



## Ecología Industrial: innovación y desarrollo sostenible en sistemas industriales

*Industrial Ecology: innovation and sustainable development in industrial systems*

*Gemma Cervantes Torre-Marín*

La ecología industrial (EI) es un área interdisciplinaria que intenta asimilar el funcionamiento de los ecosistemas industriales al de los naturales, con una interrelación entre industrias, el medio social y natural que tiende a cerrar el ciclo de materia y que tiende al desarrollo sostenible. El cierre de ciclo de materia se consigue en parte usando los residuos de una industria como materia prima de otras. La EI utiliza diferentes herramientas como análisis de ciclo de vida, indicadores de desarrollo sostenible, análisis de flujo de materia, etc. La EI promueve la innovación en sistemas industriales a través de un cambio de concepción, donde el límite no está en la propia empresa. En este trabajo, basado principalmente en las visitas y trabajo en ecosistemas industriales reales, se muestra una aproximación al concepto de EI, se describen algunos sistemas ecoindustriales en el mundo y se citan algunas de las herramientas y estrategias que utiliza la EI.

---

Industrial ecology (IE) can be defined as a multidisciplinary approach the ultimate goal of which is to have industrial systems operate like natural ecosystems by having industries, society and nature interact mutually in cycling matter and moving towards sustainable development. Closing the loops can be partly accomplished by having an industry use by-products and waste from another as a raw material. Industrial ecology tools include: lifecycle assessment, sustainable development indicators, material flow analysis, etc. IE innovates and promote a new way of thinking by expanding the limits from the firm to the industrial system. This paper describes the IE concept, some IE examples around the world and some IE tools and strategies. The work is based on real IE examples.

### **Descriptorios / Key Words**

Ecología industrial, parques ecoindustriales, desarrollo sostenible / Industrial ecology, eco-industrial parks, sustainable development

# Ecología Industrial: innovación y desarrollo sostenible en sistemas industriales

*Gemma Cervantes Torre-Marín*

*Profesora Titular Instituto Politécnico Nacional  
E-mail: gemma.cervantes@gmail.com*

## 1. La ecología industrial y otros conceptos relacionados

### 1.1. Concepto de ecología industrial

La EI es un área interdisciplinaria que intenta asimilar el funcionamiento de los ecosistemas industriales al de los naturales, con una interrelación entre industrias, el medio social y natural que tiende a cerrar el ciclo de materia (Cervantes, 2007a) y quiere llevar los sistemas industriales hacia el desarrollo sostenible. Esta relación entre industrias tiene, como uno de sus objetivos, tender a cerrar el ciclo de materia y, por lo tanto, a obtener un nivel cero de residuos. Esto lo consigue en parte usando los residuos de una industria como materia prima de otras, como pasa en los ecosistemas naturales.

Esta concepción de la ecología industrial, que parte de la metáfora de los ecosistemas naturales, tiene sus limitaciones, como ha sido señalado por diferentes autores (Bey 2001, Spiegelman 2003, Ehrenfeld 2004, Jensen 2011). Se destaca como limitaciones la diferente naturaleza de los sistemas naturales y los económicos, el hecho de que los sistemas humanos funcionan lejos del equilibrio y que son sistemas abiertos. Pero al mismo tiempo se admite que esta comparación sería válida si se enfocaran los ecosistemas industriales como sistemas complejos y se profundizara más en la evolución de estos ecosistemas.

Otro de los objetivos de la relación entre industrias es la creación de sistemas de industrias interrelacionados, formando redes donde el intercambio no es solo material. La ecología industrial crea redes socioeconómicas que se vinculan en relaciones de cooperación, cliente-proveedor, de investigación, de pertenencia a asociaciones, de colaboración en proyectos comunes, etc.

Otro objetivo de la EI es situar la actividad tecnológica como parte del ecosistema que la incluye, analizando las entradas de recursos y salidas de residuos, así como también la manera en que la actividad humana afecta al ecosistema. Esta visión sistémica ha sido una de las grandes aportaciones de la ecología industrial (Erkman, 2001). También la ecología industrial desarrolla herramientas y estrategias para la creación de parques ecoindustriales. Por este motivo, la ecología industrial es una buena herramienta para la planificación de nuevos parques industriales y para la reconversión de otros. Por tanto la EI promueve la creación de relaciones, en forma de redes, conectando al sistema industrial entre sí y a éste con la sociedad y el medio natural. Este es un aspecto muy importante de la EI y la clave para que ésta contribuya al desarrollo sostenible de los sistemas industriales (Cervantes et al., 2009).



La EI, como el desarrollo sostenible, incluye aspectos ambientales, sociales y económicos pero es necesario redefinir el desarrollo sostenible y vincularlo más a la dinámica ecológica para ver claramente la relación entre ecología industrial y desarrollo sostenible (Ehrenfeld, 2004). Sí se puede ver la relación entre ambas áreas cuando se observa cómo la ecología industrial aplica muchos de los criterios del desarrollo sostenible, tales como: cierre de ciclo de materia, desmaterialización, fomento de la ecoeficiencia, obtención de ganancias por venta de residuos, fomento del capital social local, incremento y mejora de los puestos de trabajo, entre otros.

La EI comporta beneficios económicos, medioambientales y sociales tales como el ahorro de recursos, la minimización de residuos, la disminución de emisiones y cargas contaminantes, la disminución de costos ambientales, la mejora en puestos de trabajo, la creación de redes, la mejora de la imagen ambiental de las empresas, entidades y municipios y la mayor relación y colaboración dentro del sector industrial y del sector industrial con el medio social y natural (Lowe et al., 1997).

Existen muchas limitaciones en la aplicación de la ecología industrial a sistemas industriales. Una de las principales es la dificultad de crear las redes de interrelación entre industrias que permitirán el intercambio entre ellas. El sistema industrial está bajo la premisa de la competición y resulta difícil que se cambie la mentalidad para comprender que la cooperación en algunos aspectos puede ser más beneficiosa. Otra dificultad es cómo establecer relaciones dinámicas, ya que el sistema industrial es dinámico y debe estar en continuo cambio. Si dos empresas establecen un contrato para el intercambio de un residuo como materia prima, deben tener una visión más amplia y establecer los mecanismos para seguir cooperando cuando ya no interese el intercambio del citado residuo.

Como resumen, hay tres elementos básicos en un sistema de EI (Cervantes, 2007b):

1. Que mire a la industria con visión global, sistémica e imitando el funcionamiento de los ecosistemas naturales.
2. Que se cree una red dinámica de entidades o empresas relacionadas con su entorno.
3. Que se enfoque hacia el desarrollo sostenible e incluya aspectos sociales, económicos y ambientales.

Pero la EI es una disciplina que se va ampliando y redefiniendo desde su creación e incluye aspectos como: la responsabilidad social corporativa, el consumo responsable, la producción, construcción y transporte sostenible, el metabolismo regional y urbano, la economía ambiental y ecológica, etc. La EI puede ser aplicada en la agricultura, en el turismo, en la gestión de la energía y en muchos otros campos (ISIE, 2011).

## **1.2 Experiencias relacionadas con la ecología industrial. La simbiosis industrial**

La simbiosis industrial (SI) es un método que promueve el establecimiento de sinergias entre industrias de manera que se produce una interrelación beneficiosa para las industrias involucradas. Estas sinergias suelen ser el uso de un residuo como materia prima de otra industria, pero también pueden ser la utilización o implantación conjunta de un servicio o infraestructura. También se llama simbiosis industrial al sistema de industrias interrelacionadas a través del método de simbiosis industrial. Así, el mismo término define el método y la realidad que el método origina.

La SI nació con un objetivo puramente económico. Aunque siempre se ha reconocido que conlleva buenas consecuencias ambientales, hasta el año 2011 no admitió la comunidad internacional de SI que todo intercambio material en una simbiosis industrial va acompañado de una relación social. Por tanto se acordó que la simbiosis industrial incluye aspectos ambientales, sociales y económicos.

La diferencia entre EI, como se definió previamente, tiene una visión más amplia y un triple objetivo: ambiental, social y económico. Por tanto la simbiosis industrial es el método por excelencia usado por la EI y está incluido en ella. Y la EI engloba a la SI pero es más amplia que éste método.

Hay algunas experiencias en diferentes partes del mundo que equivalen a la simbiosis industrial, aunque no llevan este nombre: sinergia industrial, metabolismo industrial, red de intercambio de subproductos, red de reciclaje, sinergia de subproductos, red de emisiones cero. Todas estas tienen en común que utilizan residuos de una industria o entidad como materia prima de otra industria o entidad. Muchas de estas experiencias iniciaron como una simbiosis industrial pero con el tiempo fueron ampliando sus objetivos y logros hasta convertirse en auténticos sistemas de EI.

## **1.3 Ecosistema industrial, parque ecoindustrial, redes de trabajo ecoindustrial**

Cuando la EI se desarrolla en un grupo de empresas o parque industrial, éste se llama parque ecoindustrial (PEI). Las empresas del PEI cooperan en un área determinada, con los objetivos de la EI y donde las empresas utilizan residuos de algunas de ellas como materia prima de otras. Un ecosistema industrial o red ecoindustrial define a una área más amplia donde se coopera con los objetivos de la EI y que puede extenderse a regiones, incluso a países (Erkman, 2003).

En cambio, el término ecoparque se suele utilizar para un grupo de empresas que promueve el cuidado del ambiente e incluso tecnologías de producción más limpia, pero que no incluye la simbiosis industrial como método. También puede denominar a un grupo de empresas de reciclamiento que se instalan juntas en una zona pero que no intercambian entre ellas, sino que únicamente reciclan



materiales que otras empresas les proporcionan. En estos dos casos no podemos hablar de sistemas de EI, ya que no incluyen la creación de una red de intercambio con utilización de residuos de unas empresas como materia prima de otras.

Las redes de trabajo ecoindustrial se refieren a empresas y entidades que trabajan en red, aplicando los criterios de la ecología industrial, pero que no están necesariamente en el mismo espacio físico.

## **2. Orígenes de la ecología industrial**

En los años 50 los ecologistas defendían las medidas a “final de tubo” (filtros, plantas de tratamiento de aguas residuales, etc.) como una manera de reducir el impacto ambiental de la industria. Esto reflejaba la concepción de que era necesario separar a la industria del entorno. Estas medidas tienen muchos inconvenientes ya que el contaminante se transfiere de un medio a otro, no se elimina; no originan cambio que produzcan mejoras ambientales; tienen coste, no promueven el ahorro de recursos y se dirigen a empresas en forma individual.

Posteriormente apareció el concepto de producción más limpia (UNEP/IE, 2011). Este concepto supuso un fuerte avance ya que implica la modificación de los procesos productivos para producir menos residuos o que estos sean menos contaminantes. Pero sigue siendo un enfoque aplicado a empresas de forma individual.

La EI da un paso que supone un cambio de concepción: el sistema industrial es visto como un ecosistema, donde la actividad industrial está relacionada con el entorno y el medio social (Jelinski et al., 1992) y donde se engloba en sistema industrial a algunos sistemas humanos: agricultura, transporte, producción, etc.

La EI, como realidad práctica, es relativamente nueva (Erkman, 1997). Aun cuando en algunos países de Europa surgieron las primeras experiencias en los años 70 y algunas voces en Europa y América hablaban de esta temática, no se empezó a desarrollar ampliamente hasta los años 90. En 1989 se publicó el primer artículo que habla de ecosistemas industriales (Frosch y Gallopoulos, 1989). En 1997 se creó la primera revista de EI, *Journal of Industrial Ecology*. También en ese año se celebró en Barcelona (España) el Barcelona el 1r Congreso Europeo de Ecología Industrial, dentro de la Feria de Ecomed-Pollutec y organizado por el Instituto Químico de Sarriá. En 2001 se constituyó la Sociedad Internacional de Ecología Industrial (ISIE) y se celebró el primer congreso internacional de EI organizado por esta entidad.

Algunos de los ejemplos que han dado lugar a la ecología industrial empezaron hace unos 35 años en Europa (Kalundborg, Styria), posteriormente, en los años 90 se desarrollaron en América (Brownsville y Midlohan en Tejas, Estados Unidos de América; Tampico en Tamaulipas, México; Montreal en Canadá etc.) y en Asia y Australia surgieron más tarde, especialmente a final de la década de los 90 y a principios del 2000 (NEDA en China-, Naroda en India-, Ulsan en Korea, Bugangan Baru en Indonesia- etc.).

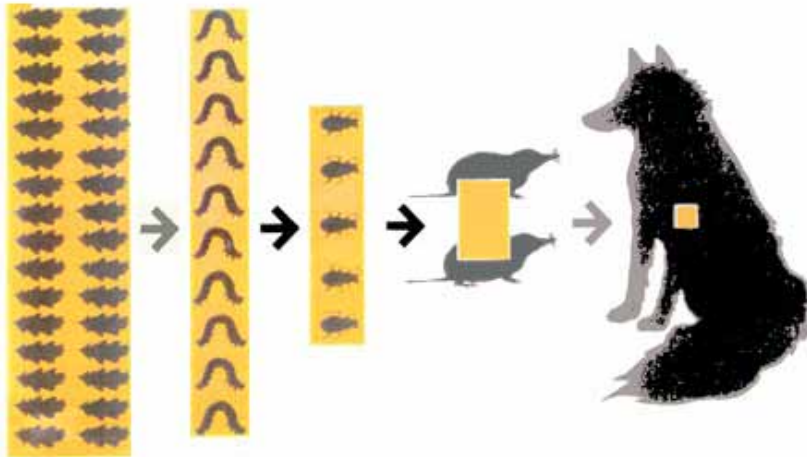


Figura 1. Disipación de energía al pasar de un eslabón a otro en una cadena trófica. Los rectángulos amarillos representan la energía contenida en los materiales. La materia indicada es la que necesita el siguiente eslabón para alimentarse. Fuente: British Museum, 1982

A nivel educativo, los primeros títulos en EI surgieron en universidades de Holanda, de Noruega y de algunos estados de los Estados Unidos de América, aunque posteriormente los estudios de EI se han extendido en muchos países de Europa, América, Asia y Oceanía. A nivel de políticas públicas, se introdujo por primera vez en Japón, posteriormente en China, a través de la política de la economía circular, en el año 2000; en 2003 en el Reino Unido y a finales de los 2000, en Tailandia, Corea y Holanda.

En México la primera experiencia se desarrolló en Tampico, en 1997, a partir del proyecto “Sinergia de subproductos” promovido por el Bussiness Council for Sustainable Development-Gulf of México y por AISTAC (Asociación de Industriales del Sur de Tamaulipas) y más tarde la EI fue promovida por la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco y por el Instituto Politécnico Nacional tanto a nivel de desarrollo de proyectos como en la formación.

### 3. La ecología industrial y los ecosistemas naturales

Si observamos el funcionamiento de un ecosistema natural maduro en equilibrio descubrimos algunos rasgos que nos pueden ayudar a comprender a los ecosistemas industriales (Margalef, 1985): existen diferentes eslabones en la cadena trófica (herbívoros, consumidores primarios, descomponedores, etc.) y estos eslabones no forman parte de una cadena lineal, ni de un círculo perfecto,



sino de una red de interrelaciones que tiende a cerrar los ciclos materiales; en el paso de materia de un nivel trófico a otro se disipa mucha energía, y por tanto nunca hay muchos eslabones en una cadena trófica (Figura 1); la mayoría de residuos pueden considerarse como subproductos que pueden ser usados por otras especies como recurso; la mayor parte de la energía de un ecosistema se consume en los procesos que llevan a cabo los descomponedores para permitir el cierre de ciclo; la única fuente de energía en un ecosistema en equilibrio es la energía solar; los ecosistemas en equilibrio consiguen una gran ecoeficiencia, interrelación y especialización, pero al mismo tiempo son muy frágiles; muchas interrelaciones se rigen por la colaboración y autoorganización; es necesario mucho tiempo para que un ecosistema evolucione hasta el estado de madurez o equilibrio.

Pero la misma naturaleza muestra que el estado de equilibrio es casi imposible de conseguir. En el Planeta Tierra estamos rodeados de residuos de la naturaleza, no asimilados por el propio Planeta, como son los combustibles fósiles y la piedra caliza entre otros (Jensen 2011).

Por analogía de este funcionamiento, en los ecosistemas industriales sabemos que no podremos llegar a un estado de cierre de ciclo completo y que no se puede reaprovechar indefinidamente un residuo en sucesivas valorizaciones, ya que cada vez su contenido energético es menor, y por tanto sería necesario aportar mucha energía externa y se encarecería el proceso. También por tanto es importante considerar que si se quiere tender a cerrar el ciclo de materia es necesario invertir en energía.

También se observa que si se desea construir un sistema ecoindustrial no es suficiente establecer relaciones lineales, sino que es necesario construir una red de intercambio y relaciones. De igual manera que para las especies, la clave del éxito de su adaptación es conseguir una mezcla de biodiversidad, flexibilidad y relaciones entre especies, para la adaptación y consolidación de un ecosistema industrial se deberá establecer una red de relaciones e intercambios, contar con industrias y/o entidades de diferentes sectores y ser flexibles en las relaciones productivas establecidas. Esto supone para el sistema industrial (entendido en el sentido amplio de actividades humanas) mantener un equilibrio entre la cooperación y la competición. También es necesario considerar que para obtener un alto nivel de intercambios la clave está en tener un gran número de entidades que puedan intercambiar (Erkman 2003).

## **4. El desarrollo de la EI en diferentes continentes**

### **4.1 En América**

Hay un gran número de ecosistemas industriales en América del Norte y alguno en América Central. En Canadá y Estados Unidos de América, la presencia de suelo libre permitió el desarrollo de nuevos ecosistemas industriales (Lowe 1998).



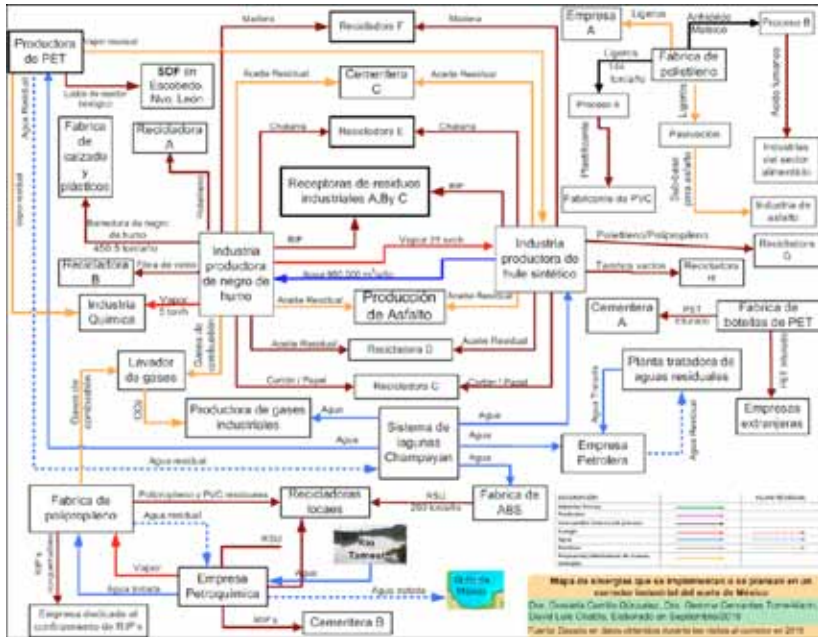


Figura 2. Sinergia de subproductos en el corredor industrial Tampico-Altamira (Tamaulipas) en 2010. Fuente: Elaboración del autor en base a visitas al corredor

Los más importantes son en Canadá: Burnside, en Halifax, Nova Scotia; The Bruce Energy Centre, en Tiverton, Ontario; Baix Richelieu, en Quebec; Calgary, en Alberta. En Estados Unidos destacan: la comunidad ecoindustrial de Devens, en Massachussets; Brownsville Eco- Industrial Park, en Brownsville, Texas; Chaparral Steel en Midlohian, Texas; Port of Cap Charles Sustainable Technologies Industrial Park, en Cape Charles, Virginia; Londonderry Ecological Industrial Park, en Londonderry, New Hampshire; Barceloneta, Puerto Rico (Indigodev, 2011).

También, bajo el nombre de sinergia de subproductos (By-product synergy) (BSD Global, 2010) se desarrollaron en el corredor industrial de Tampico-Altamira, (Tamaulipas, México) (BCSDGM, 1997) (BCSDGM, 1999), en Midlohian (Texas, US) y en otros lugares del mundo experiencias de intercambios de subproductos y residuos con la idea de tender a un ciclo cerrado de materia. Estos tipos de experiencias están incluidas dentro del área de la ecología industrial. Las claves del éxito de esta experiencia fueron: el apoyo del World Bussiness Council for Sustainable Development (BCSD, 2010), la existencia de la Asociación de Industriales del Sur de Tamaulipas (AISTAC), que aglutinaba a la mayoría de las empresas y la confianza que se llegó a crear entre los participantes en la experiencia. Los intercambios entre estas empresas continúan hasta el día de hoy, pero de manera dinámica, con sinergias que se crean y otras que desaparecen, tal como pasa en los sistemas vivos.



con empresas y también en proyectos de investigación con financiación externa (CONACYT, Unión Europea, ICYT-DF, etc.). En la Figura 3 se puede observar el diagrama del ecosistema industrial “Granja Orgánica Xochimancas”, fruto de un estudio del grupo GIEI (Cervantes, 2008). Esta granja se estudió como si fuera un sistema ecoindustrial, donde cada entidad de la granja era una industria. Esto permitió definir la sinergias existentes dentro de la granja y proponer nuevas, tal como se muestra en el diagrama.

También CONCAMIN, a través del Programa NISP (National Industrial Symbiosis Programme) inició en 2008 el Programa NISP-México, que estableció en dos años más de treinta sinergias entre industrias en una zona industrial de Lerma, Toluca (Edo.México) (NISP, 2011).

En agosto de 2010 tuvo lugar en Celaya el primer congreso en México que incorporó una mesa específica de EI. También en esa fecha se creó la Red Mexicana de Ecología Industrial (REMEI) que agrupa a centros universitarios, industrias y asociaciones industriales de diferentes entidades federativas de la República y que tiene como objetivo difundir la EI y promover proyectos y acciones de EI en México. Actualmente está coordinada por el grupo GIEI del IPN (GIEI, 2011).

## **4.2 En Asia**

La EI en Asia empezó a desarrollarse un poco más tarde que en otros continentes, a mediados de los años 90. Se inicio y desarrolló a una gran velocidad ya que se encontraron con industria con tecnología bastante obsoleta, que generaba muchos residuos. En esta situación, la simbiosis industrial (el uso de residuos como materia prima de otras industrias) supuso una solución rápida, económica y con muchas ventajas ambientales, mientras se iba desarrollando la innovación tecnológica. Otro factor muy importante para su rápido desarrollo fue, posteriormente la adopción de políticas nacionales que incorporaban la EI o la SI. Primero se dio esta circunstancia en China con la adopción de la economía circular como política nacional. Posteriormente en Japón con las Ecociudades (“Eco-Towns”) y más recientemente en Corea, donde se incorporaron los Parques Ecoindustriales como política nacional. En Corea incluso se creó en 2010 la Sociedad Coreana de EI. En China existen más de 50 parques ecoindustriales y en Corea entre 30 y 40. Otros países en los que está muy desarrollada la ecología industrial son Tailandia e India.

Un ejemplo interesante es el de Naroda, en India (UNEPIE, 2010). Este polígono industrial, de 900 empresas, coordinado por la Naroda Industries Association (NIA), la asociación de polígonos industriales de Naroda, está implantando varias medidas medioambientales, entre las que destaca el proyecto de trabajo en red ecoindustrial (Eco-industrial Networking), en colaboración con algunas universidades. También hay ejemplos ecoindustriales en Indonesia (Bugangan Baru, Semarang, entre otros), en Tailandia, en Corea, Japón y otros países.



### 4.3 En Europa

Hay algunas experiencias de EI en Europa, sin embargo, no tantas como se podría esperar, teniendo en cuenta que las primeras experiencias de EI surgieron en este continente en los años 70. La más importante es la de Kalundborg (Dinamarca) que nació al azar y posteriormente se convirtió en una de las experiencias más completas de simbiosis industrial a nivel mundial. También hay una red de reciclaje de subproductos en Styria (Austria) (Styrian Recycling System, 2010), surgida en los años 80 que incluye a industrias papeleras, cementeras, siderurgias, textiles, productoras de energía, etc. Otras experiencias europeas de EI o SI son: Turku y Jyväskylä, en Finlandia; Chamuska, en Portugal; el Progetto Closed (ARPAT 2010) en la región de la Toscana -Italia, Ora Ecopark, en Fredrikstad -Noruega, Herring-lkast Ecological Bussiness Park Project, en Dinamarca (Herring-lkast, 2010), proyectos ECOSIND (ECOSIND, 2010), MESVAL (MESVAL, 2010), MECOSIND y Cicle, en Cataluña -España-, etc.

En la Figura 4 puede observarse el ejemplo de simbiosis industrial de Kalundborg (Dinamarca), tal como estaba en el año 2001. Este es un ecosistema industrial centrado especialmente en empresas termoeléctricas, refinería de petróleo, empresas biotecnológicas, cementeras y mineras, entre otras empresas.

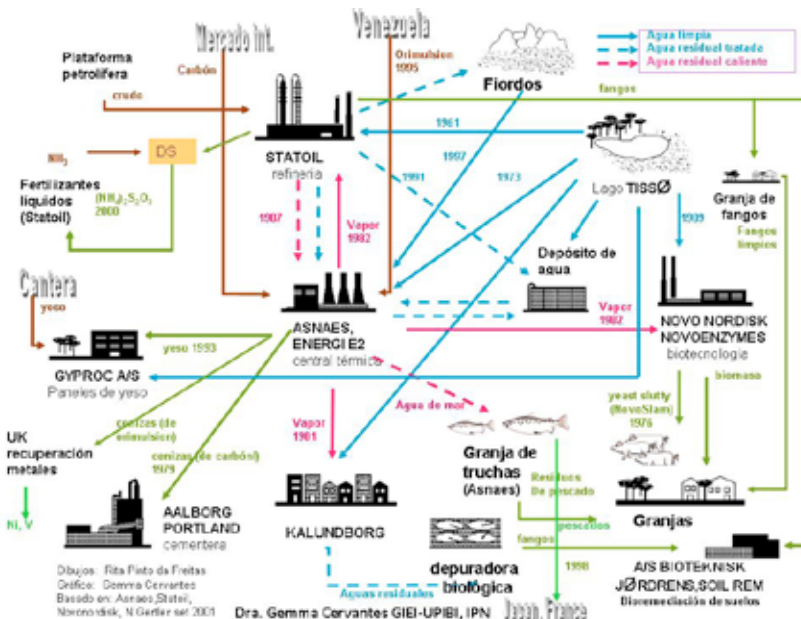


Figura 4. Simbiosis industrial en Kalundborg (Dinamarca) en 2001. Fuente: Elaboración del autor en base a Ehrenfeld y Gertler (1997) y a visitas a la simbiosis

Algunas de las sinergias que se producían en Kalundborg en 2001 son:

- La empresa Novozymes produce enzimas a partir de harina de patata y de maíz. La biomasa residual es usada por más de 600 agricultores como fertilizante para los campos, lo que ha reducido casi en su totalidad el uso de fertilizantes químicos en la región en la que se encuentra la empresa.
- La empresa biotecnológica Novo Nordisk A/S produce insulina a partir de azúcares y levaduras, la biomasa residual de la levadura se utiliza como alimento para ganado porcino sustituyendo en un 70% la proteína utilizada en el alimento para ganado porcino. En el año 2008 800,000 cabezas de ganado porcino fueron alimentados con este alimento de biomasa residual.
- El agua residual de Novozymes es depurada en una planta de tratamiento propia hasta que alcanza los parámetros adecuados para ser enviada a la planta de tratamiento municipal. La temperatura del agua es considerablemente alta lo que favorece el tratamiento posterior.
- El vapor proveniente de la central térmica ASNAES-Energy E2 es transportado a través de tuberías a las empresas Novo Nordisk A/S y Novozymes A/S, que lo utilizan para calentar los medios de reacción y para esterilizar.
- El vapor de la central térmica es también utilizado por las 4500 casas del municipio como calefacción. Este vapor es transportado por tuberías que fueron financiadas en un 50% por Asnaes y en un 50% por el municipio de Kalundborg. Cuando cada vecino se conecta al sistema de calefacción paga la parte proporcional correspondiente al municipio. El vapor también calienta los tanques de la refinería de petróleo Statoil, donde se desarrolla el cracking. Este vapor cubre el 15% de las necesidades de vapor de la refinería.
- El agua salada de los procesos de refrigeración alimenta una granja de truchas de mar y de salmón que produce 200 toneladas de estos peces al año. También toman aguas usadas procedentes de otras industrias y las utilizan en procesos de limpieza de instalaciones.
- El dióxido de azufre emitido es combinado con piedra caliza (carbonato de calcio) y se obtienen yeso (sulfato de calcio) que es vendido a BPB Gyproc A/S (200.000 ton/año), una empresa de producción de paneles de yeso.
- Las cenizas de la térmica (80.000 ton) son aprovechadas por una cementera para la fabricación de cemento y otros productos (si proceden del carbón) o son llevadas para la extracción de níquel y vanadio (si proceden de la orimulsion).

La simbiosis industrial en Kalundborg ha evolucionado en muchos sentidos. Por un lado los intercambios están en continuo cambio, a veces por la aparición o desaparición de empresas y otras veces por la reconversión de procesos (Jacobsen 2006). Por otro lado el Instituto para la Ecología Industrial (anteriormente Instituto de Simbiosis industrial) (Symbiosis Institute, 2010), que coordina la simbiosis, ha

ido llevando la simbiosis industrial hacia un sistema de ecología industrial que incluye medidas ambientales y sociales, pudiendo decir actualmente que éste es un ejemplo de EI.

Recientemente se instaló una planta de producción de etanol que establece sinergias de aprovechamiento térmico (vapor y agua caliente) con las empresas circundantes. Cada año se establece alguna nueva sinergia y hay otras que desaparecen. El sistema está en continua evolución, lo cual manifiesta su similitud con los ecosistemas naturales.

#### **4.4. En Oceanía**

A pesar de que hay pocas experiencias de EI en Oceanía, las que existen van creciendo. El ejemplo más relevante es el del Parque ecoindustrial de Kwinana en Australia (Van Beers et al., 2005), un ejemplo extenso de simbiosis industrial en una zona minera de Australia, iniciado en 2004 y llevado a cabo por el Centre for Sustainable Resource Processing (CSRP) de la Curtin University of Technology.

### **5. Herramientas y Métodos de la Ecología Industrial**

La ecología industrial no se limita sólo a los métodos de cierre de ciclo, también denominados simbiosis industrial y metabolismo industrial (Ayres, 2001), sino que se sirve de otros muchos métodos que contribuyan a disminuir el impacto ambiental, mejorar la ecoeficiencia y aumentar la rentabilidad, siempre tendiendo hacia un mayor desarrollo sostenible. Por tanto, en el estudio o la implantación de un ecosistema industrial se pueden usar métodos y herramientas como el análisis de ciclo de vida, la producción más limpia, el análisis de flujo de materia, el análisis económico-ambiental, la ecoeficiencia, los indicadores de desarrollo sostenible, las bolsas de residuos o subproductos, la huella de carbono y huella ecológica, análisis de redes sociales, etc., pero teniendo en cuenta que aquello más específico de la ecología industrial es crear una red de industrias, vinculadas por sus residuos y a la vez relacionadas con el entorno social y natural.

A continuación se describen algunos de los métodos usados por la EI.

#### **5.1 Análisis de Ciclo de Vida (ACV)**

El ACV es un método que analiza todos los impactos ambientales de un producto o servicios “desde la cuna hasta la tumba”, o sea desde que son extraídas las materias primas para producirlo hasta que son dispuestos los residuos posteriores a su utilización (Guinée et al., 2001). Por tanto en un ACV se analizarán las cargas ambientales de los procesos de extracción de materias primas, producción de los componentes, ensamblaje, uso del producto o servicio, mantenimiento y disposición final.

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

La metodología ACV está estandarizada a través de las normas ISO 14040. También la Iniciativa de Ciclo de Vida de la UNEP/SETAC ha trabajado en el desarrollo y diseminación de una metodología estandarizada para el ACV (UNEP 2010).

## **5.2 Análisis de Flujos de materia (AFM)**

El AFM es un término que agrupa los métodos bulk-AFM y Análisis de Flujo de Sustancias (AFS). Bulk-AFM es un método para identificar todos los flujos materiales relacionados con todos los procesos de un sistema determinado. Estos flujos incluyen materias primas, productos, residuos y contaminación que entre y salga del sistema. Por tanto este método nos da una visión comprensiva del metabolismo del sistema, no sólo de los flujos de entrada y salida, sino también de las acumulaciones.

El AFS no analiza un sistema entero, sino que se centra solo en una sustancia o grupo de sustancias, incluyendo todos los procesos en los cuales la sustancia entra o sale.

## **5.3 Producción más Limpia (P+L)**

La P+L es una estrategia que estableció el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (en su Departamento de Transporte, Industria y Medio Ambiente) que pretende cambiar los sistemas de producción para generar menos residuos o residuos menos contaminantes. Este método ayuda a descubrir oportunidades de optimización. Suele trabajar con compañías en forma individual y puede enfocarse a los productos, procesos o servicios.

Este mismo programa fomentó la creación de los Centros Nacionales para la Producción más Limpia en distintos países del mundo. En México existe uno ligado al Instituto Politécnico Nacional (CMPML, 2011).

## **5.4 Indicadores de Desarrollo Sostenible (DS)**

Para conocer en qué grado de avance respecto al DS se encuentran los ecosistemas industriales es necesario cuantificar y poder medir este avance. Los sistemas de indicadores de DS son una herramienta importante para poder medir este grado de avance. Existen muchos sistemas de indicadores de DS creados por entidades internacionales y nacionales para ciudades, regiones y países (UN-CSD, 2010) (UPC, 2011), pero muy pocos para evaluar procesos o sistemas más reducidos. El proyecto europeo MESVAL (MESVAL, 2010) y el Grupo de Investigación en ecología industrial del IPN crearon un sistema de indicadores de DS para evaluar la sustentabilidad global de un ecosistema industrial y también





para comparar el grado de DS de dos valorizaciones distintas de un mismo residuo. El sistema de indicadores está construido en base a objetivos de DS en las áreas social, económica y ambiental. Para el diseño de indicadores se determinan primero los objetivos de sustentabilidad, posteriormente los temas y finalmente los indicadores. De esta manera al calcular los indicadores para un ecosistema industrial se puede comprobar el comportamiento de estos sistemas en cuanto a diferentes criterios y objetivos del DS.

El dinamismo propio de la EI provoca que cada vez se vayan aplicando nuevas herramientas y metodologías, tales como: cálculo de huella de carbono, estudio de sistemas complejos, metodología de redes sociales, estudio de escenarios, etc.

## **6. Estrategias para la Implementación de la Ecología Industrial**

Una posibilidad para la implementación de la EI es la conversión de un polígono industrial existente en un parque ecoindustrial (Bourg y Erkman, 2003). Esto puede hacerse estudiando los flujos materiales, energéticos y de información en el polígono y fomentando entre las empresas el establecimiento de sinergias. Estas sinergias pueden ser de diferentes tipos:

- Aprovechamiento de residuos de una empresa como materia prima de otra;
- Utilización o establecimiento conjunto de una infraestructura y
- Utilización de un servicio conjunto.

Otra posibilidad de implementación es la planificación desde el inicio de un parque ecoindustrial y su creación posterior. En este caso se planifica previamente qué empresas deben establecerse, qué incentivos fiscales o de otro tipo pueden ofrecerse a las empresas y qué sinergias se van a dar entre ellas (Cohen-Rosenthal y Musnikov, 2003).

Como los polígonos industriales suelen depender de las entidades gubernamentales locales o estatales, es muy importante el establecimiento de relaciones de colaboración entre estas entidades y los/as correspondientes agentes asesores de ecología industrial.

Para el completo desarrollo de la ecología industrial es necesario establecer colaboraciones entre entidades gubernamentales, ya sean federales, estatales o locales con las asociaciones industriales y las universidades o centros de investigación. También es necesario difundir el concepto entre las empresas y entidades para que conozcan todos los beneficios económicos, ambientales y sociales que esta comporta. Otra estrategia muy importante es el fomento de la educación en ecología industrial, en escuelas y universidades, para formar a los futuros agentes que desarrollarán la EI en el país (UPC, 2010) (UAB, 2010) (NTNU, 2010) (TUDelft, 2010).



## **6.1 La Ecología Industrial y la Innovación**

La ecología industrial promueve la innovación en sistemas industriales a través de un cambio de concepción, donde el límite no está en la propia empresa sino donde se crea una red de colaboración y negocio con otras empresas, con entidades gubernamentales y con el ecosistema natural. Esta visión global y de colaboración promueve la creación de redes y éstas a su vez fomentan nuevas visiones, nuevas prácticas. También porque en la creación de redes ecoindustriales no se limita a la visión de los flujos materiales y energéticos, sino que toma en consideración las relaciones sociales de diferentes tipos, formando así una red ecoindustrial completa.

También fomenta la innovación en la consideración de los residuos como una materia prima. Esta visión promueve la creación de nuevos procesos y sistemas para valorizar los residuos y también incluye la búsqueda de procesos más eficientes para disminuir el consumo de recursos. Son aspectos que fomentan la innovación tecnológica como método para promover la eficiencia en el uso de energía, aumentar la intensidad de los materiales y buscar la ecoeficiencia.

## **7. Conclusión**

La ecología industrial, como área de conocimiento, es relativamente nueva pero se está desarrollando de forma acelerada en todo el mundo, especialmente en Asia. Los ecosistemas industriales surgen como analogía a los ecosistemas naturales, aunque en su funcionamiento distan mucho de ellos. Sin embargo esta analogía aporta a la ecología industrial elementos que la potencian hacia un desarrollo sostenible y hacia la ecoeficiencia. La creación de redes y la visión sistémica son aportes muy significativos de la ecología industrial a los sistemas industriales tradicionales. La ecología industrial utiliza diferentes herramientas, especialmente aquellas que favorecen la interrelación entre industrias. También promueve la innovación por el cambio de enfoque de la empresa individual a la mirada sistémica.

## 8. Referencias Bibliográficas

**AGSEO**, [http://dcsh.xoc.uam.mx/produccioneconomica/AGSEO/pagina\\_AGSEO/Index.htm](http://dcsh.xoc.uam.mx/produccioneconomica/AGSEO/pagina_AGSEO/Index.htm), consultado el 12 de noviembre de 2010

**ARPAT**, [http://www.arpato.toscana.it/progetti/pr\\_closed.html](http://www.arpato.toscana.it/progetti/pr_closed.html), consultado el 3 de diciembre de 2010

**Ayres, R.U.; Ayres, L.W.** (2001). *A Handbook of Industrial Ecology*. Northampton: Edward Elgar Pub.

**BCSD**, Business Council for Sustainable Development, <http://www.usbcd.org/>, consultado el 12 de noviembre de 2010

**BCSDGM**, Business Council for Sustainable Development- Gulf of Mexico (1999), *By-Product Synergy: a Demonstration Project*, Tampico, México, consultado el 16 de agosto de 2010, disponible en: [http://www.hatch.ca/Sustainable\\_Development/Articles/Tampico%20\\_BPS.pdf](http://www.hatch.ca/Sustainable_Development/Articles/Tampico%20_BPS.pdf)

**BCSDGM**, Business Council for Sustainable Development- Gulf of Mexico (1997) *By-Product Synergy: a Strategy for Sustainable Development. A Primer*, consultado el 16 de agosto de 2010, disponible en: <http://www.smartgrowth.org/pdf/byprod.pdf>

**Bey, C.** (2001), "Quo Vadis Industrial Ecology?" *Greener Management International* 34, p.35-42

**Bourg, D. y S. Erkman** (eds.) (2003). *Perspectives on Industrial Ecology*. Sheffield: Greenleaf Publishing.

**British Museum.** (1982) *La natura en acció. Introducció a l'ecologia*. Barcelona: Ketres ed.

**BSD Global**, [http://www.bsdglob.com/tools/principles\\_factor.asp](http://www.bsdglob.com/tools/principles_factor.asp), consultado el 15 de diciembre de 2010

**Cervantes, G.** (2007). *Ecología Industrial*. Barcelona: Fundació Pi i Sunyer.

**Cervantes, G.** (2007), "A methodology for teaching industrial ecology" *International Journal of Sustainability in Higher Education*, 8, p. 131-141

**Cervantes, G., F. Robles, MC. Calixto, G. Rodríguez, D. Sosa** (2008), *Applying industrial ecology in an organic farm*, Ponencia presentada en el 3rd International Meeting on Environmental Biotechnology and Engineering, Palma de Mallorca, España, septiembre.

**Cervantes, G., R. D. Sosa, G. Rodríguez, F. Robles** (2009) "Ecología Industrial y Desarrollo Sostenible", *Ingeniería (Revista Académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán)*, 13 (1), p. 63-70.

**CMPML**, Centro Mexicano para la Producción más Limpia, <http://www.cmpl.ipn.mx>, consultado el 10 de enero de 2011

**Cohen-Rosenthal, E., J. Musnikow.** (2003). *Eco-industrial Strategies. Unleashing Synergy Between Economic Development and the Environment.* Sheffield: Greenleaf Publishing.

**Ehrenfeld, J. and N. Gertler.** (1997). "Industrial Ecology in Practice: The Evolution of

Interdependence at Kalundborg." *Journal of Industrial Ecology.* 1, p. 67-79

**Ehrenfeld, J.** (2004) "Can Industrial Ecology be the Science of Sustainability?" *Journal of Industrial Ecology* 8, p. 1-3.

**ECOSIND,** <http://www.ecosind.net>, consultado el 14 de diciembre de 2010

**Erkman, S.** (1997). "Industrial Ecology: an historical view", *J.Cleaner Prod.*, 5, p. 1-10

**Erkman, S.** (2001). "Industrial Ecology: a new perspective on the future of the industrial system" *Swiss Med. Wkly*, 131, p. 531-538

**Erkman, S., R. Ramaswamy.** (2003). *Applied Industrial Ecology: A New Platform for Planning Sustainable Societies.* India: Aicra, cop.

**Frosch R.A., N.E. Gallopoulos.** (1989). "Strategies for Manufacturing: Waste from one Industrial Process can Serve as the Raw Materials for Another, Thereby Reducing the Impact of Industry on the Environment" *Scientific American*, 261, pp. 94-102.

**GIEI,** Grupo de Investigación en Ecología Industrial, <http://www.giei.org>, consultado el 1 de diciembre de 2010

**GIEI,** Grupo de Investigación en Ecología Industrial, [gieiupibi.wordpress.com](http://gieiupibi.wordpress.com), consultado el 10 de enero de 2011

**Guinée, J. B., M. Gorrée, R. Heijungs, et al.** (2001), *LCA - An operational guide to the ISO-standards. LCA in perspective*, consultado el 3 de mayo de 2006, disponible en: <http://www.leidenuniv.nl/cml/>

**Herning-Ikast,** <http://www.eaue.de/winuwd/118.htm>, consultado el 14 de diciembre de 2010

**Indigo Development,** <http://www.indigodev.com/IE.html>, consultado el 10 de enero de 2011

**ISIE,** International Society for Industrial Ecology, <http://www.is4ie.org/> consultado el 3 de diciembre de 2010

**ISIE 2011 Conference,** <http://isie2011.berkeley.edu/>, consultado el 3 de febrero de 2011

- Jacobsen, N.B.** (2006). "Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark: A Quantitative Assessment of Economic and Environmental Aspects", *Journal of Industrial Ecology*, 10, pp. 239-255.
- Jelinski, L., T. Graedel, R. Laudise, D. McCall, K. Patel** (1992). "Industrial Ecology: concepts and approaches", *Proc. Nati. Acad. Sci. USA*, 89, pp. 793-797.
- Jensen, P., L. Basson, M. Leach** (2011), "Reinterpreting Industrial Ecology" *Journal of Industrial Ecology* 15, p. 680-692.
- Lowe, E. A., J. L. Warren, S. R. Moran.** (1997). *Discovering Industrial Ecology*. Columbus: Battelle Press.
- Lowe, E. A., S. R. Moran, D. B. Holms.** (1998). *Eco-industrial Parks: a Handbook for Local Development Teams*. Emeryville, CA: RPP International.
- Margalef R.** (1985). *La Ecología*. Barcelona: Diputació de Barcelona.
- MESVAL Proyecto**, <http://www.cimne.com/mesvall>, consultado el 7 de diciembre de 2010
- NISP México**, <http://www.nisp.org.mx/> consultado el 3 de febrero de 2011
- NTNU**, Indecol, <http://www.indecol.ntnu.no/>, consultado el 1 de diciembre de 2010
- Spiegelman, J.** (2003), "Beyond the food web: connections to a deeper industrial ecology" *Journal of Industrial Ecology* 7, p.17-23
- Symbiosis Institute**, <http://www.symbiosis.dk/>, consultado el 10 de diciembre de 2010
- Styrian Recycling-System**, <http://www.classic.uni-graz.at/inmwww/styria.html>, consultado el 7 de diciembre de 2010
- TU Delft**, <http://ie.leidendelft.nl/>, consultado el 12 de diciembre de 2010
- UAB**, Universidad Autónoma de Barcelona, [http://www.uab.es/servlet/Satellite?c\\_id=1096480309783&pagename=UAB%2FPage%2FTemplatePageDetailEstudisPOP&param1=1096480176135&param2=1](http://www.uab.es/servlet/Satellite?c_id=1096480309783&pagename=UAB%2FPage%2FTemplatePageDetailEstudisPOP&param1=1096480176135&param2=1), consultado el 1 de diciembre de 2010
- UN-CSD Center for Sustainable Development**, [www.un.org/esa/sustdev/natinfo/](http://www.un.org/esa/sustdev/natinfo/) indicators, consultado el 11 de diciembre de 2010
- UNEP** (s/f), Production and Consumption Branch, Cleaner Production. Cleaner Production Assessment in Industries. consultado el 15 de noviembre de 2010, disponible en: <http://www.unepnie.org/pc/pc/tools/cleanerproduction.htm>
- UNEPIE**, United Nations Environment Programme, Division of Technology, Industry, and Economics <http://www.unepie.org/pc/ind-estates/casestudies/Naroda.htm>, consultado el 7 de junio de 2010

**UNEP**, United Nations Environment Programme, Division of Technology, Industry, and Economics [http://www.unepie.org/Cp2/what\\_is/general\\_info.html](http://www.unepie.org/Cp2/what_is/general_info.html), consultado el 12 de enero de 2011

**UPC**, Universidad Politecnica de Cataluña, [http://www.upc.edu/master/fitxa\\_master.php?id\\_estudi=64&lang=esp&id\\_titulacio=128](http://www.upc.edu/master/fitxa_master.php?id_estudi=64&lang=esp&id_titulacio=128), consultado el 1 de diciembre de 2010

**UPC**, Portal de Sostenibilidad, <http://portalsostenibilidad.upc.edu/>, consultado el 12 de enero de 2011

**Van Beers, D., A. Bossilkov, R. Van Berkel** (2005) Capturing Regional Synergies in the Kwinana Industrial Area. 2005 Status Report, consultado el 15 de enero de 2011, disponible en [www.csrp.com.au/\\_media/.../vanBeers\\_etal\\_3B1\\_StatusReport\\_Aug05.pdf](http://www.csrp.com.au/_media/.../vanBeers_etal_3B1_StatusReport_Aug05.pdf)