (1989). *Exploring complexity : an introduction*. W.H. Freeman.
- Petroski, H.** (2006). *Success through failure: the paradox of design*. Princeton University Press.
- Tarski, A. & Corcoran, J.** (1983). *Logic, semantics, metamathematics*. Hackett Pub. Co.
- Von Foerster, H.** (1984). *Observing systems*. Seaside, Calif. : Intersystems Publications.
- Zabala Vidiella, A.** (1999). *Enfoque globalizador y pensamiento complejo: una respuesta para la comprensión e intervención en la realidad*. Graó.

Ingeniería y Tecnología

