

Ecología Industrial: ¿Un enfoque sistémico ambientalista para una aproximación a la economía sostenible?

Industrial Ecology: An environmentalist systemic approach for an approximation to sustainable economy?

Alicia Játem Lásser* y Trigal Perdomo Játem**

Código JEL: Q57

Recibido: 06/11/2018, Revisado: 27/11/2018, Aceptado: 19/12/2018

Resumen

El modelo económico dominante actual, fundamentado en la explotación intensiva de los recursos naturales para la producción masiva de bienes y servicios, ha producido graves daños al ambiente, hogar y fuente de sustento de todos los seres vivos, violentando su capacidad de carga y resiliencia. En este trabajo se muestra el marco conceptual de la ecología industrial como modelo emergente de paradigmas de desarrollo sostenible y las herramientas analíticas para su implementación; se presenta el estudio de un caso emblemático de su aplicación, el Parque Eco-Industrial Kalundborg; se hace un análisis de los beneficios y de las posibles dificultades para el diseño y funcionamiento exitoso de un parque eco-industrial y se citan algunas críticas al enfoque de la ecología industrial.

Palabras clave: desarrollo sostenible, ecología industrial, parques eco-industriales, Kalundborg.

Abstract

The actual dominant economic model, based on intensive exploitation of natural resources for massive production of goods and services, has seriously affected the planet's environment, home and source of sustenance of all living beings, forcing its load capacity and its resilience. In this work, the conceptual framework of Industrial Ecology, as an emergent model in sustainable development paradigms and the analytical tools for its implementation are shown; a study of Kalundborg Eco-Industrial Park, as an emblematic relevant example of its practical application is presented; a critical analysis is made of benefits and possible difficulties for the design and successful operation of an Eco-Industrial Park and critics to the Industrial Ecology approach are presented.

Key words: sustainable development, industrial ecology, eco-industrial parks, Kalundborg.

* Licenciada en Química por la Universidad de Los Andes. Departamento de Química. Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela. Correo electrónico: aliciajatemlasser@gmail.com

** Licenciada en Biología por la Universidad de Los Andes. Área de Energía y Ambiente. Instituto de Estudios Avanzados (IDEA). Sartenejas, Venezuela. Correo electrónico: trigalp@gmail.com

1. Introducción

El modelo económico dominante actual, fundamentado en un crecimiento ilimitado con la explotación intensiva de los recursos naturales a tasas mucho mayores que las de su reposición, para la producción masiva de bienes y servicios en las sociedades de consumo maximizado de los llamados países desarrollados, ante brechas inmensas con respecto a los países en vías de desarrollo; ha afectado de forma grave al ambiente, hogar y fuente de sustento de todos los seres vivos. Siendo los recursos naturales finitos y, por lo tanto, agotables, y reconociendo además que el ambiente tiene un límite en su capacidad de carga y de resiliencia que está siendo excedido, se evidencia que el llamado desarrollo económico está agotando de forma acelerada todas las materias primas y conduciendo a la extinción masiva de numerosas especies en el planeta, incluyendo la humana, generando una urgente necesidad de replantear los procesos de producción industrial.

Ya en la década de los años 1950, se planteó la necesidad de mitigación del impacto ambiental causado por la industria y se idearon las llamadas “medidas al final de la tubería” que intentaban reducir el daño ambiental sin considerar la disminución de emisiones y efluentes tóxicos, ni ahorros en consumo de recursos naturales y energía. En los años de 1960 a 1970, se promueven y recomiendan las llamadas “Buenas Prácticas Ambientales” para la reducción de los impactos sobre el ambiente; estas prácticas incluyen la prevención de la contaminación, la minimización de residuos, el reciclaje y la remediación de daños ambientales con tratamientos químicos y biológicos. En 1968 se crea el Club de Roma, conformado por destacados científicos con el objetivo de promover un crecimiento económico mundial estable y sostenible para la humanidad. En 1972, un estudio del Instituto Tecnológico de Massachusetts y del Club de Roma, llamado Los Límites del Crecimiento (Club de Roma, 1972), basado en una simulación computacional, señala por primera vez que, por la búsqueda de un acelerado crecimiento

económico, las proyecciones para los cien años siguientes, es decir para el año 2072, muestran que “se alcanzarán los límites absolutos del crecimiento en la Tierra” y una drástica reducción de la población humana, a causa de la contaminación ambiental, la pérdida de tierras cultivables y la escasez de recursos energéticos, concluyendo en que en un planeta limitado, las dinámicas de crecimiento exponencial no son sostenibles. De este informe surge la propuesta de crecimiento cero de la economía y luego la tesis de Economía de Estado Estacionario (Daly, 1974).

En la década de 1970, surge la tesis de la Simbiosis Industrial, Sinergia de Subproductos y el Metabolismo Industrial (Ayres y Ayres, 2002), que propone fusionar industrias tradicionalmente separadas, para obtener ventajas competitivas como intercambio de materiales, agua y energía. Las relaciones de sinergia o simbiosis industrial se clasificaron como:

- i.* Simbiosis bilateral, referida a la interacción entre dos industrias de manera unidireccional o bidireccional.
- ii.* Simbiosis de servicios, para definir la interacción entre una industria y varias entidades donde hay prestación de servicios, como por ejemplo, la toma de aguas residuales de varias entidades para un tratamiento colectivo.
- iii.* Simbiosis en red, donde existe interacción multilateral entre más de dos industrias en varias direcciones.

Se definió el concepto de metabolismo industrial como un modelo que promueve el intercambio de materiales a través de diferentes industrias para su procesamiento y posterior disposición como residuos.

Es en la década de 1990 cuando surge el modelo de la ecología industrial con un objetivo económico, para disminuir gastos energéticos y de materiales, costos de producción, de transporte y de gestión de residuos, pero con consecuencias ambientales y sociales muy positivas.

El término desarrollo sostenible fue formalizado por primera vez en 1987 en el documento conocido como Informe Brundtland

o Nuestro futuro común (ONU, 1987). Múltiples documentos y acuerdos internacionales han sido emanados de reuniones y encuentros desde entonces, pero la destrucción de bosques y humedales, la pérdida de suelos fértiles y la desertificación, el déficit de agua, la contaminación ambiental generalizada y la degradación ecológica con pérdida irreversible de biodiversidad, el calentamiento acelerado del planeta debido a las emisiones de gases de efecto invernadero por quema de combustibles fósiles en industrias, transporte, y otros, así como el cambio climático global, están generando la muerte del planeta y de sus habitantes. Ante este conflicto, la ecología industrial se presenta como modelo emergente de posible alternativa para una aproximación de la actividad económica mundial hacia la sostenibilidad.

En este trabajo se plantean como objetivos: (i) Presentar el marco conceptual de la Ecología Industrial. (ii) Mostrar las herramientas analíticas y funcionales para el diseño de un Parque Eco-Industrial. (iii) Hacer el estudio de un caso emblemático de la aplicación práctica de los principios de la ecología industrial, como lo es el Parque Eco-Industrial de Kalundborg, Dinamarca. (iv) Señalar los beneficios de la implementación de parques eco-industriales en las dimensiones ecológica, social y económica del desarrollo sostenible y también las posibles dificultades de operatividad, resaltando que el modelo de la Ecología Industrial y sus herramientas funcionales, están en constante evolución y perfeccionamiento, junto a los avances científicos y tecnológicos que les sirven de sustentación. Y (v) Mostrar algunas críticas que ha recibido el enfoque de la ecología industrial.

2. La Ecología Industrial

La Ecología Industrial (EI) es un modelo emergente en la evolución de los paradigmas de desarrollo sostenible y gestión ambiental, que toma en consideración las relaciones íntimas y críticas entre la actividad humana y la naturaleza y los límites de la autorregulación ambiental. Este enfoque plantea el diseño de sistemas industriales

que, en una aproximación ideal, funcionen con mecanismos similares a los de los ecosistemas naturales (Ehrenfeld y Gertler, 1997; Ayres y Ayres, 2002; Ehrenfeld, 2004; Gabaldón, 2006; Jensen, Basson y Leach, 2011).

El concepto innovador de ecosistemas industriales implica que el modelo lineal abierto de producción -que sustrae materias primas del ambiente en forma de ingentes cantidades de recursos naturales sin tomar en cuenta su preservación, para, luego de los procesos de fabricación, retornar inmensas cantidades de productos y subproductos en forma de desechos tóxicos persistentes, no susceptibles de degradación- se transforme en un modelo cíclico cerrado, donde la materia se recicle y la energía tenga un uso eficiente (Frosh y Gallopoulos, 1989; Lowe, Warren y Moran, 1997; Játem, Perdomo y Márquez, 2015).

Para cerrar el modelo lineal de producción y transformarlo en un modelo cíclico, se deben cumplir los siguientes requisitos:

- (1) Los residuos de una industria deben emplearse como materia prima de entrada de otros procesos de fabricación, con reducción de desechos a cero, idealmente.
- (2) La energía debe provenir idealmente de fuentes renovables no contaminantes y su uso debe ser eficiente, utilizando las pérdidas por disipación de calor de un proceso en otros.

De esta manera se lograrían los objetivos de:

- i.* Minimizar el uso de recursos naturales, con lo que se cumple una función preservadora del ambiente.
- ii.* Minimizar el impacto ambiental de la actividad económica.
- iii.* Reducir a un mínimo los costos de producción, transporte, gestión de desechos e impuestos ambientales.
- iv.* Incidencia social positiva, generando empleos con las máximas normas de higiene y seguridad ambiental y preservando la calidad del ambiente como hábitat humano.

La conceptualización de la actividad industrial en primer lugar como un sistema, implica abordarla como un objeto complejo con estructura, cuyas partes o elementos mantienen relaciones de

interacción e interdependencia, generando nuevas propiedades emergentes que no poseen las partes constituyentes.

Un ecosistema se define como un sistema complejo integrado por organismos vivos y su ambiente, donde los seres vivos interactúan entre sí y con el conjunto de factores abióticos del ambiente (temperatura, clima, nutrientes, entre otros). El ecosistema es el nivel más elevado y complejo de organización biológica; es de facto, un sistema de sistemas.

El funcionamiento de un ecosistema requiere de una fuente de energía y del flujo de esta energía a través de los componentes tróficos (alimentarios). Además, en todo ecosistema existe un movimiento continuo de materia: las sustancias químicas pasan del suelo, agua o atmósfera a los organismos jerarquizados en sus niveles alimentarios y de unos seres vivos a otros, hasta retornar al ambiente cerrando el ciclo. De esta manera, en el ecosistema, la materia se recicla y la energía tiene un flujo unidireccional, donde pasa de un nivel trófico a otro en un solo sentido: entra como energía lumínica o radiante, sufre transformaciones a energía química, cinética, térmica y sale en forma de energía calórica que ya no puede reutilizarse, de tal manera que, en este flujo de la energía dentro del ecosistema, siempre hay una pérdida en forma de calor (Segunda Ley de la Termodinámica).

La estructura trófica de un ecosistema funciona sin producir desechos no utilizables: toda la materia que conforma a los organismos, vivos o muertos, es reutilizada como nutriente para otros organismos. Esta estructura en general, de manera simplificada, consta de varios niveles tróficos:

- (1) Organismos productores autótrofos; éstos son seres vivos capaces de producir su propio alimento sintetizando compuestos orgánicos complejos como carbohidratos, a partir de sustancias inorgánicas sencillas como dióxido de carbono (CO_2) y de la energía solar, por fotosíntesis (plantas y algas) y produciendo otras sustancias como lípidos y proteínas, por quimiosíntesis.

- (2) Organismos consumidores o heterótrofos, los cuales se clasifican en: consumidores primarios o herbívoros, si se alimentan de organismos productores autótrofos y consumidores secundarios o carnívoros, si se nutren de consumidores primarios.
- (3) Organismos Descomponedores o saprótrofos; nivel conformado por organismos (generalmente hongos y bacterias), que se alimentan de los organismos muertos, de sus desechos y de los productos de su descomposición, los degradan y liberan en su metabolismo compuestos inorgánicos sencillos, como dióxido de carbono CO_2 , metano CH_4 , amoníaco NH_3 , que pueden ser reutilizados como nutrientes por los organismos productores. Al incorporarse estos productos de descomposición a los procesos de fotosíntesis y metabolismo, se cierran los ciclos de materia en el ecosistema.

Estos niveles tróficos no forman una cadena lineal, sino que conforman una red compleja de interrelaciones que cierra los ciclos de materia con transferencia y disipación de energía.

El fundamento conceptual de la Ecología Industrial requiere entonces que los sistemas industriales funcionen como un sistema complejo similar a los ecosistemas naturales, donde existan:

- i. Fuentes de energía renovable no contaminantes.
- ii. Empresas productoras de materias primas para otras que las requieran, estableciendo la analogía con los productores y los consumidores en un ecosistema.
- iii. Empresas cuyas materias primas sean los residuos de las demás empresas, actuando como los saprótrofos, carroñeros o descomponedores de los ecosistemas.

3. Implementación de la Ecología Industrial

3.1. Requisitos estructurales y funcionales

Para la implementación del marco conceptual de la Ecología Industrial, se requiere diseñar un Parque Eco-Industrial (PEI), como un sistema de industrias que cumpla con los requisitos estructurales y funcionales que se señalan a continuación:

- i. Creación de una red de industrias que estén interrelacionadas funcionalmente entre sí y que tengan una interacción de mínimo impacto sobre el entorno ambiental.
- ii. Aproximar el funcionamiento de la red o sistema de industrias, al de un ecosistema, donde deben existir como componentes estructurales: 1. Fuentes de energía renovables no contaminantes, 2. Empresas productoras de insumos o materias primas, 3. Empresas consumidoras primarias y secundarias y 4. Empresas saprótrofas, detrívoras, carroñeras o descomponedoras, que utilicen los residuos finales industriales.
- iii. Obtención de la mayor parte de la energía de fuentes renovables no contaminantes (solar, geotérmica, hidráulica, mareomotriz, eólica).
- iv. Las relaciones entre industrias deben incluir no sólo el intercambio de materia y energía, sino que deben ser de naturaleza socioeconómica, donde se generen vínculos de cooperación, intercambio de información y de personal especializado, proyectos conjuntos de investigación, servicio social a las comunidades, etc.
- v. Inclusión de los tres sectores del desarrollo sostenible, ambiental, social y económico, al esquema operativo industrial.

3.2. Herramientas analíticas para la implementación de un Parque Eco-industrial

La creación de un parque eco-industrial (PEI) requiere del uso multidisciplinario de herramientas analíticas que optimizan las sinergias industriales, minimizan el impacto ambiental y aumentan el beneficio socioeconómico general del sistema industrial; entre estas herramientas analíticas (Ayres y Ayres, 2002), se pueden citar de manera resumida las siguientes.

3.2.1. Diagramas de Flujo de Materia (DFM)

Los diagramas de flujo de materia son herramientas de análisis que permiten describir en una secuencia ordenada, de manera cualitativa y cuantitativa, el flujo de todos los materiales que son utilizados en

cada una de las etapas que conforman los procesos de producción y los flujos de interrelación entre éstos. Estos diagramas permiten el análisis de datos y la toma de decisiones para generar el intercambio de materiales y residuos.

Los diagramas de flujo de materiales deben incluir las entradas y salidas de materias primas, solventes e insumos para la operación y mantenimiento de maquinarias e instalaciones (lubricantes, desengrasantes, soluciones limpiadoras, entre otros), desde su origen hasta su disposición final y se construyen en diferentes niveles de operatividad:

Primer nivel: referido a los procedimientos más sencillos llamados componentes de proceso.

Segundo nivel: se refiere al nivel de proceso.

Tercer nivel: el cual esquematiza el nivel general de planta y contiene todos los procesos de cada una de las plantas industriales por separado.

Cuarto nivel: constituye el nivel más complejo pues esquematiza el funcionamiento del parque industrial completo.

3.2.2. *Diagramas de Flujo de Energía (DFE)*

El análisis del flujo de energía a través de todos los niveles operativos del parque industrial, permite el uso eficiente de este importante recurso -el cual debería provenir de fuentes renovables, no contaminantes, en lo posible- con modelos de uso en cascada del calor excedente de los procesos, contenido en vapor, agua caliente, superficies calientes, etc. así como uso del frío residual.

3.2.3. *Análisis del Ciclo de Vida de los Productos (CVP)*

Este análisis es una herramienta que estudia al producto desde su empaque y etiquetado, embalaje, almacenamiento, distribución, comercialización, hasta su consumo y desecho, con criterios de reciclaje y reutilización para minimización de su impacto ambiental. Requiere incluir la educación para formar consumidores responsables desde el punto de vista ambiental.

3.2.4. *Producción más Limpia (P+L)*

La Producción más Limpia es una estrategia diseñada por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente con el objetivo de exigir a los sistemas de producción industriales, la generación de menos residuos y/o residuos menos contaminantes. Esta estrategia incluye la optimización del uso de solventes y reactivos menos contaminantes (Química verde), las Biofactorías que emplean tecnologías biológicas no contaminantes, el reciclaje de residuos y envases, la captura y reutilización del CO₂ emitido, la implementación de biotratamiento de desechos y efluentes, el uso eficiente del agua y la implementación de plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otras prácticas preservadoras del ambiente.

3.2.5. *Metabolismo Industrial y Sinergias Industriales (MI, SI)*

El Metabolismo Industrial involucra el establecimiento de las Sinergias o Simbiosis Industriales, las cuales definen las relaciones de dependencia funcional e intercambio entre las empresas que conforman al parque eco-industrial.

3.2.6. *Industria 4.0 y Tecnología Informática Avanzada*

La Industria 4.0, llamada también la cuarta revolución industrial, es un modelo de producción industrial que incorpora el uso intensivo de tecnologías digitales para manejo de datos masivos en tiempo real y a gran velocidad, sistemas integrados con alta cyber-seguridad y de Internet de las cosas para conectar a la Internet, aparatos electrónicos dotados de sensores, con el objetivo de automatizar el funcionamiento de las industrias (Xu, Xu, y Li, 2018). La industria 4.0 ha sido ideada recientemente, por tanto no está incluida en los planteamientos teóricos originales de la Ecología Industrial, pero evidentemente se presenta como una poderosa herramienta para la implementación de las sinergias industriales.

3.2.7. *Ecodiseño del Parque Eco-Industrial*

El diseño arquitectónico del parque eco-industrial debe desarrollarse con criterios de protección ambiental y sostenibilidad, con utilización racional de materiales ecológicos y/o reciclados, eficiencia energética

con optimización de calefacción y enfriamiento, calefacción solar, enfriamiento pasivo, generación eléctrica solar o de otras fuentes de energía renovable en lo posible, calentadores solares de agua, uso eficiente del agua con reutilización de aguas grises y minimización de aguas negras, iluminación con ventanas que permitan la máxima entrada de luz, ventilación eficiente, techos verdes, zonas verdes, y todas las consideraciones que minimicen el impacto ambiental de la construcción tanto en el exterior como en el interior de las edificaciones.

3.2.8. Métodos de evaluación del funcionamiento del Parque Eco-Industrial

Es necesaria la implementación de métodos de evaluación multicriterio que generen indicadores cuantitativos del funcionamiento del parque eco-industrial; para cumplir este requisito hay que establecer criterios de evaluación e indicadores asociados a cada uno de éstos. Los criterios de evaluación podrían clasificarse en:

- i.* Cumplimiento de requisitos técnicos de seguridad e higiene y normativa legal de protección ambiental.
- ii.* Uso adecuado del territorio cumpliendo con la ordenación territorial.
- iii.* Capacidad de establecer sinergias industriales.
- iv.* Optimización del uso de recursos.
- v.* Uso eficiente de la energía.
- vi.* Uso eficiente del agua.
- vii.* Generación de desechos sólidos, efluentes y emisiones.
- viii.* Reciclaje y/o reutilización de desechos.
- ix.* Impacto económico: costos y beneficios.
- x.* Impacto social: generación de empleo, prestación de servicios a las comunidades vecinas.

4. Estudio de un caso emblemático: Parque Eco-Industrial de Kalundborg

En la actualidad existen varios parques eco-industriales en el mundo. En el cuadro 1, se citan algunos de los más importantes.

Cuadro 1. Algunos Parques Eco-Industriales en el mundo.

Continentes	Parques Eco-Industriales
América	By-Product Synergy, Tampico (México) Devens (EUA) Brownsville (EUA) Burnside (Canadá) Quebec (Canadá) Bruce Energy Center (Canadá)
África	Tsumeb (Namibia)
Asia	Nanghai Eco. Industrial Park (China) Dalian, Liaoning (China) China-Bielarus Industrial Park. Bungangan (Indonesia) Naroda (India) Nandeseri (India) ThanePelapur (India) Calabarzón (Filipinas)
Europa	Kalundborg (Dinamarca) Styria (Austria) NISP (Reino Unido) Ora Eco-Park (Noruega) Jyväskylä (Finlandia) CLOSED (Italia) MESVAL (Italia-Grecia-España) CICLE (España) Fondaterra (Francia)
Oceanía	Kwinana (Australia)

Fuente: Elaboración propia.

El Parque Eco-Industrial de Kalundborg, Dinamarca, fue el primero en implementarse en el mundo y constituye el ejemplo más emblemático de la aplicación práctica de las bases conceptuales de la EI (Ehrenfeld y Gertler, 1997; Ehrenfeld y Chertow, 2002; Jacobsen, 2006; Domenech y Davies, 2011).

4.1. Ubicación

Dinamarca está ubicada en el Norte de Europa, tiene una extensión de 43.024 km², un Índice de Desarrollo Humano (IDH) de 0,93, con una economía de mercado, posee estándares de vida por encima del promedio europeo. La economía del país se sustenta en un desarrollo agrícola de alta tecnología y en la actividad industrial, con alta dependencia de la importación de materias primas, pero autosuficiente en producción de energía, gran parte de la cual es generada por fuentes renovables no contaminantes. Exporta alimentos, maquinarias, equipos y repuestos de transporte, instrumentos médicos, aparatos electrónicos, productos químicos y farmacéuticos.

Kalundborg es una pequeña ciudad costera, localizada al Norte de Dinamarca, en el fiordo del mismo nombre y es capital del municipio homónimo. Cuenta con un terminal ferroviario y un puerto marítimo. Es una ciudad de unos 20.000 habitantes con una importante actividad industrial; allí se ubica la mayor central eléctrica de carbón-petróleo de Dinamarca (ASNAES) y la más importante refinería de petróleo del país (STATOIL).

El PEI de Kalundborg no fue originalmente concebido como un parque eco-industrial. Los aumentos de impuestos ambientales en 1961 y el problema de la escasez de agua dulce subterránea, obligaron a las industrias que estaban establecidas en la zona, a buscar relaciones de colaboración e interdependencia entre los empresarios y con el gobierno local, de tal manera que establecieron un proyecto de cooperación entre el sector público y el sector privado, con muchos productos intercambiados como: agua, vapor, polvo, gas combustible, calor residual, cenizas volantes, lodos residuales, yeso residual, restos vegetales, entre otros.

4.2. Empresas integrantes del PEI Kalundborg

Las empresas involucradas originalmente en el PEI Kalundborg y sus correspondientes actividades productivas, se resumen en el cuadro 2.

Cuadro 2. Empresas que se encuentran en el parque Eco-Industrial Kalundborg y sus correspondientes actividades productivas.

Empresa	Actividad productiva
ASNAES	Planta de generación de energía eléctrica, la más grande central energética de Dinamarca.(Termoeléctrica)
STATOIL	Refinería de petróleo. Mayor refinería de petróleo de Dinamarca, de capital noruego.
Kalundborg Forsyning	Plantas de potabilización y suministro de agua y de tratamiento de aguas residuales municipales.
Novo Nordisk	Empresa de producción biotecnológica de insulina, líder mundial en este rubro.
Novozymes	Fábrica para la producción de enzimas.
Inbicon	Empresa de producción de bioetanol.
Kemira	Consorcio industrial y de asesoría finlandés.
Gyproc	Fábrica de paneles de yeso para la construcción.
Aalborg Portland	Industria de producción de cemento.
Granja de acuicultura	Producción de peces.
Granja de cría de porcinos	Producción de porcinos.
Granjas agrícolas	Producción de vegetales para consumo humano.
Soilrem	Empresa de remediación de suelos contaminados.
Noverem	Empresa de tratamiento de desechos urbanos municipales.
RGS90	Gestora de residuos y suelos contaminados.
Gobierno municipal	Actividades varias como construcción de vías terrestres, pavimentación, suministro de calefacción, aseo urbano.
Lago Tisso	Fuente de agua superficial no tratada.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Relaciones de Sinergia o Simbiosis Industriales en el PEI de Kalundborg

La refinería de petróleo noruega STATOIL suministra gas combustible a la planta generadora de electricidad ASNAES y a la fábrica de paneles de yeso Gyproc; vende el azufre residual a Kemira, que lo emplea como materia prima en la producción de ácido sulfúrico; suple de asfalto residual de los procesos de destilación fraccionada, el cual se mezcla con lodo residual de ASNAES, para la pavimentación municipal.

STATOIL, que produce desde gas liviano hasta combustible pesado, está localizada en una vía terrestre que comunica con ASNAES y le compra 80.000 toneladas de vapor anualmente. Según la Oficina de Control Ambiental de Kalundborg, el único subproducto que resta de la refinación de 4,8 millones de toneladas de petróleo crudo al año, es el gas residual de la refinería, el cual se vende desulfurado a la planta eléctrica ASNAES. En 1990 STATOIL construyó una planta de endulzamiento de gas ácido (el gas ácido contiene anhídrido sulfúrico de carácter ácido y dióxido de carbono, los cuales se llaman “gases ácidos” en la industria, pues al reaccionar con agua producen ácidos sulfúrico y carbónico, respectivamente).

El proceso de endulzamiento elimina el contenido de dióxido de carbono y de anhídrido sulfúrico (en un 90 a 97%) del gas y evita su vertido a la atmósfera; además si el gas combustible se va a licuar para su comercialización, el contenido de dióxido de carbono es un problema, pues éste se solidifica en el proceso. El anhídrido sulfúrico eliminado del gas residual de la refinería, luego pasa por una unidad recuperadora de azufre de donde se obtiene azufre sólido o líquido fundido. Este azufre era inicialmente vendido a Kemira, consorcio industrial y asesor finlandés, que lo transformaba en ácido sulfúrico, insumo de diversas industrias, maderera y de papel, metalúrgicas, petroquímicas, plásticos, fertilizantes, textiles, tenerías, detergentes, explosivos, entre otras. En la actualidad se fabrican 20.000 toneladas al año de fertilizante líquido a partir de tiosulfato de amonio, $(\text{NH}_4)_2(\text{S}_2\text{O}_3)$, el cual es un producto secundario del sistema de remoción de azufre del crudo.

En 1972, STATOIL comenzó a enviar sulfato de calcio residual (yeso) del proceso de desulfuración de crudo y gas butano combustible, a Gyproc para la elaboración de los paneles de yeso y el funcionamiento de los hornos de secado de los mismos, eliminando la práctica común de quemar los gases residuales. Este sistema de aprovechamiento del butano se emplea ahora también como refuerzo de la tubería de gas pública (el gas de uso doméstico es una mezcla de 60% de butano, 30% de iso-butano, 9% de propano y 1% de etano).

En 1961 la escasez de agua dulce superficial en la zona, condujo a que la STATOIL emprendiera un proyecto de extracción de agua del cercano lago Tisso, a 50 km de Kalundborg. Posteriormente, ASNAES y Novo Nordisk se unieron a este proyecto. En adición, existen otros esquemas de reutilización de agua y aguas residuales recicladas. Desde 1987, STATOIL ha bombeado por acueducto 700.000 m³/año de agua del enfriamiento a ASNAES, donde se purifica y se usa como agua para calderas. STATOIL también supe de agua residual tratada a ASNAES, la cual usa aproximadamente 200.000 m³/año para propósitos de limpieza. La inversión de STATOIL en una planta de tratamiento biológico, produce un efluente suficientemente limpio para ser usado por ASNAES. Las relaciones de enlaces simbióticos han reducido el consumo total de agua de las empresas participantes en un 25% y en la planta eléctrica se ha reducido el uso de agua en un 60%.

ASNAES, es una central termoeléctrica, donde la energía de la combustión de carbón y combustible de petróleo, se emplea para producir calor y transformar agua líquida en agua gaseosa (vapor) en calderas. El vapor generado a altas presiones, se dirige a turbinas para que, al expandirse, aporte la energía mecánica requerida para mover las paletas del rotor y activar la generación de electricidad inducida por un campo magnético.

ASNAES vende vapor excedente a la refinería STATOIL y a las empresas farmacéuticas Novo Nordisk y Novozymes; suministra también sulfato de calcio residual (yeso) de desulfuración adicional del combustible, como materia prima a Gyproc; cenizas volantes a la cementera Aalborg Portland, para adicionarlas al cemento; calor residual a la granja de acuicultura y surte de electricidad a todo el PEI y a la ciudad. La generadora de electricidad, exportando parte de la energía residual (vapor) que antes era desperdiciada, ha reducido la fracción de energía desechada en un 80% y ha reducido 240.000 toneladas de emisiones de CO₂ por año.

Desde 1981, la municipalidad ha eliminado el uso de 3.500 hornos residenciales de petróleo, con la distribución de calor desde

ASNAES a través de una red de tuberías subterráneas a un costo muy bajo para los ciudadanos. La planta eléctrica también supe de agua caliente que ha sido usada para enfriamiento, abasteciendo a una granja de piscicultura que produce 200 toneladas de trucha al año. ASNAES también entrega vapor residual de sus procesos a sus vecinos Novo Nordisk y Novozymes. La refinería STATOIL recibe de ASNAES el 15% de sus requerimientos de vapor y las farmacéuticas, todo el vapor que necesitan. Esta decisión se tomó en 1982, cuando Novo Nordisk debía renovar sus calderas y comprar el vapor resultó ser una alternativa mucho más rentable. La inversión en 3,22 km de tubería de vapor construida para el intercambio, se recuperó en dos años. En adición, la contaminación térmica del fiordo cercano por las descargas de ASNAES, se ha reducido.

ASNAES funcionaba originalmente desde sus inicios, con carbón. Entre 1997 y 2003, utilizó como combustible Orimulsión, mezcla de petróleo extrapesado con un 30% de agua y compuestos tensoactivos, importada desde Venezuela. Entre 1993 y 2003, año en el cual Venezuela suspendió la producción de Orimulsión, por ser poco rentable, ASNAES instaló una planta depuradora de azufre y aprovechaba el alto contenido de azufre de la Orimulsión (2.5% versus 1% del carbón), para embarcarlo y venderlo también a la empresa finlandesa Kemira, productora de ácido sulfúrico. Adicional, esta planta desulfuradora genera como producto secundario, 170.000 toneladas de sulfato de calcio o yeso industrial, el cual se vende a Gyproc como materia prima para los paneles de construcción, proveyendo así a esta industria de todo el yeso que requiere. Anterior al establecimiento de esta sinergia particular, Gyproc importaba el yeso desde Alemania de una planta eléctrica similar a ASNAES y de España, proveniente de unas minas a cielo abierto.

Aproximadamente 70.000 toneladas de cenizas volantes residuales son vendidas por ASNAES a la cementera Aalborg y a la municipalidad de Kalunborg para la construcción de carreteras. Adicionalmente, ASNAES ha encontrado valor económico en las

cenizas volantes y recupera Níquel y Vanadio de éstas. El porcentaje de recuperación era muy alto en los años en que se usaba la Orimulsión, pues el crudo extrapesado que la constituía es muy rico en estos metales.

La planta farmacéutica Novozymes genera un lodo biológico rico en nitrógeno y fósforo que se usa como fertilizante en las granjas agrícolas de horticultura. Novo Nordisk y Novozymes están ubicadas a unos pocos kilómetros de ASNAES y STATOIL, ambas constituyen un complejo farmacéutico líder en producción de insulina y enzimas. La planta general posee más de mil empleados.

Novo Nordisk fabrica insulina humana a través de microorganismos modificados genéticamente. La fermentación de productos de cosecha agrícolas por la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, produce un caldo rico en nutrientes que se emplea para cultivar la bacteria *Escherichiacoli* genéticamente modificada la cual, producto de ingeniería genética, es portadora de los genes humanos responsables de la producción de insulina. De este modo, los genes humanos introducidos en la *E. coli*, se expresan y las bacterias producen insulina en grandes tanques y a altas velocidades.

Después de la producción biotecnológica, resulta un lodo rico en nutrientes como residuo, el cual desde 1976, la empresa Novo Nordisk distribuye a 100 granjas, donde se usa como fertilizante. Posteriormente a un tratamiento de esterilización con calor para eliminar los microorganismos remanentes, el lodo se distribuye por bombeo a través de tuberías y camiones tanqueros a las zonas rurales aledañas. Novo Nordisk produce 3.000 m³ de lodo por día y sólo puede almacenar la cantidad producida en tres días, por lo que el lodo se distribuye gratuitamente en lugar de venderse, reflejando la responsabilidad de la empresa en la disposición segura de desechos. Esta distribución gratuita, fue la vía menos costosa encontrada para cumplir las regulaciones ambientales que prohíben la descarga directa del lodo en el mar o lago Tisso cercano.

Adicional, la empresa farmacéutica Novo Nordisk dirige 150.000 ton/año de un caldo de levadura residual de la producción de insulina, hacia la granja porcina, donde se emplea como suplemento

de alto valor nutricional en la alimentación de más de 800.000 mil cerdos por año. Los lodos microbiológicos residuales también se utilizan en Soilrem y Noverem para tratamientos de biorremediación de suelos.

Los desechos vegetales (restos de podas, paja y otros residuos hortofrutícolas) de las granjas agrícolas, se emplean como materia prima en la producción de bioetanol en la empresa Inbicon. El bioetanol se produce por fermentación de carbohidratos (almidón, celulosa, hemicelulosa) producidos por fotosíntesis en las plantas y contenidos en la materia orgánica de vegetales. El bioetanol obtenido se puede usar como combustible mezclado con gasolina (5 a 10% de etanol) pues es muy inflamable. Así, 30.000 toneladas de paja por año se convierten en 5,4 millones de litros de bioetanol.

De esta manera, el PEI se asemeja a una red alimenticia compleja, cuya estructura funcional análoga a un ecosistema, se describe en el cuadro 3.

Cuadro 3. Analogía entre la estructura funcional del PEI de Kalundborg y la estructura de una red alimenticia compleja en un ecosistema.

Fuentes de energía	Refinería de Petróleo STATOIL y Planta Generadora de Electricidad ASNAES.
Consumidores primarios	Planta productora de paneles de yeso Gyproc. Cementera Aalborg Portland. Productora de ácido sulfúrico Kemira. Empresa farmacéutica Novo Disk.
Consumidores secundarios	Granjas agrícolas. Granja porcina. Productora de Bioetanol Inbicon. Granja de acuicultura. Ciudad de Kalundborg.
Descomponedores	Soilrem, empresa que se encarga de remediación de suelos. Noverem, que hace el tratamiento de los desechos sólidos municipales. RGS90, gestora de residuos y suelos contaminados. KalundborgForsyning, empresa que se encarga del tratamiento de las aguas residuales municipales (además del suministro general agua potable).

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 1 se muestra un esquema de las relaciones de simbiosis industrial establecidas en el PEI de Kalundborg.

4.4. Ahorros en recursos energéticos e insumos

Los ahorros anuales en recursos debidos a los intercambios simbiosis industrial se resumen en:

(1) Ahorro en agua.

STATOIL: 1,2 millones de m³, 96% del total usado.

ASNAES: reducción del 60% del total usado.

Novo Nordisk y Novozymes: reducción del 20%.

Casi 1/3 de los 10 millones de m³ del agua que consume el PEI Kalundborg, es reciclada y reutilizada.

(2) Emisiones de CO₂.

Reducción de 240.000 ton/año.

(3) Desechos evitados a través de los intercambios.

ASNAES: 380.000 ton de SO₂ evitadas por reemplazo de carbón.

ASNAES: 130.000 ton de CO₂ evitadas por reemplazo de carbón.

ASNAES: 60.000 ton de cenizas volantes.

ASNAES: Lodos.

STATOIL: 2.800 tons de azufre (S) como H₂S en emisiones.

Novo Nordisk: Lodos que se someten a tratamiento de aguas residuales.

(4) Ahorro en combustibles.

ASNAES: 30.000 ton por uso de gas de STATOIL.

Comunidad de Kalundborg: La población se sirve de calefacción a través del vapor suministrado por excedente de ASNAES.

(5) Ahorros en insumos intercambiados.

Novo Nordisk - Granjas hortícolas: Novo Nordisk suministra lodos como fertilizantes a las granjas hortícolas, equivalentes a 1.300 ton de N y 550 ton de P; 97.000 m³ de biomasa sólida y 280.000 ton de biomasa líquida.

STATOIL - Granjas hortícolas: STATOIL suministra azufre (S) como fertilizante para 20.000 Há de granjas hortícolas.

STATOIL - GYPROC: STATOIL suministra a GYPROC 170.000 ton de yeso residual.

STATOIL recupera V y Ni de cenizas volantes residuales.

ASNAES-Aalborg Portland: La planta eléctrica suministra sus residuos de cenizas para ser adicionadas al cemento de Aalborg Portland.

Granjas hortícolas – INBICON: Las granjas hortícolas suministran 30.000 ton de paja y restos de podas a la fábrica de bioetanol INBICON.

Kalundborg es un sistema dinámico y adaptativo a cambios. En la actualidad algunos nexos comerciales se han roto (como la venta de azufre a Kemira), y se han establecido otros nuevos (venta del azufre residual como fertilizante). Hay relaciones que nunca se produjeron, como la idea de calentamiento de invernaderos con el vapor de ASNAES y se evalúan constantemente muchos nuevos nexos. En 1999, se unió un nuevo socio, Bioteknisk Jordrens, compañía que usa los lodos de las aguas negras municipales como nutrientes en procesos de biorremediación de suelos contaminados.

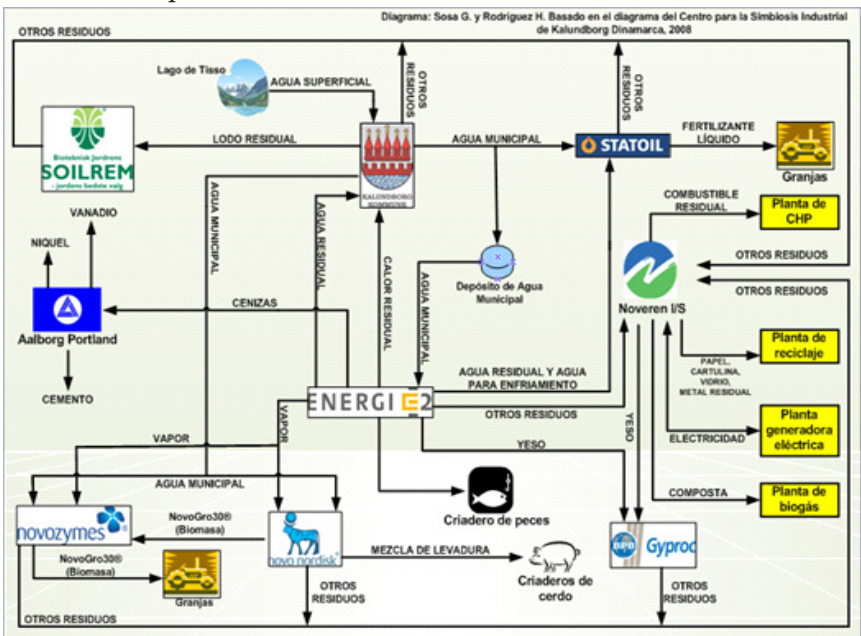


Figura 1. Diagrama de las simbiosis industriales establecidas en el PEI de Kalundborg. (Tomado de Cervantes, Sosa, Rodríguez y Martínez, 2009).

5. Beneficios de la implementación de Parques Eco-Industriales

Los beneficios de la creación de parques eco-industriales, se proyectan en los tres sectores del desarrollo sostenible.

Beneficios en el sector social:

- Aumento en la oferta de empleo.
- Incremento en las oportunidades para actividades comerciales locales.
- Recepción de servicios prestados por el parque eco-industrial a la comunidad.
- Mejora en la calidad de vida por la disminución de efectos negativos sobre el ambiente.
- Se fomenta la creación de redes que promueven la investigación y el desarrollo científico y se fortalecen los nexos entre los sectores académico e industrial.
- Fortalecimiento de las relaciones entre el sector productivo y el gubernamental.

Beneficios en el sector ambiental:

- Reducción general de impactos ambientales.
- Uso eficiente de recursos materiales y agua, que disminuye la extracción de los mismos.
- Uso eficiente de la energía no contaminante, disminución de emisión de gases de efecto invernadero.
- Reducción de residuos, efluentes y emisiones contaminantes.
- Mejora de la calidad ambiental con preservación ecológica.

Beneficios en el sector económico:

- Maximización de ganancias económicas.
- Reducción de costos operacionales en materias primas, energía, agua, transporte.
- Disminución de gastos en impuestos ambientales y posibles sanciones.
- Mejora de la opinión pública sobre la empresa.
- Mayor acceso a financiamiento.

6. Dificultades para la creación de Parques Eco-Industriales

Existen dificultades y limitaciones de diferente naturaleza, para crear los parques eco-industriales. En primer lugar, la gestión integrada es compleja y difícil. El modelo de desarrollo económico actual promueve la competitividad entre empresas y esa concepción, dificulta la cooperación requerida para establecer las redes de intercambio de materiales, información, servicios y personal. Por otro lado, el funcionamiento eficiente del parque eco-industrial requiere la flexibilidad de adaptación de cada industria y de las interrelaciones entre éstas, a cambios en las tecnologías empleadas y cambios en las regulaciones ambientales.

7. Críticas a la Ecología Industrial

Los principales críticos de la Ecología Industrial son los seguidores de la Economía Ecológica (EE) (Constanza, 1991; García, 2008), disciplina que analiza las interacciones entre los procesos económicos y los procesos ecológicos, así como los adeptos de la Sustentabilidad Radical y Economía Ecológica Radical (Leff, 2008; Barkin, 2012) y de la Economía del Estado Estacionario (Daly, 1974). Argumentan que la contradicción entre la finitud de los recursos naturales del planeta y el mito del crecimiento económico ilimitado, no puede resolverse completamente con los mecanismos propuestos por la Ecología Industrial (EI). Señalan que:

- i. La Ecología Industrial plantea compatibilidad entre crecimiento económico y ambiente, sin cambiar el modelo productivo actual.
- ii. La EI no toma en cuenta el impacto ambiental irreversible e inevitable que genera la expansión productiva intensiva.
- iii. No se considera la historia de cada industria y la deuda ecológica que ha generado en su actividad.
- iv. La necesidad de aplicar el Principio de Precaución, con medidas correctivas en condiciones de incertidumbre sobre el daño ambiental y el Principio de Prevención, evitando daños ambientales antes que controlarlos y gestionarlos *a posteriori*.

- v. Sugieren rescatar los métodos productivos tradicionales de culturas ancestrales, como no contaminantes y preservadores del ambiente.
- vi. Señalan la imponderabilidad económica de la naturaleza en toda su dimensión y la falacia de los impuestos ambientales y el mercado de los bonos de contaminación por dióxido de carbono.
- vii. Advierten que el debate sobre desarrollo sostenible está ocurriendo sólo en la esfera del lenguaje, con términos “pintados de verde” como: economía verde, simbiosis industrial, procesos limpios, eco-eficiencia, y que no se hace un tratamiento profundo, de fondo, sobre el problema global.
- viii. Los seguidores de la Sustentabilidad Radical postulan además, la necesidad de bajar el ritmo del crecimiento económico de los países desarrollados, para permitir que los no desarrollados crezcan hasta cubrir sus necesidades básicas. Afirman que existe la necesidad de un “crecimiento cero de la economía” o Economía de Estado Estacionario, para los países desarrollados.

8. Conclusiones

El modelo dominante de desarrollo económico y social que la humanidad se ha planteado a partir de la primera revolución industrial, cuyo fundamento es el crecimiento ilimitado sin considerar la preservación del ambiente natural del planeta, ha entrado en una crisis profunda desde mediados del siglo pasado. Este modelo productivo cuyas entradas provienen de la explotación intensiva y voraz de los recursos energéticos y materias primas finitas del ambiente y, cuyas salidas son emisiones y efluentes tóxicos y productos comercializables cuyo uso genera desechos contaminantes, ha alcanzado un punto de quiebre.

La acumulación económica de los productores, que promueven el consumo masivo de bienes y servicios por parte de un sector social reducido, no sólo ha generado la destrucción del ambiente

como única fuente de materias primas, sino que, además, en lugar de producir equidad en el bienestar social, ha sumido a una gran parte de la humanidad en la pobreza y la desigualdad en las condiciones de vida. En resumidas cuentas, es evidente que este modelo de desarrollo sólo ha tomado en cuenta la dimensión económica, olvidando las otras dos dimensiones, la ambiental y la social, propuestas como ejes del desarrollo sostenible.

El ambiente del planeta está mostrando signos inequívocos de daños graves e irreversibles; el calentamiento global, el cambio climático, la lluvia ácida, la destrucción de la capa de ozono, el smog fotoquímico, la contaminación generalizada de aguas, suelos y atmósfera, la desertificación con pérdida de bosques y áreas cultivables productoras de oxígeno y sumideros de dióxido de carbono, la extinción masiva de biodiversidad; todos éstos, problemas generados por la actividad antrópica, erigen vergonzosamente a la especie humana como la única especie biológica que degrada y destruye su entorno vital.

Se ha pretendido utilizar la contaminación y el daño ambiental desde un enfoque mercantilista con la implementación de los impuestos ambientales y los bonos intercambiables de compra-venta de derechos para producir emisiones contaminantes de dióxido de carbono. Esto sólo es el reflejo directo de una visión cerrada, economicista, del ambiente y los recursos naturales, los cuales son absolutamente imponderables desde el punto de vista económico.

La humanidad se enfrenta a un gran dilema no sólo de dimensiones económicas, sociales y ambientales, sino de unas dimensiones mucho más profundas, éticas y morales. Ante las condiciones de miseria e inequidad de gran parte de la humanidad, ¿es viable la teoría del crecimiento cero y estado estacionario de la economía? Por otro lado, ¿qué tipo de desarrollo persiguen los llamados países en vías de desarrollo? ¿Es el mismo modelo productivo que profundiza los problemas ambientales y sociales actuales?

Las respuestas que pudiera ofrecer la humanidad a todos estos conflictos, complejos y de difícil solución, no están aún al alcance inmediato. Se asoma como posible alternativa, un desarrollo de una economía circular, con máxima eficiencia en el uso de los recursos y mínima producción de desechos contaminantes. Dentro de este planteamiento, la Ecología Industrial es un modelo para el desarrollo productivo, que nace por motivaciones económicas, pero es innegable que a través de su implementación, se logran reducciones significativas en la extracción de materias primas y en el impacto ambiental, además de beneficios en el sector social.

Existen límites en la analogía ecológica planteada en la concepción teórica de la Ecología Industrial, debido a una diferencia fundamental esencial, entre los sistemas económicos humanos y los sistemas ecológicos naturales. Los ecosistemas son sistemas cerrados, excepto por la entrada de energía solar, la pérdida por disipación de energía (Segunda Ley de la Termodinámica) y la dinámica de poblaciones en equilibrio lineal. Los sistemas económicos, en cambio, son sistemas abiertos en relación a la energía y los materiales.

Los ecosistemas naturales tienen un comportamiento fundamentado en mecanismos de autoorganización y autorregulación, que funcionan en estados de no equilibrio. Cuando un sistema natural sufre una perturbación, puede pasar a otro estado cuya estructura y comportamiento son diferentes de los del estado inicial, adaptándose al cambio perturbador. La resiliencia es una característica de los sistemas naturales, que define la capacidad de respuesta a una perturbación externa, sin que ésta cause desestabilización. La evolución biológica se fundamenta en esta capacidad de adaptación.

Se ha definido la sostenibilidad como la habilidad de mantener la capacidad adaptativa y se ha sugerido que el desarrollo sostenible está formado por ciclos adaptativos evolutivos (Holling, 2001); dentro de este marco de ideas, se pudiera considerar a la Ecología Industrial como un intento efectivo de disminuir el daño ambiental producido por la industria, que está en evolución y que requiere de un mayor desarrollo científico y tecnológico para consolidarse.

9. Referencias

- Ayres, Robert y Ayres, Leslie (2002) *A Handbook of Industrial Ecology*. Second edition. USA: Edward Elgar, 711pp.
- Barkin, David (2012). "La significación de una economía ecológica radical". *Revista Iberoamericana de Economía Ecológica*. 19, pp. 1-14. Consultado: 01/10/2018. Disponible (on line): http://www.redibec.org/IVO/REV19_01pdf.
- Cervantes, Gemma; Sosa, Daniel; Rodríguez, Gabriela y Robles, Fabián (2009). "Ecología Industrial y Desarrollo Sustentable". *Ingeniería*. 13,1, pp. 63-70. Consultado: 1/10/2018. Disponible (on line): <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46713055007>
- Club de Roma (1972). *Los Límites del Crecimiento*. México: Fondo de Cultura Económica, 255pp.
- Constanza, Robert (1991). *Ecological Economics: The science and management of sustainability*. New York: Columbia University Press, 537pp.
- Daly, Herman (1974). *A Steady State Economy*. San Francisco: Freeman, 165pp.
- Domenech, Teresa and Davies, Michael (2011). "Structure and morphology of industrial symbiosis networks: The case of Kalundborg". *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 10, pp. 79-89. DOI: 10.1016/j.sbspro.2011.01.011
- Ehrenfeld, John and Chertow, Marian (2002). *Industrial Symbiosis: The legacy of Kalundborg. A Handbook of Industrial Ecology*. Northampton: Edward Elgar, pp.334-348.
- Ehrenfeld, John, and Gertler, Nicholas (1997). "Industrial Ecology in Practice. The Evolution of Interdependence at Kalundborg". *Journal of Industrial Ecology*. 1, pp. 67-69. DOI: 10.1162/jiec.1997.1.1.67
- Ehrenfeld, John (2004). "Can Industrial Ecology be the Science of Sustainability?" *Journal of Industrial Ecology*. 8, pp. 1-3.
- Frosch, Robert y Gallopoulos, Nicholas (1989). "Strategies for manufacturing". *Scientific American*. 261, 3, pp. 144-152. Consultado: 01/10/2018. Disponible (on line): www.umich.edu/~nppcpub/resources/compendia/IEOR_Reading.pdf

- Gabaldón, Arnoldo (2006). *Desarrollo Sustentable. La salida para América Latina*. Caracas: Editorial Grijalbo, 489 pp.
- García Salazar, Edith Miriam (2008). "Economía Ecológica frente a Ecología Industrial". *Argumentos*. 21, 56, pp. 55-71. Consultado: 01/10/2018. Disponible (on line): www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=50187-579520080001000048script=sci_arttext
- Holling, Crawford (2001). "Understanding the complexity of economic, ecological and social systems". *Ecosystems*, 4, pp. 390-405.
- Jacobsen, Noel (2006). "Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark: A quantitative assesment of economic and environmental aspects." *Journal of Industrial Ecology*. 10, 1-2, pp. 239-255. DOI: 10.1162/108819806775545411
- Játem, Alicia, Perdomo, Trigal y Márquez, Johan. (2015). *Ecología Industrial: ¿vía factible para el Desarrollo Sostenible?*. Ponencia. Jornadas de Desarrollo y Ambiente del CIDIAT ULA. Julio 2015.
- Jensen, Paul; Basson, Lauren y Leach, Michael (2011). "Reinterpreting Industrial Ecology". *Journal of Industrial Ecology*. 15, pp. 680-692. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2011.00377.x
- Leff, Enrique (2008). "Decrecimiento o deconstrucción de la economía: un mundo sustentable". *Polis Revista Latinoamericana*. 7, 21, pp. 81-90. Consultado: 01/10/2018. Disponible (on line): <http://journals.openedition.org/polis/2862>.
- Lowe, Ernest; Warre, John y Moran, Stephen (1997). *Discovering Industrial Ecology*. Columbus: Batelle Press, 102pp.
- ONU (1987). *Our Common Future*. Oxford: Oxford University Press, 383pp.
- Xu, Li Da, Xu, Eric y Li, Ling (2018). "Industry 4.0: state of the art and future trends. A Review". *International Journal of Production Research*. 56, 8, pp. 2941-2962. DOI: 10.1080/00207543.2018.1444806