

# ECOLOGÍA INDUSTRIAL: UNA DISCIPLINA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE EN LAS INDUSTRIAS

Industrial Ecology:  
A discipline for sustainable development in industries

Recibido: 08/12/2015  
Aceptado: 15/02/2016

Juan Carlos Rojas Zerpa  
Universidad de Los Andes, Venezuela. juancrojas@ula.ve

## Resumen:

Este trabajo presenta una revisión documental sobre los principales aspectos teóricos involucrados en la Ecología Industrial (EI): una disciplina cuya dinámica se basa en una analogía entre la industria y los sistemas naturales. Como tal, permite la incorporación de criterios ambientales y sociales en las distintas etapas del diseño de productos, procesos y servicios, con el fin de atender las necesidades del mercado sin afectar su rendimiento económico y técnico. La variedad de estrategias y herramientas que apoyan esta disciplina son el resultado del interés práctico que ha ganado en recientes años. La aplicación consistente y metódica de la Ecología Industrial permite alcanzar múltiples beneficios, incluyendo la sostenibilidad en el diseño de productos y en los procesos industriales.

Palabras clave: Ecología Industrial, sostenibilidad, diseño de productos, productos sostenibles.

## Abstract:

This work presents a literature review about the main theoretical issues involved in Industrial Ecology (IE): a discipline whose dynamics is based on an analogy between industry and natural systems. As such, it allows the incorporation of environmental and social criteria in the different design stages of products, processes and services, in order to fulfil market needs without affecting their economic and technical performance. The variety of strategies and tools supporting this discipline comes from the practical interest it has gained in recent years. The consistent and methodical application of Industrial Ecology helps to achieve multiple benefits, including the sustainability in product design and industrial processes.

Key words: Industrial Ecology, sustainability, product design, sustainable products.

## 1. Introducción

Las altas concentraciones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>) en la atmósfera terrestre originan el efecto invernadero. La acumulación de estos gases, derivados principalmente de actividades humanas, está originando alteraciones climatológicas importantes como consecuencia del aumento de temperatura a escala global. Una evidencia clara e inequívoca del sobrecalentamiento global son los glaciares (Lemke et al., 2007). Al respecto, Braun and Bezada (2013) realizaron una evaluación y determinaron un retroceso total de los glaciares venezolanos, ubicados en la Sierra Nevada del estado Mérida, de 95% (2011). De continuar esta tendencia es probable que las pequeñas masas de hielo se extingan por completo en la presente década.

Además del cambio climático existen otros problemas ambientales de origen antrópico como el agotamiento de los recursos naturales, la escasez de agua, la contaminación ambiental, la pérdida de biodiversidad, la afectación de la capa de ozono, entre otros factores, que podrían comprometer totalmente la calidad de vida en el planeta de no revertirse el uso irracional de los bienes y servicios que provee la naturaleza.

El deterioro actual de la calidad ambiental a causa de las actividades industriales, la agricultura y otros sectores, presionados por el crecimiento exponencial de la población, sugieren un replanteamiento en los procesos industrializados de los diversos sectores de la economía para controlar o mitigar los efectos adversos sobre los ecosistemas. Por ejemplo, las industrias basan su modelo de producción en procesos de metabolismo lineal, es decir, materias primas, energía y otros recursos naturales que entran al proceso de manufactura y que posteriormente salen convertidos en productos y subproductos, además de los residuos, emisiones y efluentes que terminan esparcidos en la naturaleza sin ningún control y desconectados totalmente de los recursos (Fig. 1). La acumulación inexorable de desechos, partículas y gases contaminantes superan la capacidad de absorción o degradación de la naturaleza. En efecto, este desequilibrio ecológico concuerda con el actual modelo de consumismo exacerbado donde 1 de cada 10.000 productos son diseñados con criterios ambientales (Datschefski, 2001). Este desbalance de las industrias en proporcionar bienes y servicios que sean coherentes con el equilibrio de la naturaleza exige una reconversión de sus procesos a modelos que sean compatibles con la naturaleza.

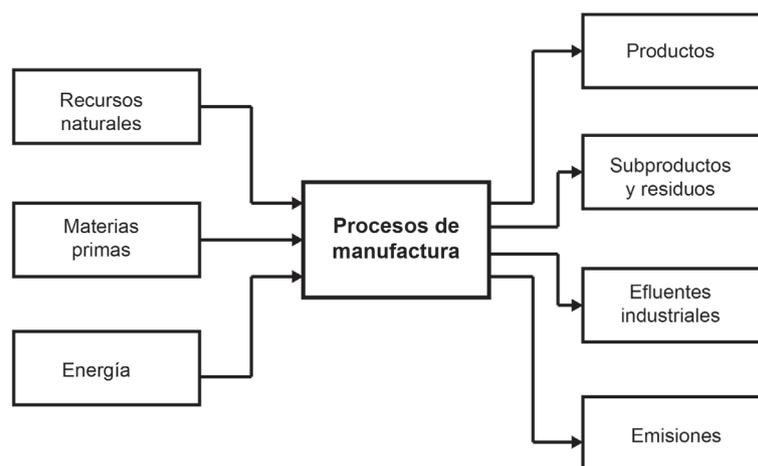


Figura 1. Diagrama de bloque "Metabolismo de producción de flujo lineal".

Fuente: elaboración propia.

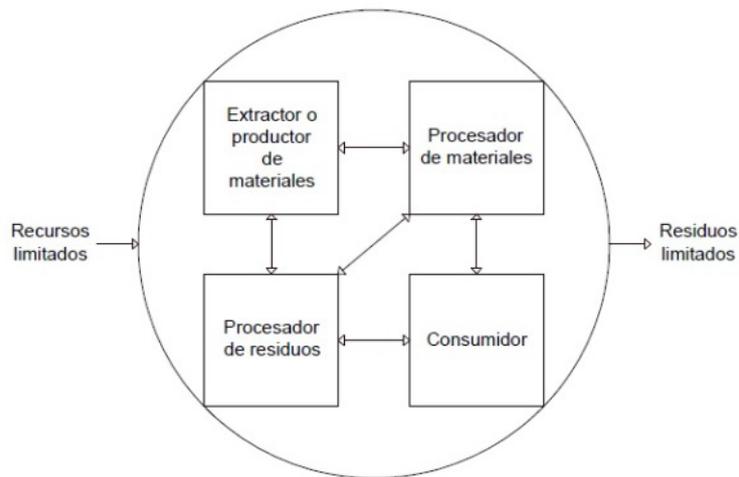


Figura 2. Esquema de un ecosistema industrial ideal.

Fuente: Bermejo, 2001, p. 3

La modificación del metabolismo lineal (Tipo I) a circular (Tipo III) proporciona un reordenamiento del sistema de producción y aprovechamiento de materias primas y energía (entradas), en donde los residuos y vertidos son conectados (salidas indeseadas) a los recursos o materiales de entrada al proceso productivo, cerrando completamente los ciclos naturales (Fig. 2). El rediseño de estos sistemas industriales, imitando los ciclos biológicos, es la base de una innovadora disciplina conocida como Ecología Industrial (EI).

## 2. La Ecología Industrial como disciplina

En esta nueva disciplina se abordan los problemas ambientales ocasionados por la industria en sus distintos procesos desde una visión holística. A continuación se desarrollan los principales conceptos y contenidos vinculados a la Ecología Industrial.

### 2.1 Qué es la Ecología Industrial?

Como señala Ehrendfel (1995), la Ecología Industrial surgió de la evolución del paradigma de gestión ambiental. No obstante, la expresión como tal aparece a comienzos de los años 70 con la innovadora propuesta del parque industrial de Kalundborg (Dinamarca) (Ehrendfel and Gertler, 1997). En esa década Robert Ayres desarrolló la teoría del metabolismo industrial,

que relaciona los flujos de energía y materiales en los procesos industriales, de donde se establecieron las bases de la Ecología Industrial. El concepto y nombre se unen en 1989, gracias a los aportes de Robert Frosch y Nicholas Gallopoulos, quienes además introducen por primera vez el concepto de Ecosistema Industrial. Un año más tarde, la U.S. National Academy of Sciences organiza un congreso, que se considera el acontecimiento fundador de la Ecología Industrial.

En la actualidad no hay un concepto aceptado o unificado universalmente. Sin embargo, existen múltiples definiciones que guardan atributos similares. A continuación se citan algunos de ellos. White (1994) definió la Ecología Industrial como el estudio de los flujos de materiales o energía en la industria, y los efectos de esos flujos sobre el ambiente, que influyen o afectan notablemente los factores económicos, políticos y sociales. Graedel and Allenby (1995) la definió como "la ciencia de la sostenibilidad" (Ehrenfeld, 2004, p. 1). Fiksel (2002) percibió a la Ecología Industrial como un marco holístico para la transformación de los sistemas industriales desde un modelo lineal hasta uno circular (cerrado), que busca simular el flujo cíclico de los ecosistemas. Más recientemente, la Ecología Industrial constituye un nuevo enfoque del diseño industrial de productos y procesos y de la implementación de nuevas estrategias sostenibles de fabricación (Aranda



Figura 3. Esquema de un ecosistema industrial Tipo I.

Fuente: adaptado de Graedel y Lifset, 2002, p. 5

y Zabalza, 2010) tales como: ecoeficiencia, sistema de gestión ambiental, análisis de ciclo de vida, diseño para el ambiente, logística inversa, etc. (ver sección 2.3). Al respecto, la disciplina busca crear una red de industrias (ecosistema industrial) para interrelacionarse, buscando simular los ciclos naturales y con ello alcanzar el Desarrollo Sostenible, es decir, la máxima eficiencia económica y ecológica, y el mayor bienestar posible del entorno social.

Graedel y Allenby (1995) establecieron una clara diferencia en el funcionamiento de los sistemas naturales y artificiales (recursos, materiales, energía y residuos). De esa analogía, la Ecología Industrial permite a las industrias propiciar un cambio de paradigma en el metabolismo o sistema de producción lineal (Tipo I) a uno cíclico (Tipo III). El Sistema Tipo I está representado por un proceso lineal, donde los materiales y la energía entran en una parte del sistema

y luego salen como productos, subproductos, residuos, emisiones y vertidos (Fig. 3). En efecto, este es el sistema predominante en la actualidad, definido por Hernández (2010) como "Cero natural", que es totalmente incompatible e insostenible a la naturaleza por la demanda infinita de recursos y la generación de residuos y sustancias contaminantes, que a su vez se dificulta su asimilación mediante ciclos bio-geoquímicos. En contraste, el Sistema Tipo III es aquel que se concibe totalmente cerrado, que intenta alcanzar el equilibrio dinámico de los sistemas ecológicos, donde la energía es el único componente externo y los residuos son reaprovechados (reusados y reciclados) por otros usuarios y procesos dentro del sistema (Fig. 4). Los ecosistemas naturales, si no son alterados por el hombre, son prácticamente en su totalidad de Tipo III, es decir, están en equilibrio y el residuo de una especie es aprovechado por otra. De esta manera, nada se pierde, por el contrario se transforman en recursos vitales para otras especies.

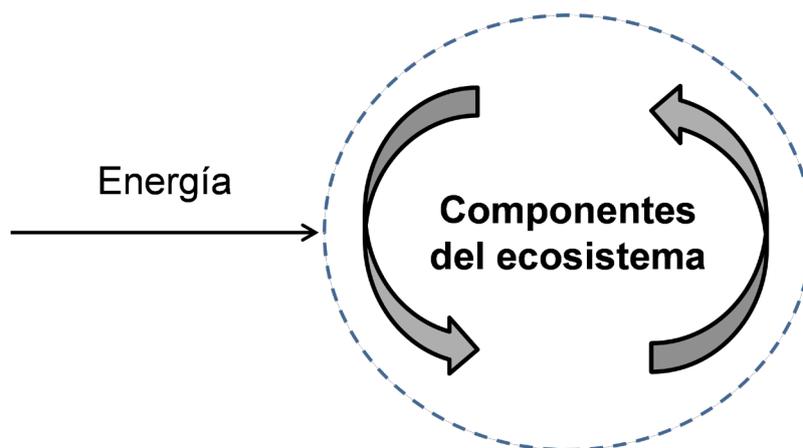


Figura 4. Tipología de un ecosistema industrial Tipo III.

Fuente: adaptado de Graedel y Lifset, 2002, p. 5

La Ecología Industrial se puede aplicar en diferentes ámbitos o escalas tales como una planta industrial, un complejo o parque industrial y a nivel regional o global (Ehrenfeld y Chertow, 2002).

De la literatura se observa la diversidad de definiciones que existen actualmente sobre ésta interesante disciplina, lo que amerita unificar criterios y posturas para propiciar un concepto que sea aceptado universalmente. Efectivamente, la Ecología Industrial busca minimizar daños o impactos socioambientales en todo el ciclo de vida de un producto, simulando el funcionamiento de los sistemas naturales. Esta analogía se logra mediante la reconversión del metabolismo de producción lineal (abierto) a uno circular (cerrado).

## 2.2 Principios de la Ecología Industrial

Los principios en los que se fundamenta la Ecología Industrial son los siguientes: metabolismo industrial, desmaterialización de los productos, minimización del impacto ambiental, maximización de la eficiencia y autonomía energética. Estos aspectos serán fundamentales para hacer efectiva la implementación práctica de cualquier estrategia que permita alcanzar la sostenibilidad en el diseño y fabricación de un producto o puesta en marcha de un servicio.

### 2.2.1 Metabolismo industrial

Este enfoque fue desarrollado por Robert Ayres en la década de los 70, con el propósito de explicar el flujo total de materiales y energía que circula por el sistema industrial, a lo largo del ciclo de vida, es decir, desde su extracción hasta su asimilación en la naturaleza mediante los ciclos bio-geoquímicos.

El análisis del metabolismo industrial está basado en la ley de conservación de la materia, del mismo modo que el metabolismo biológico o ecosistémico, su comprensión constituye una base imprescindible, para establecer las acciones específicas que de-

berán desarrollarse posteriormente de forma tal que garanticen el funcionamiento del sistema industrial, como parte integrante del medio ambiente y en armonía con éste (García et al., 2014).

Gracias a este principio se busca que en los sistemas industriales todos los residuos no generen contaminación o impacto ambiental, siendo necesario adaptar mecanismos preventivos y correctivos para que nada se pierda, en todo caso se transforme y circulen perpetuamente.

### 2.2.2 Desmaterialización de los productos

La desmaterialización implica una disminución en la intensidad de uso de materiales en la producción industrial, es decir, reducción de masa. Este principio ofrece la posibilidad de disociar el uso de recursos y el impacto ambiental del crecimiento económico. La desmaterialización es generalmente medida en términos de masa de materiales por unidad de actividad económica o per cápita y típicamente evaluada a nivel de los sectores industriales, las economías regionales, nacionales o globales.

La desmaterialización involucra directamente una disminución de la presión sobre los recursos naturales y el ambiente, que positivamente favorece la conservación de la biodiversidad y del funcionamiento de los diversos ecosistemas naturales.

### 2.2.3 Minimización del impacto ambiental

La Ecología Industrial propicia el diseño y fabricación de productos con mínimos efectos adversos sobre el ambiente. Este criterio comprende minimizar las emisiones de gases efecto de invernadero ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , etc.) y emisiones contaminantes como el dióxido de azufre ( $\text{SO}_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ). Así mismo, incluye acciones dirigidas a minimizar la generación de residuos sólidos y el consumo de servicios ambientales como

el agua y oxígeno.

Precisamente es durante la etapa de diseño de un producto, proceso o servicio donde se deben incluir estos subcriterios para evitar daños irreversibles a la naturaleza. De seguir existiendo daños, los mismos son internalizados conscientemente para reducirlos a su mínima expresión. De esta manera, las industrias pueden desarrollar procesos productivos en total armonía con su entorno ambiental y social.

Un enfoque de ciclo de vida en la valoración del impacto ambiental garantiza una minimización de los efectos adversos en un contexto más amplio, que involucra la extracción de los materiales, transformación de materias primas, fabricación, mantenimiento y servicio post venta, entre otros.

#### 2.2.4 Eficiencia energética

La eficiencia representa la efectividad del equipo para operar en ciclos o procesos. La eficiencia termodinámica es la relación del trabajo útil producido y el trabajo requerido en el proceso. Un motor térmico produce trabajo útil, mientras que un refrigerador usa ese trabajo para transferir calor desde una región fría a otra más caliente (Hordesky, 2004).

La eficiencia energética es un medio para alcanzar un fin: el ahorro de energía, la cual es capaz de aportar más bienes y servicios con menos insumos energéticos (input). Para ello es necesario optimizar procesos, uso de equipos y materiales (Aranda y Zabalza, 2010).

Un uso eficiente de la energía trae consigo múltiples beneficios. Por ejemplo, el ahorro de energía primaria permite prolongar las reservas mundiales de combustibles fósiles y con ello una disminución de gases efecto de invernadero y otros gases causante de la lluvia ácida y la eutrofización de suelos y

cuerpos de agua. Un uso eficiente de la energía a nivel de usuarios, es decir, en el uso de equipos, dispositivos, accesorios o productos implica un ahorro directo de dinero y al mismo tiempo un impacto positivo sobre el ambiente.

#### 2.2.5 Autonomía energética (Energías renovables)

La incorporación de las energías renovables en los procesos de extracción de materiales y manufactura conlleva a la utilización de fuentes que están disponibles localmente, es decir, en su entorno y que generalmente son abundantes (generación distribuida). La abundancia y disponibilidad del recurso está garantizada por su renovabilidad en un contexto de ciclos naturales que ocurren en una escala temporal de corto, mediano y largo plazo.

La utilización de estas tecnologías implica la independencia frente a los sistemas centralizados de energía, que generalmente están caracterizados por una matriz energética de significativa presencia o dominio de combustibles fósiles. Los combustibles fósiles, además de ocasionar impactos ambientales en su procesamiento y uso, tienen una disponibilidad finita en la naturaleza. Por el ejemplo, de acuerdo a los niveles de reserva y producción de los combustibles en un contexto mundial, el petróleo tiene una duración probable de 53 años, el gas natural de 54 años y el carbón de 110 años (British Petroleum, 2015).

Respecto a los modelos de generación y suministro de energía, que son claves en la autonomía energética, la generación centralizada (GC) ha dominado significativamente la forma de suministrar la electricidad. Por una parte, los problemas técnicos como cortes parciales o apagones totales y la falta de mantenimiento en las redes, el costo de la energía, los impactos ambientales asocia-

dos, los altos costes de inversión en nuevas instalaciones, entre otros; y el surgimiento de la generación distribuida (GD) han venido allanando el éxito de GC (Rojas y Yusta, 2012). En Venezuela, un ejemplo clásico de GC está asociado a la generación de electricidad derivado de la explotación de recursos hidráulicos de la cuenca del Río Caroní (edo. Bolívar), que gracias al sistema de represas del Gurí se obtiene más del 70 % de la energía eléctrica del país. Mediante sistemas de distribución (cables) y regulación, la energía es transportada y despachada hasta los millones de hogares en todo el territorio nacional.

En contraste a GC, la generación distribuida ha propiciado una nueva visión de generar o suministrar la electricidad para aquellas aplicaciones que requieren energía in situ, es decir, localmente, de manera asequible, segura y con menos problemas socio-ambientales. Además, los beneficios inherentes a esta nueva modalidad tecnológica han suscitado un apreciable giro en el paradigma del suministro eléctrico a nivel mundial. Como ejemplo de GD se puede mencionar la conexión de una vivienda, grupo de viviendas o planta industrial a una fuente local de energía (por ejemplo: energía solar), que mediante el agrupamiento de tecnologías de conversión (placas solares) y dispositivos de regulación se puede ofertar electricidad en forma independiente a la red convencional (red eléctrica nacional). Lastimosamente en Venezuela, existen muy pocas aplicaciones de esta modalidad.

En los últimos años, el progreso tecnológico y económico de la generación distribuida, de origen renovable, está profundizando los beneficios de la misma. Las evidencias científicas encontradas, en aplicaciones no conectadas a red, sugieren que la generación distribuida representa una opción de suministro eléctrico asequible y sostenible (Rojas

y Yusta, 2012). Este hallazgo podría ser un aspecto relevante para facilitar e impulsar el desarrollo económico y social de los países.

En efecto, GD también podría facilitar a las industrias el acceso a fuentes de suministro de energías acorde a los ciclos de la naturaleza, permitiendo de esta manera el aprovechamiento y disponibilidad de energía sostenible; un aspecto fundamental en la consecución de metas y objetivos asociados a la sostenibilidad del nuevo modelo de diseño y operación industrial.

### 2.3 Estrategias, metodologías y herramientas de la Ecología Industrial

Las estrategias para la implementación de la Ecología Industrial comprende una amplia gama de posibilidades como son (Ayres R. and Ayres L., 2002; Cervantes, 2009; Aranda y Zabalza, 2010): Ecoeficiencia, Sistema de Gestión Ambiental (SGA), Producción más Limpia (P+L), Prevención de la Contaminación (P2), Logística Inversa, los Parques Industriales Ecoeficientes (PIE), Análisis de Ciclo de Vida (ACV), Análisis de Flujo de Materiales (AFM), Diagramas de flujo, Diseño para el Ambiente (DFE), entre otras. Mediante estas prácticas, que pueden diferenciarse por su ámbito de aplicación (Fig. 5), las organizaciones o sistemas industriales (empresas) en forma individual o colectiva pueden reducir impactos ambientales y sociales, y a su vez obtener mejores rendimientos económicos y tecnológicos hasta alcanzar la sostenibilidad (Fig. 6).

Para tener una visión general de las estrategias, a continuación se describen las de mayor aplicación en la actualidad.

#### 2.3.1 Ecoeficiencia

La ecoeficiencia es un concepto más amplio respecto a la eficiencia, la cual implica la consecución de estándares de calidad de vida mediante la producción de bienes y servicios, sin detrimento del ambiente. Todo ello

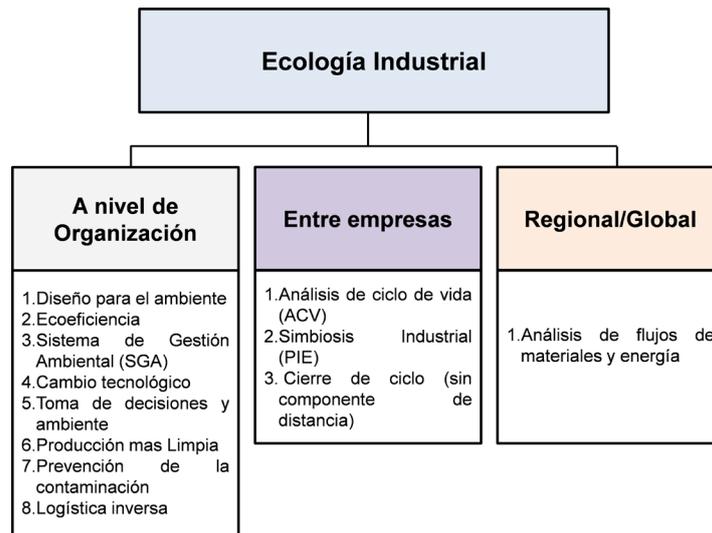


Figura 5. Estrategias y herramientas de la EI.

Fuente: elaboración propia adaptado de Shenoy, 2016, p. 235

se puede alcanzar mediante procesos limpios, consumo responsable y creando valor por parte de las empresas para conseguir una sostenibilidad económica (Figura 7).

La ecoeficiencia como tal nació en la cumbre de Río de Janeiro en 1992, como una propuesta fundamentalmente empresarial. Esta estrategia se mueve en un campo más amplio que la protección del ambiente o el control de la contaminación. La ecoeficiencia apunta hacia el tratamiento de los recursos

naturales: materias primas e insumos energéticos. Es un enfoque que se interna en las operaciones de la empresa y no se queda exclusivamente en las externalidades (emisiones, efluentes y residuos) (Leal, 2005).

La ecoeficiencia pretende alcanzar la eficiencia económica de las empresas a través de la eficiencia ecológica, es decir, una relación de máxima eficiencia económica con mínimo impacto ambiental desde una perspectiva de ciclo de vida.

Una empresa puede alcanzar individualmente la ecoeficiencia adoptando un proceso de Ecodiseño y operar sobre el diseño ecoeficiente de un producto o servicio. Sin embargo, la ecoeficiencia puede alcanzarse de forma colectiva por diferentes unidades de producción ubicadas en un mismo emplazamiento.

La ecoeficiencia se puede valorar a través de indicadores como huella ecológica, mochila ecológica, eco-indicador, eco-brújula, índices de generación contaminantes, índice de sobrecalentamiento global, etc. Gracias a estos indicadores, las industrias pueden medir cuantitativa o cualitativamente el efecto de las acciones implementadas para hacer un uso eficaz y eficiente de los recursos, y con ello valorar los beneficios económicos que

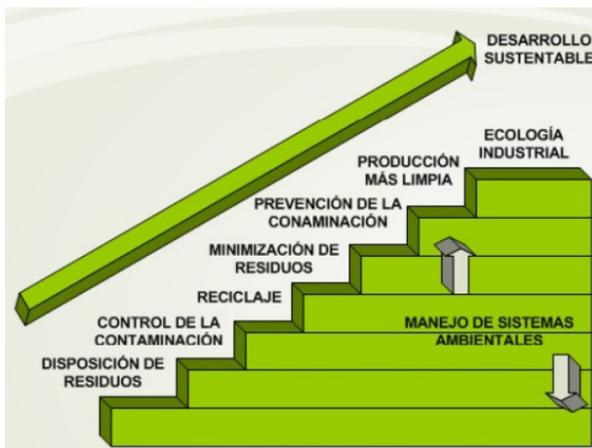


Figura 6. Pirámide hacia la sostenibilidad.

Fuente: Cervantes et al., 2009, p. 64

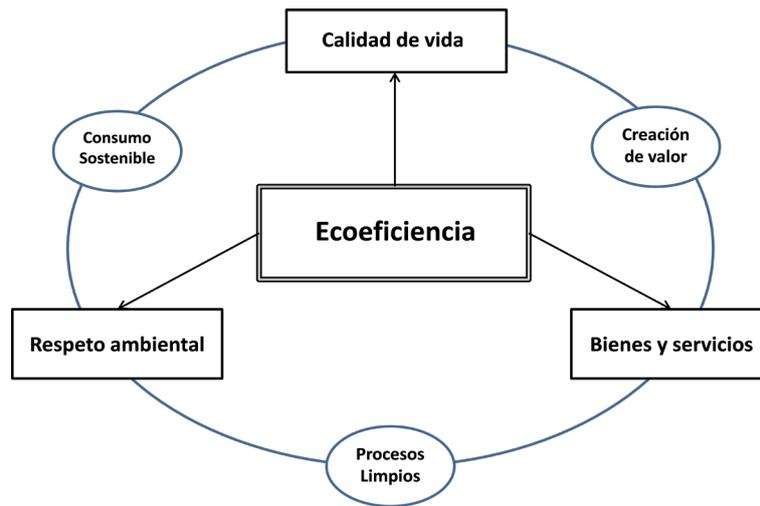


Figura 7. Ciclo de ecoeficiencia.

Fuente: Aranda y Zabalza, 2010, p. 22

se pueden obtener mientras se minimizan o evitan daños ambientales. La implantación de esta estrategia es bastante práctica y suele implementarse con mucha frecuencia en aquellos países que tienen fuertes restricciones ambientales.

### 2.3.2 Sistema de Gestión Ambiental (SGA)

Es una estrategia bastante amplia que se aplica al conjunto de la organización para gestionar acciones orientadas al control de los problemas ambientales.

La implantación de un SGA permite integrar el ambiente a la gestión general y a las decisiones de la empresa, dándole un valor estratégico y de ventaja competitiva, lo que permite conseguir un significativo ahorro energético y económico para la empresa (Aranda y Zabalza, 2010).

En la actualidad, los SGA están normalizados y existen dos metodologías, de carácter voluntario, para su implantación, mediante las cuales una industria o empresa puede obtener la correspondiente certificación. La norma ISO 14000 es de carácter internacional y el Reglamento EMAS – II es de ámbito europeo.

Es importante mencionar que los SGA buscan controlar o evitar los daños ambientales en todos los ámbitos de la organización u organizaciones donde se implemente. La visión de gestión del uso de recursos e impactos es más amplia que la Ecoeficiencia, y en efecto podemos notar que la estrategia está normalizada mediante normas internacionales.

### 2.3.3 Producción más Limpia (P+L)

La P+L es una estrategia que estableció el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente que pretende cambiar los sistemas de producción para generar menos residuos o residuos menos contaminantes.

*"La Producción Más Limpia se define como la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva integrada a los procesos, productos y servicios para aumentar la eficiencia global y reducir los riesgos para los seres humanos y el medio ambiente"* (ONUDI, 1992).

- En los procesos de producción, la Producción Más Limpia aborda el ahorro de materias primas y energía, la eliminación de materias primas tóxicas y la reducción en cantidades y toxicidad de desechos y emisiones.
- En el diseño del producto, la Producción Más Limpia aborda la reducción de impactos

negativos desde un punto de vista de ciclo de vida, es decir, desde la cuna hasta la tumba (extracción de la materia prima hasta la disposición final).

- En los servicios, la Producción Más Limpia aborda la incorporación de consideraciones ambientales en el diseño y entrega de los servicios.

#### 2.3.4 Prevención de la Contaminación (P2)

La Prevención de la Contaminación, denominada también "P2", surgió en Estados Unidos de América a comienzos de la década de los 90. Probablemente la cumbre de la tierra en 1992 terminó por dar el impulsó final a su creación.

P2 es cualquier práctica que reduce, elimina o previene la contaminación en su origen a través de un enfoque de gestión de residuos. La reducción de la contaminación implica una disminución en el control de residuos y a su vez menos riesgos de afectación a la salud pública y el medio ambiente (EPA, 2015) y se aplica en el uso de materiales, procesos o métodos. En la práctica esto significa "recurrir a métodos que usen menos materiales peligrosos, menos materiales inocuos, menos energía, menos agua y menos recursos en general, así como métodos que protejan los recursos naturales a través del uso eficiente de los mismos" (Freeman, 1998).

La Prevención de la Contaminación tiene un fuerte componente preventivo que efectivamente concentra su atención en minimizar problemas de contaminación ambiental mediante la reducción o eliminación de agentes o acciones contaminantes durante el proceso de producción. De esta manera también se logra crear un ambiente propicio para la preservación de la salud y seguridad de los trabajadores.

#### 2.3.5 Logística Inversa

Es un proceso de planificación, implantación

y control eficiente del flujo efectivo de costos y almacenaje de materiales, inventarios y productos terminados.

La Logística Inversa implica reutilización, reparación, restauración, re-manufactura, reciclaje, recuperación de energía, vertidos, etc., con el fin de minimizar los impactos ambientales originados por las actividades productivas y de consumo (Aranda y Zabalza, 2010).

#### 2.3.6 Diseño para el Ambiente (DFE, siglas en inglés)

Este concepto se originó en 1992, como consecuencia de los esfuerzos de unas cuantas empresas especializadas en el ramo de la electrónica que intentaban incorporar una concienciación ambiental en el desarrollo de sus productos (Fiksel, 1997).

El Diseño para el Ambiente implica el reconocimiento de lo que sucede no sólo dentro de las instalaciones de la empresa, sino también lo que ocurre posteriormente a la fabricación del producto, es decir, fuera de las instalaciones (aguas abajo).

DFE es un enfoque de diseño en el que se internalicen y se optimizan, desde las primeras etapas, las características ambientales de un producto, proceso o instalación. Se ha estimado que alrededor del 70 por ciento del costo de un producto se determina durante la fase de diseño (Chertow, 2008). DFE asume que los efectos del producto sobre el ambiente, incluyendo la salud de las personas, deberían ser considerados y reducidos en todas las etapas a lo largo del ciclo de vida del producto.

En el diseño y desarrollo de productos industriales existen múltiples criterios, además de los aspectos ambientales, se incluyen otros requerimientos. Éstos se denotan como "Diseño para X", donde X representa la consideración o atributo de diseño. Por ejemplo:

diseño para el desensamblaje (DFD, siglas en inglés), diseño para el reciclaje (DFR, siglas en inglés), etc.

Un principio fundamental de esta metodología es que las acciones DFE deben proporcionar el mejor compromiso posible entre el conjunto de requerimientos del nuevo producto a objeto de los interesados: durabilidad, seguridad, costos, tecnología, materiales, mínimo impacto ambiental en su ciclo de vida, etc. (Hauschild et al., 2005, p. 9).

DFE presenta ocho axiomas (Hill, 1993):

- Fabricación del producto sin generar desechos peligrosos.
- Implementación de tecnologías limpias.
- Reducción de sustancias y emisiones químicas.
- Reducción del consumo de energía en los productos.
- Empleo de materiales reciclables no peligrosos.
- Empleo de materiales reciclables y reutilización de componentes.
- Diseño de fácil desensamblaje.
- Reutilización o reciclaje del producto al final de su vida útil.

El diseño para el ambiente es una de las estrategias que resalta la consideración de diseño con respecto a objetivos ambientales, de salud y seguridad. El enfoque está claramente pensado para que los diseñadores o proyectistas introduzcan criterios ambientales (axiomas) bien definidos para garantizar que los productos durante su manufactura, uso y disposición final impliquen mínimos daños ambientales y sociales, permitiendo de igual manera un uso racional y responsable de materias primas. El cierre del ciclo, una vez que los productos llegan al final de

su vida útil, representan una excelente oportunidad para el desarrollo integral de productos y procesos ecoeficientes con lo cual mitigar los efectos del sobrecalentamiento global y prevenir la contaminación ambiental.

### 2.3.7 Diagramas de flujo

Son representaciones gráficas donde se simbolizan los procesos que tienen lugar en una actividad industrial (proceso de diseño y procesos de manufactura), identificándose respectivamente las entradas (recursos, insumos) y salidas (productos, subproductos, residuos, emisiones y descargas), así como los materiales y energía intercambiados (Fig. 8).

### 2.3.8 Parques Industriales Ecoeficientes (PIE)

Surgieron gracias al proyecto de Kalundborg en Dinamarca (1970). Estos peculiares parques industriales consisten en la nucleación de un grupo de empresas o industrias, en un mismo emplazamiento o ámbito geográfico, para desarrollar conjuntamente proyectos que buscan mejorar su desempeño económico y ambiental, de tal manera que el trabajo en equipo permita a las industrias encontrar un beneficio colectivo mayor que la sumatoria de beneficios individuales alcanzables en el desarrollo de sus actividades como unidades, optimizando únicamente su desempeño ambiental (Aranda y Zabalza, 2010).

En la actualidad, los eco parques industriales más representativos del mundo son: el eco parque de Kalundborg-Dinamarca (Fig. 9) y el eco parque de Styria-Austria (Valero, 2011).

De la experiencia de Kalundborg (Fig. 10), un grupo de industrias relacionadas con la generación de energía, refinación de petróleo, biotecnología, producción de cemento, piscicultura, procesamiento de aguas residuales,

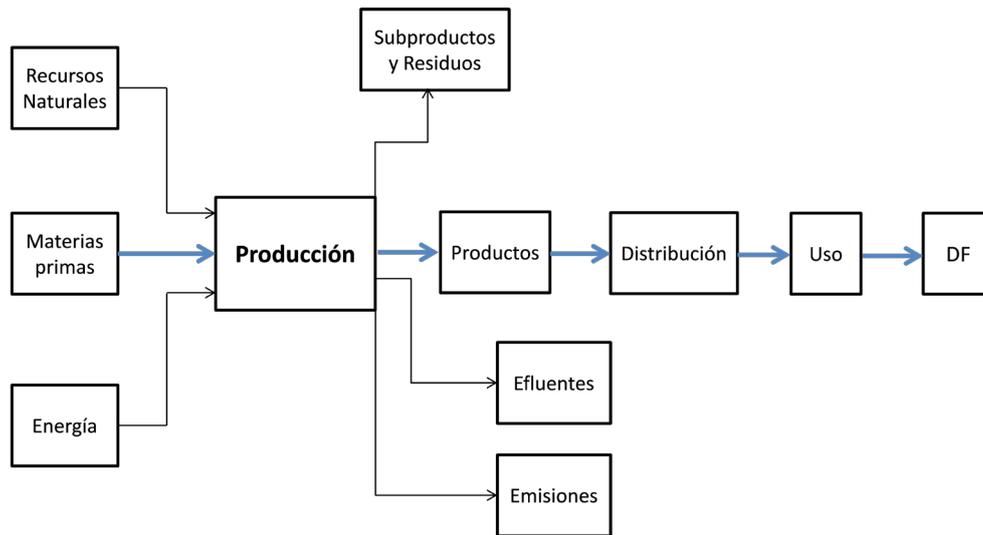


Figura 8. Diagrama de flujo de un producto hasta su disposición final (DF).

Fuente: elaboración propia.

etc., intercambian sus residuos, flujos de calor, materias primas e insumos donde obtienen un ahorro de recursos: energía, agua y materiales, y nuevas fuentes de materias primas (yeso, ácido sulfúrico, fertilizantes y otros).

### 2.3.9 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)

El ACV es una herramienta que trata los aspectos ambientales e impactos potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto, desde la adquisición de la materia prima, producción, uso, tratamiento final, reciclado, hasta su disposición final, es decir, desde la cuna hasta la tumba (Aranda y Zabalza, 2010) (Fig. 11).

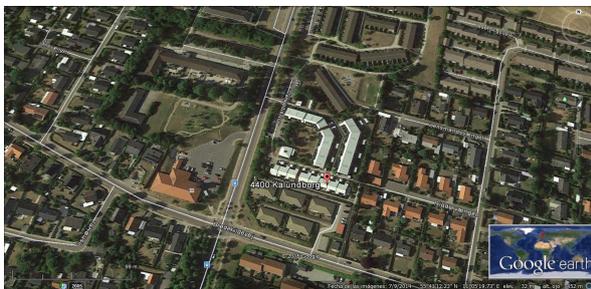


Figura 9. Ubicación geográfica del Parque Industrial de Kalundborg

Fuente: Kalundborg, Denmark. Google earth.

Este método es muy útil para realizar comparaciones entre dos productos que van a generar el mismo servicio, y así comprobar cuantitativamente cual produce más impactos.

El Análisis de Ciclo de Vida es una poderosa herramienta, frecuentemente usada para facilitar la toma de decisiones en la industria y el sector público. Hay varios usos y usuarios que pueden usar esta metodología. Adicionalmente, el ACV puede contribuir a la identificación de procesos y pasos clave, o áreas donde es necesario hacer las modificaciones pertinentes (cambios en el proceso) para reducir significativamente los impactos ambientales (Koroneos et al., 2005).

Un beneficio de ACV es que permite a los analistas utilizar los resultados para ayudar a caracterizar las ramificaciones de posibles opciones políticas o cambios tecnológicos (Koroneos et al., 2005). En efecto, este

análisis puede ayudar a los diseñadores e ingenieros a tomar mejores decisiones ambientales, y evaluaciones económicas, en las primeras etapas del proceso de diseño y fabricación de un producto y servicios (procesos).

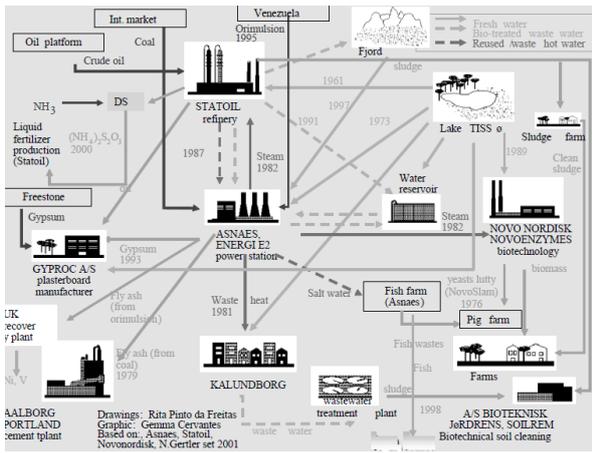


Figura 10. Simbiosis industrial de Kalundborg, 2001.

Fuente: Cervantes, 2001, p. 135

La metodología ACV está estandarizada a través de las normas ISO 14040-2006, y consiste en cuatro componentes principales (Figura 12):

- Definición del objeto y alcance del estudio: incluye los límites del sistema y el nivel de detalle.
- Análisis de inventario. En esta etapa se recogen los datos necesarios para cumplir los objetivos del análisis.
- Evaluación del impacto ambiental. Es la

etapa en la que se define la relevancia de las entradas y salidas y se cuantifican los impactos del ciclo de vida.

- Finalmente, interpretación de los resultados.

### 2.3.10 Análisis de Flujo de Materiales (AFM)

Es una metodología estandarizada que analiza los flujos de materiales que entran y salen de un sistema. El AFM consiste en aplicar un balance de materia, y deducir unos indicadores de uso y consumo de materiales, relacionando los flujos (Fig. 13).

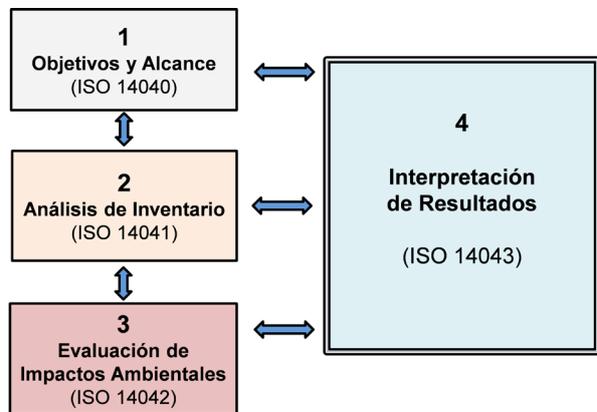


Figura 12. Fases principales de un estudio de ACV según ISO 14000.

Fuente: Aranda y Zabalza, 2010, p. 54

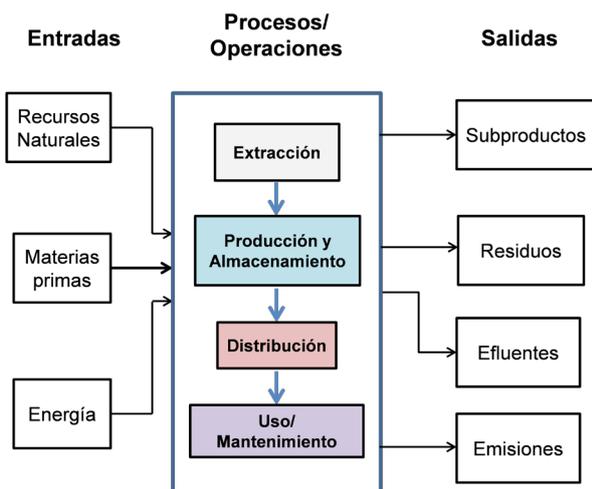


Figura 11. Inventario de Ciclo de Vida aplicado a distintos procesos.

Fuente: Aranda y Zabalza, 2010, p. 63

El AFM da una visión global de la interacción entre el sistema y el entorno, lo que se considera útil para la ecología industrial y el desarrollo sostenible (Sendra, 2006).

Una de las diferencias entre el AFM y un balance tradicional de materiales de una industria es que también se contabilizan los flujos indirectos y no usados en el proceso productivo (Sendra, 2006), pero expresado en unidades de masa.

### 2.4 Beneficios y aplicaciones de la Ecología Industrial

Como ya se ha mencionado, la Ecología Industrial aborda los problemas ambientales de la

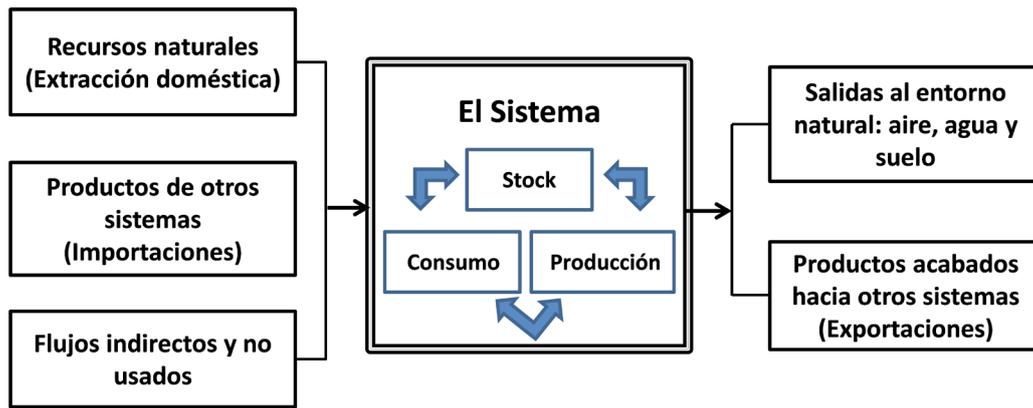


Figura 13. Flujos contabilizados en el análisis de flujo de materiales.

Fuente: Sendra, 2006, p. 116

industria desde una perspectiva más amplia. Los procesos industriales se analizan en un contexto de vinculación con el medio que está interactuando.

Los beneficios de la disciplina son elocuentes y se dan en distintos ámbitos de la sostenibilidad y áreas afines.

La Ecología Industrial proporciona una visión integradora y sistémica de los impactos ambientales, permite minimizar el uso de materias primas y maximizar su aprovechamiento, mayor eficiencia energética, mayor productividad y rentabilidad económica de las empresas. Así mismo permite minimizar los residuos y un mejor aprovechamiento de los mismos. Análogamente, esta reducción se produce por la acción combinada de una minimización de los residuos producidos en las empresas y del aprovechamiento de parte de estos como materias primas en otras empresas. Cabe destacar, que la reducción de residuos generados en un proceso industrial, reduce la necesidad de rellenos sanitarios y vertederos, así como también reduce los problemas de contaminación ambiental, sobrecalentamiento global, multiplicación de vectores de riesgo a la salud pública, afectación de la belleza escénica, pérdida de biodiversidad, entre otros.

La Ecología Industrial procura autonomía energética y una energía sostenible. Así mismo promueve la reducción en la utilización de recursos y materiales, lo que implica directamente una disminución de la presión sobre los bienes y servicios ambientales.

A nivel social, la valorización de algunos residuos puede dar lugar a nuevos procesos de transformación que generarán nuevos empleos. Asimismo, los daños al ambiente que se consiguen evitar, repercuten positivamente en la calidad de vida de la sociedad (Cervantes, 2009).

En las organizaciones, la Ecología Industrial eleva la motivación de los empleados y directivos, así como también de los clientes y proveedores de materias primas.

Las aplicaciones o experiencias exitosas de la Ecología Industrial se encuentran distribuidas en distintas partes del mundo, en especial Europa, América y Asia. Algunos ejemplos se mencionan a continuación:

- Parque industrial ecoeficiente de Kalundborg – Dinamarca: intercambio de residuos, flujos de calor y materias primas entre un grupo de industrias de múltiples propósitos.
- Cultivo orgánico de peces – China.

- Fabricación de coco deshidratado - Filipinas
- Embotelladora de bebidas – Costa Rica.
- Sinergia de productos en Tampico - México
- Producción de cemento y electricidad – India.
- Manufactura de sistemas de irrigación – India.
- Producción de aceites orgánicos, azúcar y carne – Papua Nueva Guinea.
- Producción agroalimentaria – Ciudad agroalimentaria de Tudela, España.
- Red de reciclaje de subproductos (industrias cementeras, siderúrgicas, papel, textiles y producción de energía) – Styria, Austria.

En Venezuela, la Ecología Industrial es un campo muy desconocido, sus aplicaciones son puntuales y aisladas (Contreras et al., 2009). Entre estas se incluye la industria del mueble.

Los beneficios que implica la Ecología Industrial son diversos. Toda inversión de recursos financieros en su aplicación a los sistemas industriales va a repercutir directamente en una sumatoria de mejoras y beneficios económicos, ambientales y sociales. Precisamente estos beneficios están impulsando a las empresas e industrias a tener mejor proyección local, regional y global. En efecto, cada día que transcurre se van sumando nuevas experiencias en todos los continentes y con ello se van multiplicando las acciones para hacer un uso sostenible de los recursos naturales y favorecer la recuperación de la calidad ambiental del planeta. En esa dinámica esperamos que, en Venezuela, se masifique la adopción de estrategias de la Ecología Industrial en los diversos sectores de la economía nacional y se multipliquen las experiencias que eleven la competitividad de las industrias y mejoren su adecuación a los ecosistemas naturales y poblaciones circundantes.

## 2.5 Barreras para el desarrollo de la Ecología Industrial

Muy a pesar de notables ventajas que se derivan de la implantación de un programa de Ecología Industrial en organizaciones productivas, aún existen obstáculos que impiden su desarrollo. Estos obstáculos se clasifican en siete tipos: informativos, técnicos, económicos, normativos, motivacionales, institucionales y de conocimiento (García et al., 2014). Entre los cuales se especifican los siguientes:

- Altos costos energéticos y económicos del reciclaje.
- Barreras informativas e institucionales.
- Problemas organizacionales para asumir cambios estructurales en la gestión ambiental.
- Resistencia al cambio.
- Pertinencia de los materiales de reutilización.
- Pocas ofertas académicas de formación a nivel de diplomados, especializaciones, maestrías y programas de doctorados.

Todo cambio conlleva cierta resistencia. Los emprendimientos exitosos serán los responsables de minimizar los obstáculos y barreras que todavía puedan existir. En este sentido hace falta reforzar la educación, en todos los niveles, que permita por una parte aumentar los recursos humanos para masificar las aplicaciones técnicas de la disciplina, y por otra reducir el analfabetismo funcional.

## 3. Conclusiones

En este trabajo se realizó una revisión de los principales contenidos teóricos de la Ecología Industrial. Las conclusiones obtenidas se describen seguidamente.

La Ecología Industrial es una disciplina relativamente nueva que permite revertir la problemática ambiental en los sistemas industriales, internalizando impactos y controlando su ocurrencia, así como maximizar los beneficios económicos en la obtención de productos y servicios acorde a las necesidades del mercado.

La simulación de ciclos naturales o biológicos hace que las industrias potencien sus acciones en planes y programas específicos para alcanzar el desarrollo sostenible.

La amplia gama de estrategias y herramientas de la Ecología Industrial diversifican y potencian las posibilidades de alcanzar exitosamente el diseño de productos y el desarrollo de procesos que estén pensados en el ambiente y a las necesidades reales de los usuarios. En este contexto, los diseñadores industriales, ingenieros y proyectistas tiene a disposición una excelente herramienta como el Diseño para el Ambiente (DFE) para intervenir en las primeras etapas del diseño, sobre todo en el diseño conceptual, donde se pueden reducir costos y minimizar daños ambientales y sociales.

No obstante, todavía existen obstáculos que impiden el conocimiento y despliegue de las estrategias de la Ecología Industrial, los cuales deben ser abordados (por universidades, gobiernos y empresas) para hacer que los productos y servicios demandados por los usuarios, en el mercado global, apliquen técnicas de fabricación, consumo y disposición final de mínima afectación ambiental y social, sin perjuicio del rendimiento económico y tecnológico, es decir, sostenibles.

Finalmente, la Ecología Industrial promueve la innovación, un aspecto fundamental en la industria del diseño de productos y servicios, por el cambio de enfoque de las unidades de producción (manufactura), uso y disposición final de los productos hacia una mirada sistémica en armonía con los ciclos de la naturaleza.

### Referencias bibliográficas

- Aranda, R. y Zabalza, I. (2010). *Ecodiseño y Análisis de Ciclo de Vida*. España. Pressas Universitarias de Zaragoza.
- Ayres, R. and Ayres, L. (2002). *A Handbook of Industrial Ecology*. Cheltenham, GB, Edward Elgar publishing.
- Bermejo, R. (2001). Fundamentos de Ecología Industrial. *Cuadernos Bakeaz*, volumen 1, número 44.
- Braun, C. and Bezada, M. (2013). The History and Disappearance of Glaciers in Venezuela. *Journal of Latin American Geography*, volume 12, number 2, pp. 85-124.
- British Petroleum (2015). *Statistical review of world energy 2015*. [Documento en línea] Disponible en: <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html> [Consulta 2015, noviembre 12]
- Cervantes, G. (2001). *Teaching Industrial Ecology in Kalundborg International Eco-Industrial Development Roundtable*. Kalundborg, Denmark, September 2001.
- Cervantes, G., Sosa, R., Rodríguez, G. y Robles, F. (2009). Ecología Industrial y Desarrollo Sostenible. *Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán*, volumen 13, número 1, pp. 63-70.
- Chertow, M. (2008). Industrial ecology in a developing context. In: (ed) Clini, C. Musu, I. & Gullino, M. *Sustainable Development and Environmental Management*. United States. Springer.
- Contreras, W., Cloquell, V., Cloquell V.A., Owen, M., Rondón, M., Guzmán, L., y Moreno A. (2009). Desde el Paradigma de la Ecología Industrial hasta su nueva estrategia metodológica para alcanzar productos, procesos y servicios sostenibles, El diseño Ambientalmente Integrado. *Ecodiseño y Sostenibilidad*, Julio – Diciembre, 2009, pp. 13-36.
- Datschefski, E. (2001). *The Total Beauty of Sustainable Product*. Rotovision. UK. Hove.
- Ehrendfel, J. and Gertler, N. (1997). Industrial Ecology in Practice – the evolution of independence at Kalundborg. *Journal of Industrial Ecology*, volume 1, number 1, pp. 67-79.
- Ehrendfel, J.R. (1995). *Industrial Ecology - A strategic framework for product policy and other sustainable practices*, Green goods, Kretsloppdelegationen. Cambridge, US. MIT.
- Ehrendfel, J. R. (2004). Can Industrial Ecology be the "Science of Sustainability". *Journal of Industrial Ecology*, volume 8, number 1-2, pages 1-3.
- Ehrenfeld, J.R.; Chertow M.R. (2002). "Industrial Symbiosis: the legacy of Kalundborg". *A Handbook of Industrial Ecology*, pp. 334-347. UK. Edward Elgar Publishing,
- Fiksel, J. (1997). *Ingeniería de diseño medioambiental. DFE. Desarrollo integral de productos y procesos ecoeficientes*. Madrid. Editorial McGraw Hill/ Interamericana de España S.A.

- Fiksel, J. (2002). *Sustainable Development through industrial ecology*. American Chemistry Society, 2002, ACS Symposium series, Ch2, Washington, DC.
- Freeman, H. (1998). *Manual de la Prevención de la Contaminación*. México. Editorial McGraw Hill.
- Frosch, R.A., Gallopoulos, N.E. (1989). Strategies for Manufacturing. *Scientific American*, volume 261, number 3, pp 144-152.
- García, Y., Castro, N. y Suarez, N. (2014). Acercamiento conceptual a la ecología industrial. *Universidad y Sociedad*, volumen 6, número 1 (extraordinario). pp. 73-79.
- Google Earth (2015). *Digital globe*. Mapas interactivos de Google vigentes al 2005.
- Graedel, T. and Allenby, B. (1995), *Industrial ecology*. Prentice-Hall, NJ. Englewood Cliffs.
- Graedel, T. and Lifset, R. (2002). "Industrial Ecology: goals and definitions". *A Handbook of Industrial Ecology*, pp. 3-15. UK. Edward Elgar Publishing.
- Hauschild, M., Jeswiet, J., Alting, L. (2005). From life cycle assessment to sustainable production: status and perspectives. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, volume 54, number 2, pages 1-21.
- Hernández, M. (2010). Las industrias con certificación "Cero Natural". *Éxito empresarial*, número 155, pp. 1-2. México.
- Hill, B. (1993). *Industry's integration of environmental product design*. IEEE International Symposium on Electronics and the environment. Arlington, Virginia.
- Hordesky, M. (2004). *Dictionary of energy efficiency technologies*. 3rd Ed. EEUU. Fairmont press
- Koroneos C, Dompros A, Roumbas G y Moussipoulos N. (2004) Life cycle assessment of hydrogen fuel production processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, volume 29, pp. 43-50.
- Leal, José. (2005). *Ecoeficiencia: Marco de análisis, indicadores y experiencias*. Santiago de Chile. CEPAL – PNUD.
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R. B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R. H., and Zhang, T. (2007). *Observations: Changes in snow, ice and frozen ground, in: Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, En: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M., and Miller, H. L., 337–383, Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Loayza, J. y Silva, M. (2013). Los procesos industriales sostenibles y su contribución en la preservación de problemas ambientales. *Diseño y Tecnología - Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM)*, volumen 16, número 1, pp. 108-117.
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONU DI). (1992). *Introducción a la Producción más Limpia*.
- Rojas, J. y Yusta, J. (2012). "Planificación del suministro eléctrico en áreas rurales de los países en vías de desarrollo: un marco de referencia para la toma de decisiones" (Tesis Doctoral), Universidad de Zaragoza, Zaragoza - España, 2012. [Documento en línea] Disponible en: <http://personal.unizar.es/jmyusta/wpcontent/uploads/2014/09/Tesis-Juan-Rojas.pdf>. [Consulta 2015, noviembre 09]
- Sendra, C. (2006). El análisis de flujo de materiales en la ecología industrial. Una herramienta para alcanzar el desarrollo sostenible. *Ingeniería Química*, Núm. 435, Abril de 2006, pp. 115-121.
- Shenoy, M. (2016). Industrial Ecology in Developing Countries. En: Clift, R. and Druckman, A. *Taking Stock of Industrial Ecology*. United States, Springer Open.
- U.S Environment Protection Agency (EPA). (2015). *Pollution Prevention P2*. [Documento en línea] Disponible en: <http://www.epa.gov/p2/learn-about-pollution-prevention> [Consulta 2015, octubre 12]
- Valero, A. y Usón G. (2011). *Ecología Industrial: cerrando el ciclo de materiales*. Pressas Universitarias de Zaragoza.
- White, R. (1994). *The greening of industrial ecosystems*. Washington DC .National Academy Press.