



**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS  
INDUSTRIALES Y TELECOMUNICACIÓN**

**Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos**

**Tesis Doctoral**

**Diseño y modelado de parques industriales sostenibles  
mediante métodos de ecología industrial y sistemas complejos**

(Design and modeling of sustainable industrial parks  
based on methods of industrial ecology and complex systems)

**Autora**

Dña. Elena Romero Arozamena

**Directora**

Dra. Dña. María del Carmen Ruiz Puente

Santander, Junio 2014







## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi directora de tesis, por sus buenos consejos  
y gran ayuda en este camino.*

*A mis compañeros del café, por esos ratos  
tan necesarios para reponer fuerzas.*

*A mis padres, por su apoyo incondicional,  
y su confianza en creer que esto era posible.*

*A mi marido, por su comprensión,  
incombustibles ánimos y por estar ahí siempre.*

*A ti, que estás en camino.*



## RESUMEN

El modo de operación de las áreas industriales tradicionales presenta un margen de mejora ambiental y económica de gran interés para empresarios y agentes institucionales. Por lo que en esta Tesis Doctoral se plantea un cambio en el modo de operación de las áreas industriales tradicionales hacia formas más sostenibles, mediante la introducción de prácticas cooperativas apoyadas en la ecología industrial. La teoría de la ecología industrial busca imitar el funcionamiento de los ecosistemas naturales para alcanzar modelos más eficientes y compatibles con su entorno mediante actividades que cierran las cadenas lineales de producción-consumo. Entre éstas se encuentran los procesos de simbiosis industrial, cuya estrategia principal consiste en el intercambio de residuos y subproductos entre las empresas, reduciendo así el consumo de recursos naturales y la generación de residuos. Sin embargo, la introducción de las estrategias cooperativas propuestas por la ecología industrial intensifica las relaciones de las empresas y hace que la operación del sistema industrial sea más compleja e impredecible. Las características socio-técnicas del sistema dificultan el proceso de transición hacia modelos de operación más sostenibles, por lo que es necesario desarrollar herramientas de simulación y apoyo para la implementación de estas prácticas. De esta manera se pueden anticipar y demostrar las oportunidades de colaboración entre empresas y los beneficios potenciales ante diferentes escenarios.

En esta Tesis se propone un modelo desarrollado hasta el nivel computacional para apoyar el proceso de transformación de áreas industriales tradicionales hacia modelos más sostenibles. Para el desarrollo de la herramienta se ha seguido la metodología de modelado de sistemas complejos según las características del sistema de estudio. El proceso de modelado comienza con la abstracción del modelo de operación de referencia, el parque eco-industrial. El modelo conceptual se encarga de

esbozar las propiedades del sistema real que deben ser representadas: motivación teórica y puesta en práctica de los principios de la ecología industrial, estabilidad del sistema en el tiempo, confianza en las relaciones cooperativas y adaptabilidad a los cambios internos y externos. Estas premisas planteadas en el modelo conceptual son formalizadas analíticamente mediante el paradigma de modelado basado en agentes. El modelado basado en agentes se elige frente a la dinámica de sistemas y modelos híbridos por su idoneidad para representar la naturaleza técnica y social de las empresas que forman el sistema industrial. La formalización analítica se codifica e implementa computacionalmente. La simulación del modelo computacional basado en agentes se verifica y valida con la experiencia real de simbiosis industrial de Kalundborg (Dinamarca). Los resultados obtenidos muestran la aptitud del modelo para detectar las posibilidades de cooperación y reproducir el comportamiento de un parque eco-industrial. Esta validación de la herramienta demuestra, por tanto, la viabilidad de la misma para guiar la conversión de los patrones tradicionales de operación hacia modelos más sostenibles. Finalmente, el modelo computacional se aplica a un caso de estudio analizado en la Comunidad Autónoma de Cantabria que comprende once áreas industriales. La simulación permite desvelar nuevas oportunidades de simbiosis industrial inter-zonal que complementan las propuestas identificadas en el estudio analítico y que de otra manera hubieran quedado ocultas.

Como resultados de esta Tesis Doctoral se han elaborado tres artículos de investigación. Dos artículos ya publicados en las revistas *Journal of Industrial Ecology* y *Science of the Total Environment*, ambas de impacto internacional e indexadas en el *Journal of Citation Reports-Science Edition (JCR-SCE)*. Así como un tercero que actualmente se encuentra en proceso de revisión en la revista también de impacto internacional *Journal of Cleaner Production*.



## **SUMMARY**

The operation of the traditional industrial areas shows a great potential on environmental and economic improvement for entrepreneurs and institutions. Therefore, this Dissertation suggests a substantial change in the traditional operation of industrial areas towards a more sustainable mode based on the development of cooperative relationships supported by the Industrial Ecology premises. The theory of Industrial Ecology proposes to mirror natural ecosystems in order to achieve more friendly environmental models for technical systems by closing the linear chains of production and consumption through the development of cooperative practices. Thus, the key strategies to be implemented are based on the field of Industrial Symbiosis, through the exchanges of wastes and byproducts among companies, reducing the natural resources consumption and wastes generation. Nonetheless, the introduction of these cooperative strategies intensifies the companies' relationships and causes a more complex and unpredictable operation. These socio-technical particularities complicate the implementation of these sustainable models, so it is necessary to design new tools capable of demonstrate the cooperative opportunities and the potential benefits which might be obtained.

This Dissertation proposes a model developed into computational tool to support the transformation process of the traditional operation of industrial areas towards more sustainable models. The methodology follows the modeling process of complex systems according to the characteristics of the real system to study. The modeling process begins with the conceptualization of the reference model, the eco-industrial park. The conceptual model outlines the properties of the real system that should be represented: theoretical motivation and implementation of the Industrial Ecology principles, system's stability on time, trust on cooperative relationships, and adaptability to internal and external changes. Then, the premises suggested on the

conceptual model are analytically formalized through the agent-based modeling paradigm. The agent-based model is chosen instead of system dynamics and hybrid models due to its adequacy to represent the socio-technical nature of the companies that forms the industrial system. The analytical formalization is straightaway codified and computationally implemented. The simulation of the computational agent-based model is verified and validated using the data of a real experience of industrial symbiosis, Kalundborg (Denmark). The results obtained show the model's aptitude to detect the cooperative possibilities and reproduce the behavior of an eco-industrial park. Therefore, the validation of the model demonstrates its viability to guide the conversion of traditional operative patterns towards more sustainable practices. Finally, the computational model is applied to a case study analyzed in the region of Cantabria, which gathers eleven industrial areas. The simulation reveals new opportunities of industrial symbiosis inter-area and complements the proposals identified in the analytical study which otherwise would be hidden.

As result of this thesis, three research papers have been elaborated. Two of them have been published on the journals *Journal of Industrial Ecology* and *Science of the Total Environment*, both included in the *Journal Citation Reports of Science Citation Index* (JCR-SCI). Furthermore, a third is currently in reviewing process in the journal of international impact *Journal of Cleaner Production*.

# ÍNDICE

---

RESUMEN .....	I
SUMMARY .....	III
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Marco de la Tesis.....	3
1.2. Objetivos.....	8
1.3. Preguntas de la investigación.....	10
1.4. Organización de la Tesis.....	13
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE.....	17
2.1. Modelo de operación actual de las áreas industriales .....	19
2.2. Teoría y práctica del modelo de parque eco-industrial .....	26
2.3. La complejidad de los parques eco-industriales y paradigmas de estudio .....	40
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA .....	61
3.1. Metodología aplicada.....	63
3.2. Desarrollo del modelo conceptual de parque eco-industrial .....	67
3.3. Desarrollo del modelo analítico de parque eco-industrial.....	86
3.4. Desarrollo de modelo computacional de parque eco-industrial .....	110
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	125
4.1. Verificación y validación del modelo computacional.....	127

4.2. Aplicación a un caso real .....	148
4.3. Evolución y mejoras a implementar en el modelo .....	154
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....	157
5.1. Conclusiones.....	159
5.2. Líneas futuras de investigación.....	163
5.3. Contribuciones resultantes de la Tesis Doctoral .....	166
CHAPTER 5. CONCLUSIONS .....	171
5.1. Conclusions .....	173
5.2. Future lines of research.....	176
5.3. Main contributions of the Dissertation .....	179
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	183
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	185
FUENTES WEB DE IMÁGENES .....	200
ANEXO I. PUBLICACIONES .....	201
I.1. Framework for applying a complex adaptive system approach to model the operation of eco-industrial parks.....	203
I.2. Proposal of an agent-based analytical model to convert industrial areas in industrial eco-systems .....	215
ANEXO II. ARTÍCULO EN REVISIÓN .....	229
II.1. Analysis and validation of a computational agent-based model to convert industrial areas in eco-industrial systems .....	231

---

## Índice de Figuras

---

Figura 1. Relación de las preguntas de investigación y los capítulos de la Tesis Doctoral. ....	15
Figura 2. Distribución regional de áreas industriales censadas en España (elaborado a partir de datos de CEPE 2014a).....	20
Figura 3. Deficiencias del modo de operación de las áreas industriales actuales (Fuente de imagen [1]).....	21
Figura 4. Aumento de la conectividad entre empresas y de la sostenibilidad del área mediante un enfoque colectivo -Kalundborg, Dinamarca- (Fuentes de las imágenes [2] y [3]). ....	23
Figura 5. Aproximaciones de mejora de la operación de áreas industriales sobre el prisma de la sostenibilidad. ....	25
Figura 6. Aportaciones del modelo de parque eco-industrial sobre el prisma de la sostenibilidad. ....	27
Figura 7. Red de Kalundborg 1961-1979 (Symbiosis 2014). ....	30
Figura 8. Prácticas de la ecología industrial que fomenta el cierre de ciclos.....	31
Figura 9. Simbolización de un sistema adaptativo complejo.....	41
Figura 10. Esquema básico del proceso de modelado de sistemas complejos.....	43
Figura 11. Árbol de decisión de un proceso de negociación para el intercambio de subproductos. ....	47
Figura 12. Representación del entorno como sistemas jerárquicos anidados, (a) Perspectiva de los sistemas SOHO (Kay 2002); (b) Perspectiva sobre la cadena de suministro (Bakshi y Fiksel 2003).....	48
Figura 13. Representación conceptual de las dimensiones de la complejidad en un parque eco-industrial. ....	50
Figura 14. Representación analítica de un modelo conceptual de parque eco-industrial mediante dinámica de sistemas. ....	53
Figura 15. Representación analítica de un modelo conceptual de parque eco-industrial mediante modelado basado en agentes. ....	55

Figura 16. Diferentes enfoques de modelos híbridos (Swinerd y McNaught 2012).....	57
Figura 17. Esquema simplificado-básico del proceso de modelado de sistemas complejos.....	64
Figura 18. Simbolización de un parque eco-industrial como sistema adaptativo complejo. ....	68
Figura 19. Simbolización del modelo conceptual de un parque eco-industrial. ....	69
Figura 20. Medios de representación de las propiedades del modelo conceptual.....	75
Figura 21. Entorno de sistemas jerárquicos anidados y flujos circulantes.....	81
Figura 22. Categorías de factores y subcategorías según los sistemas jerárquicos anidados del entorno. ....	82
Figura 23. Relaciones internas entre empresas y proceso de evaluación.....	85
Figura 24. Variables analíticas sobre la simbolización del modelo conceptual de parque eco- industrial. ....	89
Figura 25. Estructura de un agente del modelo analítico.....	91
Figura 26. Proceso de detección de posibles cooperaciones.....	102
Figura 27. Relaciones de dependencia y consistencia entre las propiedades del agente.....	109
Figura 28. Proceso computacional. ....	113
Figura 29. Interfaz del modelo computacional señalando los selectores de inicialización.....	116
Figura 30. Módulo de comparación de ensayos de NetLogo®. ....	117
Figura 31. Extracto de la base de conocimiento implementada en la plataforma computacional. .....	119
Figura 32. Árbol de decisión del procedimiento (4) Evaluar estrategias para cooperar. ....	120
Figura 33. Extracto de la programación del procedimiento (4) Evaluar estrategias para cooperar. ....	121
Figura 34. Extracto de la programación en la que se implementa la formalización de la cooperación.....	122
Figura 35. Extracto de programación en la que se implementa la actualización de propiedades. .....	122
Figura 36. Extracto de programación en la que se actualizan las propiedades, eliminado un agente del sistema. ....	123
Figura 37. Red de Kalundborg entre 1990-1999 (Symbiosis 2014). ....	129
Figura 38. Interfaz del modelo computacional cargados los datos del escenario Base.....	131
Figura 39. Resultados obtenidos al final de las 50 iteraciones. ....	133

---

Figura 40. Interfaz del modelo computacional mostrando las opciones de selección del escenario Soc. ....	135
Figura 41. Gráficas de los índices de medida en el escenario Soc. para las iteraciones 5 y 50. (a) $E_{It5}$ vs. $E_{It50}$ ; (b) $IGMSP_{It5}$ vs. $IGMSP_{It50}$ ; (c) $IGEP_{It5}$ vs. $IGEP_{It50}$ ; (d) $IGEI_{It5}$ vs. $IGEI_{It50}$ . ....	136
Figura 42. Interfaz del modelo computacional mostrando las opciones de selección del escenarios <i>Res</i> , <i>Was</i> y <i>Dem</i> . ....	140
Figura 43. Gráficas de los índices de medida en el escenario Res. durante 50 iteraciones comparados con el escenario Base: (a) N (punteado) vs. E (continuo); (b) IGMSP; (c) IGEP; (d) IGEL. ....	142
Figura 44. Gráficas de los índices de medida en el escenario Was. durante 50 iteraciones. (a) N (punteado) vs. E (continuo); (b) IGMSP; (c) IGEP; (d) IGEL. ....	145
Figura 45. Gráficas de los índices de medida en el escenario Dem. durante 50 iteraciones. (a) N (punteado) vs. L (cruces) vs. E (continuo); (b) IGMSP; (c) IGEP; (d) IGEL. ....	147
Figura 46. Ortofoto de la zona de estudio (Pymes de Torrelavega, Cartes y Polanco). ....	148
Figura 47. Distribución porcentual de sectores de actividades de la zona de estudio (INGEPRO 2012). ....	150
Figura 48. Interfaz del modelo computacional con el caso de estudio. ....	151
Figura 49. Índices de medida para el caso práctico. ....	152
Figura 50. Captura de pantalla de una simulación del caso de estudio. ....	153

## Índice de Tablas

---

Tabla 1. Selección de experiencias de parques eco-industriales clasificadas por tipología.....	34
Tabla 2. Orígenes de complejidad destacados en los parques eco-industriales.....	50
Tabla 3. Características deseadas en los parques eco-industriales.....	73
Tabla 4. Medios de representación de las propiedades del modelo conceptual.....	74
Tabla 5. Descripción de categorías de factores y subcategorías.....	83
Tabla 6. Relación entre los medios de representación y los bloques de modelado analítico.....	88
Tabla 7. Propiedades de los agentes asociadas a los flujos.....	91
Tabla 8. Propiedades de los agentes asociadas al tipo de empresa.....	93
Tabla 9. Parámetros de la función de utilidad.....	95
Tabla 10. Categorías de agentes y parámetros condicionados a ellas.....	97
Tabla 11. Tabla de recompensas del juego.....	104
Tabla 12. Influencia de los factores del entorno sobre las propiedades de los agentes.....	106
Tabla 13. Población de agentes del escenario Base.....	130
Tabla 14. Relaciones establecidas e intercambios elementales entre los agentes de Kalundborg. .....	132
Tabla 15. Poblaciones de los ensayos sobre el escenario Soc.....	136
Tabla 16. Distribución de empresas en las 11 zonas de estudio (INGEPRO 2012).....	149
Tabla 17. Evolución del modelo en el horizonte temporal.....	156



# **CAPÍTULO 1.**

## **INTRODUCCIÓN**

---



## **1.1. Marco de la Tesis**

La presente Tesis Doctoral está vinculada a la línea de investigación *Ecología Industrial* que desarrolla el grupo de investigación Ingeniería y Gestión de Proyectos (INGEPRO) del Departamento de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos.

Esta Tesis surge del trabajo iniciado en la Tesis Doctoral *Desarrollo de un modelo de localización y contribución al diseño de la operación de áreas industriales sostenibles*, presentada en abril de 2009 por Dña. Inmaculada Fernández Diego en la Universidad de Cantabria (Fernández 2009). El citado trabajo establece el marco de definición de áreas industriales sostenibles desde la perspectiva del ciclo de vida. Profundiza en la fase de planificación y selección del emplazamiento y plantea las directrices a seguir en las fases de explotación y gestión del área. El nuevo conocimiento hallado en la etapa de explotación abre una nueva línea de investigación orientada a la gestión sostenible de parques industriales, sobre la que se desarrolla la presente Tesis Doctoral.

Existen diversos tipos de áreas industriales, pero la tipología más extendida en España consiste en extensas superficies de suelo industrial que, repartidas en parcelas, albergan a medianas o pequeñas empresas de diferentes sectores productivos o

servicios. La planificación y adecuación de estas áreas consiste en centralizar los servicios y accesos, y a su vez generar beneficios adicionales a las empresas a través de ahorros económicos. Si bien el diseño de nuevas áreas industriales contempla un mayor número de criterios de sostenibilidad, se detecta la falta de su mantenimiento durante la etapa de operación. Pero lejos de ser un reflejo de las deficiencias operativas de las áreas industriales existentes, esto puede verse como una oportunidad para la propuesta de nuevos modelos de gestión orientados hacia una operación sostenible en las áreas industriales.

La etapa de operación de las áreas industriales se caracteriza por ser dinámica y compleja, debido a su adaptación constante a las fluctuaciones del mercado. Durante esta etapa las empresas desarrollan su actividad de forma independiente y con escasa interacción con las otras ubicadas en su misma área industrial. La introducción de prácticas sostenibles en la empresa requiere de un proceso meditado y costoso, pero esta tarea se complica más aún si se pretenden implementar conductas sostenibles basadas en la colaboración entre las empresas de un área industrial.

En esta Tesis Doctoral se plantea un cambio en el modo de operación de las áreas industriales tradicionales hacia formas más sostenibles, mediante la introducción de prácticas cooperativas apoyadas en la ecología industrial. La teoría de la ecología industrial persigue imitar el funcionamiento de los ecosistemas naturales en los sistemas creados por el hombre, alcanzando modelos más eficientes y compatibles con su entorno. Con un enfoque sistémico, las estrategias de la ecología industrial tratan de minimizar el consumo de recursos y la generación de residuos, mediante el cierre de las cadenas lineales de producción y consumo. Las prácticas cooperativas que orientan esta transformación hacia sistemas eco-industriales se apoyan en la gestión de residuos, uso compartido de infraestructuras o servicios comunes, e incluso

creación de nuevos negocios que fomenten el cierre de ciclos de producción-consumo.

A su vez, la introducción de estas estrategias de ecología industrial incrementa los tipos de relaciones desarrolladas entre las empresas e intensifica sus interacciones, con lo que la operación del sistema se vuelve más compleja e impredecible. Estas particularidades dificultan el proceso de transición hacia modelos de operación más sostenibles. Por lo que es preciso desarrollar herramientas que motiven y den apoyo a la implementación de estas prácticas; demostrando tanto las oportunidades de colaboración, como los potenciales beneficios, económicos y ambientales, que las empresas pueden alcanzar a través de estas colaboraciones.

En esta Tesis Doctoral se abordan todas las etapas del diseño y modelado que desembocan en una herramienta computacional la cual simula el proceso de transformación de áreas industriales tradicionales hacia modelos más sostenibles. Para ello es necesario entender y profundizar en el modelado de sistemas complejos. Perspectiva, que permite captar las singularidades operativas del sistema, así como su representación y estudio.

La aplicación final del modelo computacional sobre un caso de estudio, una región industrial conocida que fue previamente evaluada de forma analítica, concluye las posibles cooperaciones y la potencial mejora operativa que alcanzaría el área estudiada implementando estas prácticas. Esta aplicación demuestra la aptitud del modelo computacional para soportar esta conversión hacia el modelo de área eco-industrial.

Desde el punto de vista científico-técnico, a continuación se destacan las aportaciones de interés de la presente Tesis Doctoral:

- **Propuesta de actualidad.** El creciente interés en la captura del valor de los recursos y en la creación de valor social y ambiental en las empresas está presente en la legislación vigente de carácter ambiental. Esta propuesta de modelos más sostenibles de operación se encuentra latente en las últimas Directivas sobre gestión de residuos y nuevos métodos de gestión medioambiental y responsabilidad empresarial.
- **Propuesta continuista.** La presente Tesis Doctoral profundiza en las líneas de investigación propuestas por la última Tesis dirigida dentro del grupo de investigación y se enmarca en los proyectos de investigación efectuados. A su vez, la presente Tesis abre nuevas líneas de investigación que alimentan futuros trabajos a desarrollar por el grupo de trabajo.
- **Propuesta de carácter multidisciplinar.** El presente documento de Tesis integra diversas disciplinas teóricas, desde las más básicas como la teoría de sistemas, hasta campos multidisciplinarios como la ecología industrial, pasando incluso por técnicas analíticas específicas como el modelado basado en agentes o la dinámica de sistemas. La complejidad inherente al sistema de estudio justifica la perspectiva multidisciplinar de esta Tesis, que abarca desde el planteamiento de las estrategias cooperativas hasta el proceso de modelado e implementación computacional.
- **Propuesta innovadora.** Las iniciativas de ecología industrial son aún incipientes en España, y más aún si nos centramos en el campo de modelado de parques industriales sostenibles. Pero el carácter innovador de esta Tesis Doctoral no solamente se debe a la novedad del estudio, sino que también radica en la potencial aplicabilidad y repercusión del modelo. La aplicación de la herramienta computacional resultante de la presente Tesis es viable para apoyar la transformación de áreas industriales tradicionales hacia

modelos más sostenibles, detectando las oportunidades de colaboración potenciales y la simulación de su evolución ante diferentes condiciones de trabajo reales.

- **Propuesta integral del proceso de investigación.** La Tesis Doctoral abarca todas las etapas básicas del proceso de investigación. Planteamiento del problema, estudio de teorías para su resolución, selección de métodos para el modelado, resolución mediante escenarios de simulación y comprobación de los resultados esperados a través de experiencias existentes.

## 1.2. Objetivos

El objetivo principal de esta Tesis Doctoral es contribuir al campo de diseño y modelado de sistemas eco-industriales hasta un nivel de desarrollo computacional para apoyar, mediante programas de simulación, la transformación de áreas industriales tradicionales hacia estos sistemas más sostenibles.

La línea de investigación propuesta pretende profundizar en el estudio de las conductas y procesos de cooperación empresarial hacia estos objetivos de sostenibilidad. El fin último es promoverla implementación de conductas más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente en las áreas industriales actuales, demostrando los beneficios potenciales a alcanzar.

Los objetivos específicos de esta Tesis Doctoral se pueden enumerar en los siguientes:

- ***Comprender las características propias de la operación de parques eco-industriales.*** Para ello, se revisa el estado del arte y las tendencias actuales en el campo de la ecología industrial, así como los modos operativos de parques eco-industriales existentes.



- ***Plantear un modelo conceptual de parque eco-industrial que integre las particularidades de los sistemas reales.*** El modelo conceptual trata de recoger todas las particularidades inherentes a la complejidad de este tipo de sistema. La documentación de esta primera etapa de modelado sienta las bases para el desarrollo de la herramienta computacional.
- ***Formalizar analíticamente las premisas del modelo conceptual para hacer posible la implementación computacional.*** Las premisas conceptuales se deben expresar de forma analítica mediante proposiciones lógicas o matemáticas. La formalización del modelo conceptual mediante un paradigma de modelado analítico permite una implementación estructurada en una plataforma computacional y su posterior simulación en diferentes escenarios de trabajo.
- ***Desarrollar y comprobar la validez de la herramienta computacional para su aplicación en la transformación de sistemas industriales tradicionales a eco-industriales.*** La programación y simulación del modelo se verifican y validan, comprobando complementariamente la robustez de la herramienta ante diferentes escenarios. Una vez validada la herramienta computacional, se aplica a un caso real de estudio y se demuestra su potencialidad y viabilidad.

### **1.3. Preguntas de la investigación**

La hipótesis que motiva esta investigación se enuncia como:

*“Demostrar que en las áreas industriales existe y es posible  
una forma de operación más sostenible que la actual”.*

Las siguientes preguntas de investigación tratan de resolver y confirmar esta hipótesis comenzando por el planteamiento del problema y formulación de la metodología, hasta comprobar la resolución de la hipótesis de partida.

Cabe anotar que la búsqueda de respuestas a cada una de las preguntas de investigación principales da lugar a nuevas cuestiones que es necesario solucionar en el desarrollo de la investigación, tal y como se plantea en el siguiente listado:

**Planteamiento del problema:**

- ***¿Es posible mejorar el modelo de operación de las áreas industriales actuales hacia formas más sostenibles?***
  - *¿Cómo es la operación de las áreas industriales actualmente y cuáles son sus puntos débiles desde el prisma de la sostenibilidad?*
  - *¿Cómo es posible convertir estos puntos débiles en oportunidades de mejora de forma integral?*
  - *¿Existe ya algún modelo de operación que cubra las deficiencias que tiene el actual desde el prisma de la sostenibilidad?*
  
- ***¿El modelo de parque eco-industrial puede servir de referencia para transformar la operación actual de las áreas industriales hacia formas más sostenibles?***
  - *¿Qué particularidades posee la operación del parque eco-industrial y qué aporta con respecto al modelo de área tradicional?*
  - *¿Qué fundamento teórico y experiencias prácticas corroboran la efectividad del modelo de operación de parque eco-industrial?*
  
- ***¿Es necesario comprender algo más para apoyar el proceso de implementación del parque eco-industrial?***
  - *¿Qué características de complejidad se identifican en la operación de los modelos de parques eco-industriales?*
  - *¿Qué aproximaciones se han desarrollado hasta ahora en el estudio de su complejidad?*

**Formulación de la metodología de resolución:**

- *¿Cómo es posible implementar el modelo de operación de parque eco-industrial en un área tradicional en funcionamiento?*
  - *¿Qué metodología debo seguir para desarrollar una herramienta útil y basada en el conocimiento que soporte esta transformación?*
  - *¿En qué características debo fijarme para reproducir el comportamiento del parque eco-industrial?*
  - *¿Cómo expreso analíticamente las particularidades identificadas del parque eco-industrial?*
  - *¿Cómo debo implementar computacionalmente el modelo de eco-parque industrial sin perder información?*

**Resolución de la hipótesis de partida:**

- *¿Cómo demuestro las mejoras alcanzadas por el modo de operación del parque eco-industrial respecto al modo actual?*
  - *¿Es viable la herramienta computacional para simular el comportamiento de un parque eco-industrial real?*
  - *¿Es aplicable la herramienta computacional para transformar áreas industriales tradicionales hacia formas más sostenibles de operación?*
  - *¿Cómo se puede mejorar el modelo computacional?*

*El todo es más que la suma de las partes.*

*Aristóteles*

#### **1.4. Organización de la Tesis**

Esta Tesis Doctoral está organizada en cinco capítulos que dan respuesta a las preguntas de investigación principales planteadas en el apartado anterior (Figura 1).

El presente capítulo, **Capítulo 1. Introducción**, recoge los antecedentes que dan origen a esta Tesis Doctoral y los objetivos que se pretenden alcanzar en su desarrollo. El planteamiento de las preguntas de la investigación que dirigen las etapas de trabajo enriquece la documentación del proceso de elaboración y aporta la consistencia necesaria al conjunto del documento.

El **Capítulo 2. Estado del Arte** presenta una síntesis de los conceptos teóricos que soportan la investigación, además de las tendencias actuales de estos campos de conocimiento. Las preguntas de la investigación que dirigen este capítulo se corresponden con las cuestiones relativas al planteamiento del problema de estudio. En este capítulo se parte de la revisión de la operación actual de las áreas industriales para identificar el modelo de referencia idóneo para soportar la transformación hacia formas de operación más eficientes y sostenibles. Seguidamente, se profundiza en el concepto de parque eco-industrial, en la teoría de ecología industrial que lo soporta y en experiencias reales que corroboran su aptitud práctica. Finalmente, se destacan las

características asociadas a la complejidad de los parques eco-industriales, las cuales condicionan el estudio y análisis de su evolución.

El **Capítulo 3. Metodología** enuncia el proceso metodológico seguido hasta desarrollar la herramienta computacional que soportará el proceso de transformación de las áreas industriales tradicionales hacia formas más sostenibles de operación. Este capítulo trata de responder a las preguntas de investigación relacionadas con la formulación de la metodología de resolución. Este tercer capítulo se estructura siguiendo la metodología de modelado de los sistemas complejos. Inicialmente, se analizan y estudian las características propias de los parques eco-industriales que se desean reproducir. A continuación, estas premisas conceptuales se formalizan analíticamente según expresiones matemáticas o sentencias lógicas de acuerdo a un paradigma de modelado apropiado a las características del sistema de estudio. Finalmente, las proposiciones analíticas se codifican de acuerdo a un lenguaje computacional, permitiendo la representación y simulación del modelo.

El **Capítulo 4. Análisis de Resultados** expone los ensayos de validación del modelo computacional. Este capítulo da respuesta a las últimas cuestiones relacionadas con la resolución de la hipótesis de partida. La validación pretende comprobar la reproducibilidad del modelo basándose en la información de una experiencia real de parque eco-industrial. Una vez verificada la validez del modelo se revisa su robustez simulando diferentes escenarios de trabajo, según las condiciones de contorno. Como última etapa, se aplica la herramienta a un caso práctico de transformación de áreas industriales tradicionales hacia formas más sostenibles tomando los datos empíricos de una experiencia real.

El **Capítulo 5. Conclusiones** presenta las conclusiones extraídas de la investigación, así como las nuevas líneas de investigación resultantes de la presente Tesis Doctoral. Tanto de este capítulo como del resumen, se adjuntan las respectivas

versiones en inglés por tratarse de un requerimiento exigido por la “*Normativa de Estudios de Doctorado los Requisitos para la Mención Internacional*” en doctorados regidos por reales decretos anteriores al RD 99/2011 de la Universidad de Cantabria. Como recogen los artículos 37 y 38 (CG 26/9/11) de la citada normativa “*parte de la tesis doctoral, al menos el resumen y las conclusiones, se haya redactado y sea presentado en una de las lenguas habituales para la comunicación científica en su campo de conocimiento, distinta a cualquiera de las lenguas oficiales en España*”.

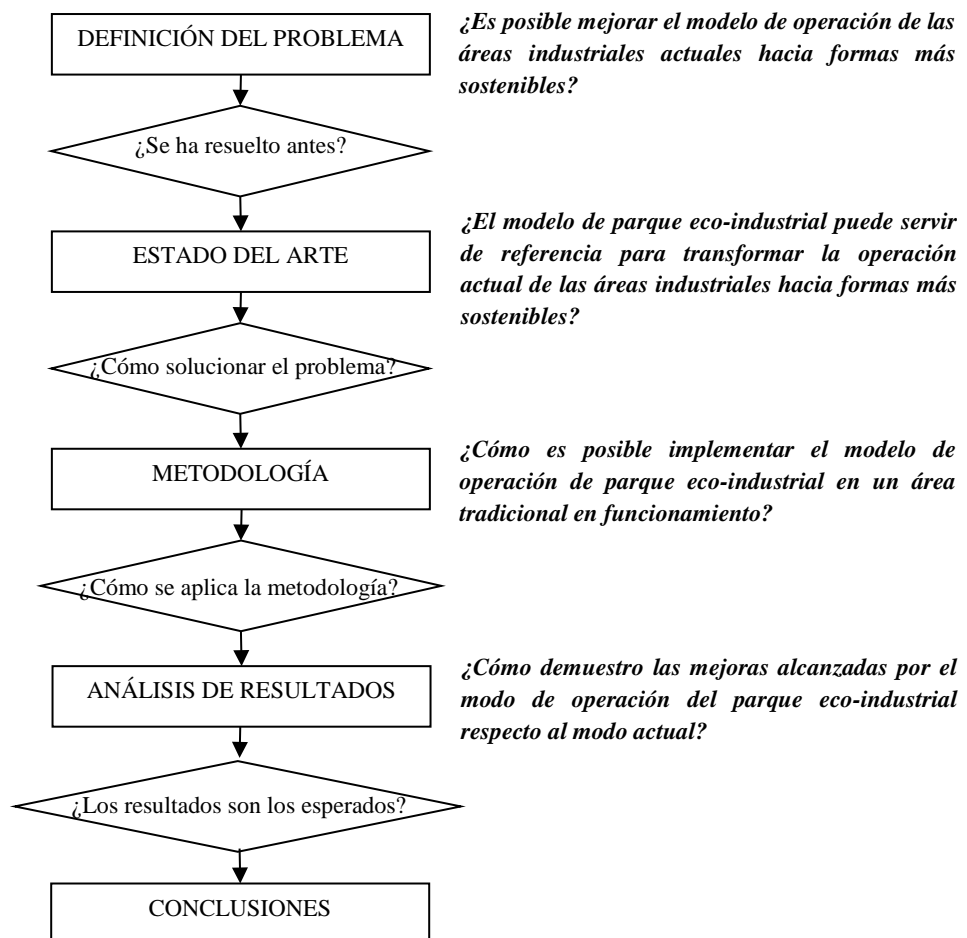


Figura 1. Relación de las preguntas de investigación y los capítulos de la Tesis Doctoral.

Adicionalmente, se adjuntan como anexos las publicaciones generadas durante la investigación. Los artículos de investigación, recogidos en el **Anexo I. Publicaciones**, se encuentran publicados en revistas científicas indexadas en el *Journal of Citation Reports-Science Edition (JCR-SCE)*.



# **CAPÍTULO 2.**

## **ESTADO DEL ARTE**

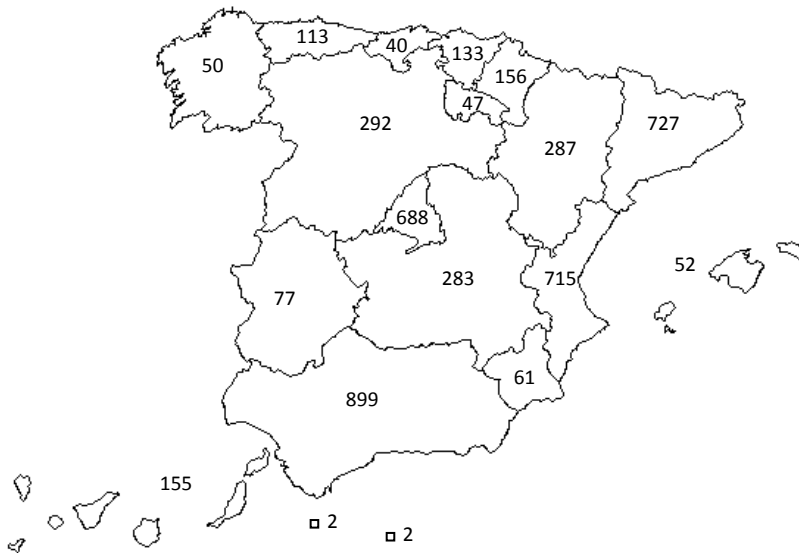
---



*¿Es posible mejorar el modelo de operación de las  
áreas industriales actuales hacia formas más sostenibles?*

## **2.1. Modelo de operación actual de las áreas industriales**

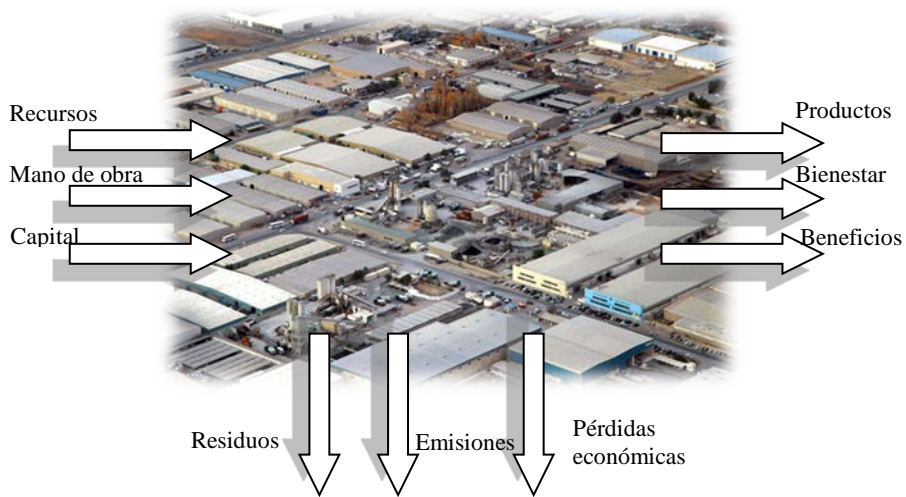
Las áreas o polígonos industriales actuales se conciben como zonas, separadas de los núcleos urbanos, que se distribuyen en parcelas donde se emplazan diversas actividades. Las áreas mixtas son la tipología más habitual, en la que se combinan pequeñas y medianas empresas con industrias más grandes y robustas (Lambert y Boons 2002). En esas zonas, las industrias desarrollan su actividad económica de forma independiente, pero aprovechan las ventajas competitivas derivadas de la centralización de infraestructuras y servicios del área (Walcott 2009). Este modelo de localización industrial ha sido principalmente promovido desde los Ayuntamientos con el propósito de impulsar el desarrollo económico de los municipios y regiones. En España se lleva implementando desde 1977 (CEOE 2014). Actualmente, incluyendo proyectos aún en desarrollo, se encuentran censados 4.779 polígonos industriales a escala nacional (CEPE 2014a), según la distribución mostrada en la Figura 2.



**Figura 2. Distribución regional de áreas industriales censadas en España  
(elaborado a partir de datos de CEPE 2014a).**

Pero a pesar de su gran popularidad, la operación de las áreas industriales actuales presenta notables deficiencias desde el prisma de la sostenibilidad (Munier 1995, Bakshi y Fiksel 2003, López 2011).

Desde el punto de vista ambiental, las industrias han invertido grandes esfuerzos en reducir los impactos ambientales provocados por su actividad individual. Sin embargo, la agrupación de actividades en un espacio concreto concentra sus impactos provocando un efecto sinérgico (Figura 3). Cuando observamos con un enfoque macroscópico los impactos causados en un área industrial se comprueba el intensivo consumo de recursos, el gran volumen de residuos generados, la elevada concentración de contaminantes, así como ciertas externalidades, como por ejemplo el aumento del nivel de ruido y del impacto visual. Estos impactos que se encontrarían distribuidos, en un área industrial se concentran y combinan incrementando el impacto ambiental negativo.



**Figura 3. Deficiencias del modo de operación de las áreas industriales actuales**  
(Fuente de imagen [1]).

Desde el punto de vista económico, las empresas tratan de optimizar sus procesos a nivel individual, maximizando la eficiencia, productividad y beneficios económicos, incidiendo sobre las tecnologías, métodos de trabajo y procesos de gestión internos. Este tipo de conductas suelen ser confidenciales, tratando de evitar que sus mejoras puedan trascender al conocimiento de empresas del mismo sector y provocar mayores competencias. Pero por otro lado, el que las industrias desarrollen sus actividades de forma independiente dificulta el aprovechamiento de las economías de escala y de co-localización derivadas de la ubicación de las empresas en un área industrial.

Desde el punto de vista social, los grandes retos que hoy en día quedan por resolver son, entre otros, la mejora del ambiente laboral para los trabajadores, la búsqueda de modos más eficientes de gestión empresarial, o la integración de la actividad industrial en su entorno social. Estas deficiencias se tratan de abordar mediante el desarrollo de buenas prácticas o políticas sociales desde la dirección de las empresas; pero la escasez de recursos y medios humanos para empresas pequeñas,

limitan en la mayoría de los casos su aplicación. A pesar de las posibilidades que ofrecen, es poco habitual encontrar prácticas de negocio en las que diferentes empresarios apuesten por una iniciativa en conjunto, incluso para las actividades de mantenimiento y control de la obsolescencia del área, la cual es fruto tanto de la falta de mantenimiento como del vacío de responsabilidades en la gestión de un área industrial.

No obstante, estas debilidades ambientales, económicas y sociales pueden verse como oportunidades potenciales de mejora empleando un enfoque colectivo de la actividad industrial (Figura 4). En cuanto a las oportunidades para minimizar este impacto ambiental combinado existen medios de prevención de la contaminación que se pueden implementar a escala global del área industrial. Ejemplos de estos medios, son instalaciones depuradoras de aguas a la salida del área que trate los efluentes del conjunto de industrias; o bolsas de subproductos industriales para el intercambio entre empresas del área antes de su desecho. En cuanto al ámbito económico, el aprovechamiento de las economías de escala y de localización supone una sustancial mejora. Favorecida por la proximidad de empresas, la explotación de las economías de escala se fundamenta en la distribución entre varias empresas de los costes de operación de aquellos servicios cuyo uso pueda ser compartido; como un transporte común de mercancías, o un suministro compartido de vapor o recirculación de agua. Si bien, el aprovechamiento de las economías de localización requiere un conocimiento más profundo sobre la complementariedad de las actividades que permita compartir recursos, compra de inputs intermedios, reclutamiento de mano de obra especializada, o transferencia mutua de conocimiento (O'Sullivan 2003). La explotación de estas oportunidades globales puede complementar los beneficios alcanzados a nivel de operación individual de empresa. Adicionalmente, el enfoque colectivo también ofrece ventajas competitivas desde el prisma social. Estas iniciativas se apoyan en la dotación de servicios públicos y privados de valor añadido;

como servicios de transporte colectivo desde núcleos urbanos próximos, servicios de formación transversales e incluso guarderías o áreas de ocio para la conciliación familiar. La masa crítica alcanzada en un área industrial favorece su implementación, mientras que a escala de pequeña empresa sería poco viable.



**Figura 4. Aumento de la conectividad entre empresas y de la sostenibilidad del área mediante un enfoque colectivo -Kalundborg, Dinamarca- (Fuentes de las imágenes [2] y [3]).**

Sin embargo, la puesta en práctica de esas sugerencias de mejora para solventar las deficiencias identificadas en el modelo actual de operación no es trivial. Las propuestas de mejora enunciadas tratan de solucionar de forma integral las deficiencias ambientales, económicas y sociales con un denominador común. Todas ellas se basan en un enfoque colectivo mediante el que se trata de aprovechar las oportunidades ofrecidas por la proximidad de empresas dentro del área. Pero en este punto es preciso cuestionarse *qué medios serían necesarios para la puesta en práctica de estas mejoras y si existe algún modo de operación que mejore todas o algunas de estas deficiencias actualmente.*

Acerca de los medios necesarios, una de las razones más inmediatas que dificulta la aplicación de este enfoque colectivo se debe a la falta de una figura clara que dirija los esfuerzos de las empresas individuales hacia un objetivo común. La existencia de una figura o comité de gestión en las áreas industriales permitiría la centralización de objetivos, así como la orientación y soporte a las empresas para la implantación de

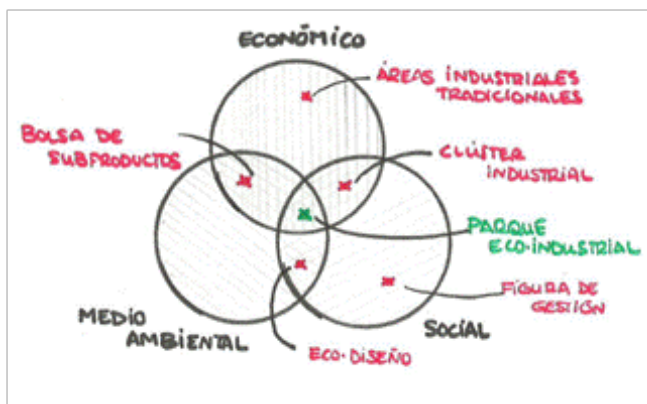
estas propuestas globales. En España sólo un 20% de las áreas industriales censadas actualmente dispone de una figura de gestión (CEPE 2014b). No obstante, las funciones que desempeñan los gestores existentes en las áreas industriales españolas, se limitan a la administración, gestión y mantenimiento de las áreas. Aún queda lejos la puesta en práctica de medidas colectivas que contemplen una operación del área más eficiente y sostenible, una administración de las sugerencias de mejora de las industrias, o una mediación en las cooperaciones entre los empresarios.

En cuanto a iniciativas que tratan de aprovechar el enfoque colectivo, generalmente no abordan los objetivos de sostenibilidad de una forma integral, como sucede en el clúster industrial. En esta tipología se localizan actividades industriales atendiendo a las relaciones funcionales e interdependientes entre los actores de la cadena de valor de un producto. De esta forma se crea un polo de especialización industrial que busca promocionar el desarrollo económico de una región. Este modelo potencia los aspectos económicos y sociales, derivados del acceso compartido a redes de información, cadenas de suministro y distribución, o mercados y reclutamiento del personal especializado, pero no implementa mejoras colectivas para la disminución de los impactos ambientales.

En cambio, la perspectiva sobre la prevención y control de los impactos ambientales sí es contemplada en la etapa de diseño de las nuevas áreas industriales ecológicas (Fernández y Ruiz 2009). Estas medidas pasan por una arquitectura industrial que se mimetice con el entorno natural empleando cubiertas vegetales, el uso de energías alternativas, la ordenación del área menos intensiva del suelo, o la captación de agua de lluvia. El planteamiento de estos diseños es más ecológico y respetuoso con su entorno, pero no se prevén patrones de gestión o regulación que velen por una etapa de operación sostenible.



Entre otras experiencias más integradoras, se puede destacar la bolsa de subproductos industriales implantada en España desde 1991 (Cámaras de Comercio 2014). Su filosofía es poner en contacto a empresas que puedan comercializar subproductos de sus actividades industriales. Para ello se dispone de una plataforma web en la que se anuncian las empresas ofertantes y demandantes de subproductos; facilitando así la puesta en contacto y formalización de estas nuevas relaciones comerciales. Esta iniciativa reporta beneficios económicos y reducción de impactos ambientales por la generación de residuos. Sin embargo, las bolsas de subproductos están enfocadas a escalas regional e interregional, extendiéndose más allá de los límites de un área industrial.



**Figura 5. Aproximaciones de mejora de la operación de áreas industriales sobre el prisma de la sostenibilidad.**

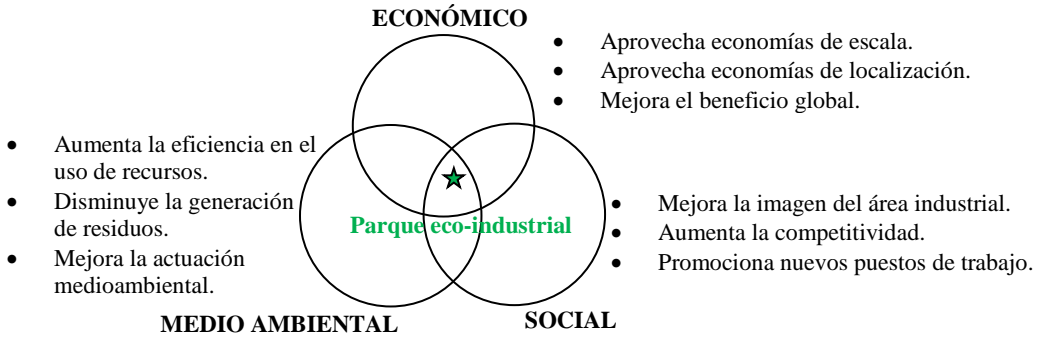
Es difícil encontrar un modelo de referencia que solvente completamente todas las deficiencias del actual, pero en la línea de la última iniciativa comentada se puede encontrar a escala local un modelo más integrador. El modelo de parque eco-industrial el cual se apoya en un enfoque global, concibiendo el área industrial como una comunidad de empresas que conviven y cooperan, aprovechando las ventajas competitivas ofrecidas por la proximidad, diversidad y compatibilidad entre las actividades (Figura 5).

*¿El modelo de parque eco-industrial puede servir de referencia para transformar la operación actual de las áreas industriales hacia formas más sostenibles?*

## **2.2. Teoría y práctica del modelo de parque eco-industrial**

El modelo de parque eco-industrial (EIP, *eco-industrial park*) se define como “(...) *una comunidad de empresas de manufactura y servicios que mejoran su actuaciones económicas y medio ambientales a través de la colaboración en la gestión de temas de medio ambiente y reutilización. Mediante el trabajo de comunidades de empresas unidas, se busca que el beneficio colectivo sea mayor que la suma de los beneficios individuales de cada empresa si se optimizaran sus actuaciones individuales*” (USEPA, United States Environmental Protection Agency, citado en Tudor *et al.* 2007). Entendiendo los “temas de medio ambiente y reutilización” a los que hace referencia la definición, como prácticas colectivas orientadas al desarrollo de redes de intercambio de flujos residuales, de materia, agua y energía; uso compartido de infraestructuras y servicios comunes; o creación de nuevas instalaciones o negocios que aumenten la eficiencia del conjunto favoreciendo la reutilización, recirculación o tratamiento de flujos residuales. Estas prácticas

permiten una operación más sostenible de las empresas y del área industrial en su conjunto (Figura 6).



**Figura 6. Aportaciones del modelo de parque eco-industrial sobre el prisma de la sostenibilidad.**

En función de la compatibilidad de las actividades industriales es posible crear redes de intercambio de flujos residuales o subproductos más o menos densas. En esencia, una red de intercambio se basa en sustituir parte de las materias primas que se consumen en el área, por subproductos o residuos que, generados por otras empresas, son idóneos para emplearse en la misma función que las materias originales. Desde el punto de vista ambiental, esta práctica permite disminuir tanto el consumo de recursos naturales, como el vertido de residuos y su impacto al entorno natural. Este aspecto también se conserva mediante el uso compartido de infraestructuras que son comunes a diferentes industrias, como las destinadas al abastecimiento de servicios auxiliares (vapor, agua, energía, aire comprimido, climatización, etc.). Esta medida, favorecida por la proximidad entre las industrias, reduce el uso intensivo del suelo, y aumenta la eficiencia operacional del área. Esta perspectiva de cierre de ciclos de producción y consumo dentro de los límites del parque, también favorece la implementación de nuevas actividades o instalaciones dentro del área destinadas por ejemplo a la gestión y tratamiento de residuos, o a la depuración y recirculación de agua. Además de estas medidas colectivas, la

perspectiva de parque eco-industrial vela por la implementación de tecnologías limpias e innovadoras para prevenir la contaminación, como energías renovables, absorción de CO<sub>2</sub>, sustitución de materiales tóxicos, o cogeneración.

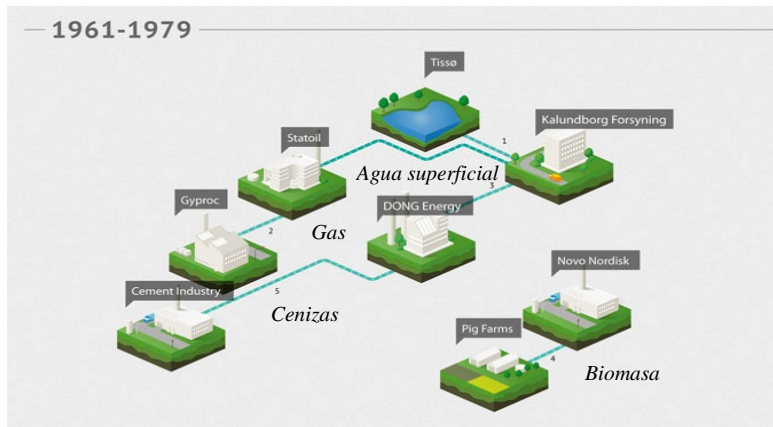
La implementación de estas estrategias cooperativas también redonda en unos ahorros económicos e ingresos adicionales. Por un lado, los derivados de la participación en la red de intercambios de materiales y subproductos. Los residuos o subproductos son comprados por un valor menor que las materias primas suponiendo un ahorro, y la venta de éstos reportan nuevos ingresos, adicionales a los ordinarios, así como la reducción del pago de tasas de gestión o vertido de residuos o no penalizaciones debido al marco regulador. Por otro lado, los obtenidos del uso compartido de infraestructuras comunes al aprovechar las economías de escala. La inversión es compartida entre las empresas que consuman el servicio y los costes de operación se distribuyen uniformemente entre los consumidores. Adicionalmente se pueden identificar beneficios económicos derivados de la mejora de la imagen social por colaborar en iniciativas innovadoras, como la apertura a nuevos mercados y conseguir un valor añadido de sus productos.

Complementariamente, el desarrollo de estas prácticas favorece la integración del área con su entorno social. La mejora de la competitividad de las empresas, evita su cierre y pérdida de trabajos, y ayuda a estabilizar la economía de la comunidad. El parque eco-industrial se puede utilizar como instrumento de promoción del tejido industrial de la región, mediante el reclutamiento de nuevas empresas que complementen y diversifiquen la base industrial, lo cual crearía nuevos puestos de trabajo. Adicionalmente, el desarrollo de parques eco-industriales puede apoyar el proceso de creación de políticas y regulaciones más efectivas, así como servir de guía para el desarrollo de nuevas iniciativas industriales. La estructura de los parques eco-industriales facilita además el intercambio de información y conocimiento sobre

nuevas tecnologías, métodos de trabajo y uso de subproductos, lo cual aporta un valor añadido a las empresas.

Ahora es necesario cuestionarse *los pilares en los que se sustenta este modo de operación sugerido por el parque eco-industrial*. Estas prácticas implementadas en los parques eco-industriales se basan en los principios de la ecología industrial y de la simbiosis industrial. Si bien, si nos preguntamos qué surge antes, si la teoría o la práctica, podemos llegar a la conclusión de que concepto y práctica se desarrollan paralelamente y se realimentan entre sí.

Las ideas más elementales de la ecología industrial tienen un origen diferente a la primera experiencia de simbiosis industrial, aunque ambos surgieron durante la década de los 70. En esa época equipos pioneros, como el de Robert U. Ayres, centraban sus análisis en los flujos materiales y energéticos que circulaban a través de diversas actividades industriales, a semejanza de los estudios efectuados sobre los ecosistemas naturales (Ehrenfeld 2004). Mientras, en el área industrial de Kalundborg (Dinamarca), que años más tarde será reconocida como la experiencia de simbiosis industrial por excelencia, se formalizaban los primeros intercambios de agua superficial y subproductos (gas, biomasa y cenizas volantes) entre las empresas del parque (Figura 7).

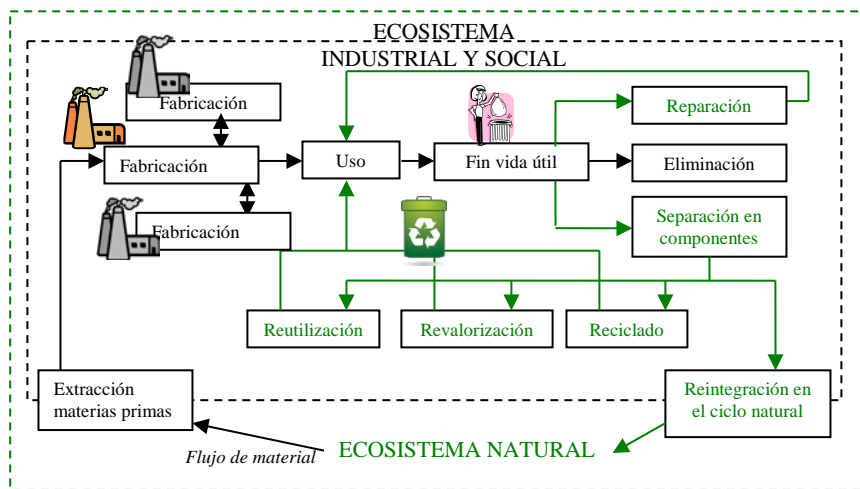


**Figura 7. Red de Kalundborg 1961-1979 (Symbiosis 2014).**

Esta experiencia siguió evolucionando poniendo en práctica nuevas reutilizaciones, recirculaciones e intercambios materiales y energéticos. Paralelamente las ideas siguieron emergiendo en el campo de la ecología industrial, y los académicos siguieron cuestionándose cómo simular comportamientos naturales más sostenibles en el ámbito humano y tecnológico. El artículo “*Strategies for manufacturing*” de Robert Frosch y Nicholas Gallopoulos publicado en *Scientific American* en 1989, es el hito que marca un antes y un después del estudio de la sostenibilidad en la industria. Los autores propusieron el concepto de ecosistema industrial como “*sistema en el que se optimiza el consumo de energía y materia, se minimiza la generación de residuos y los efluentes de un proceso sirven como materias primas para otros procesos*” (Frosch y Gallopoulos 1989, citado en Liwarska-Bizukojc *et al.* 2009). Este concepto de ecosistema industrial introduce comportamientos propios de los ecosistemas naturales en los sistemas tecnológicos creados por el hombre aumentando su eficiencia.

La hipótesis principal de los ecosistemas industriales es imitar los mecanismos de cierre de cadenas lineales de producción y consumo, mediante la introducción de nuevas prácticas (Figura 8). Estas actividades se orientan tanto a la recuperación de

flujos materiales, como al desarrollo de una red de intercambio de flujos residuales entre empresas (Lowe y Evans 1995). El conocimiento y difusión acerca de la experiencia de Kalundborg, acuñada como una práctica de “simbiosis industrial” (Chertow 2000), alentó más a la comunidad científica, demostrando que las ideas que se proponían en la corriente teórica de la ecología industrial podían materializarse, alcanzando un resultado sostenible y exitoso.



**Figura 8. Prácticas de la ecología industrial que fomenta el cierre de ciclos.**

Durante la década de los 90<sup>1</sup>, proliferó el desarrollo y aplicación de herramientas y técnicas apoyadas en los principios de la ecología industrial, como el diseño para el medioambiente (DfE, *design for environment*), la eco-eficiencia (EE, *eco-efficiency*), o el análisis del ciclo de vida (LCA, *life cycle analysis*). En el caso de la última herramienta citada, su popularidad y aplicabilidad favorecieron la estandarización de

<sup>1</sup>Las aportaciones científicas más notables se generan a lo largo de la década de los 90. No obstante, estas técnicas mantienen su auge y el número de publicaciones crece progresivamente en la actualidad (según datos de Scopus® la cifra más relevante se alcanza en 2012 con 5.020 publicaciones sobre análisis del ciclo de vida).

su metodología mediante normas internacionales (ISO 1997). El análisis del ciclo de vida ofrece una perspectiva holística para la evaluación de los impactos ambientales a lo largo de la vida del producto. Analizando las implicaciones ambientales desde la extracción de las materias primas hasta el retiro de productos, procesos o sistemas (Graedel y Allenby 2003). Con estas técnicas se empieza a apreciar la amplitud de las aplicaciones de la ecología industrial y la complejidad inherente a los ecosistemas industriales, pero se sigue manteniendo un enfoque estático de estudio. Los sistemas industriales se desagregan en componentes y flujos consumidos y generados, identificando las oportunidades potenciales para la sustitución de recursos naturales por subproductos o corrientes residuales (Ayres y Ayres 1996).

No obstante, la anterior desagregación del estudio de los ecosistemas industriales y la ampliación de su alcance a todo su ciclo de vida son aún herramientas insuficientes para comprender y reproducir el comportamiento de las experiencias de parques eco-industriales que se implementan durante esta década en todo el mundo. Profundizando en las tipologías de parques eco-industriales implementadas se detecta la clasificación más temprana la propuesta por Chertow (2007, 2009). Apoyándose tanto en el origen de las experiencias como en las características operacionales, la investigadora propone dos modelos contrapuestos, el parque eco-industrial planificado (PEIP, *planned eco-industrial park*) y la simbiosis auto-organizada (SOS, *self-organizing symbiosis*).

La tipología PEIP se basa en la elección de actividades que por su complementariedad son susceptibles de crear redes de intercambio de subproductos. La creación de este tipo de parques eco-industriales o ecosistemas industriales precisa de una intencionalidad de figuras externas al área industrial (de promoción o gestión, con autoridad, generalmente ajeno a los empresarios) tanto en el diseño del área como en la selección de las industrias emplazadas en ella (enfoque *top-down planning*). En



cambio en la tipología SOS, el desarrollo de la red de intercambios nace sin una intencionalidad primitiva. La creación de las redes de intercambio emerge de las decisiones de los empresarios quienes colaboran con la finalidad de disminuir costes operacionales (la simbiosis se auto-organiza). Si bien, los beneficios obtenidos alientan a la puesta en práctica de futuras colaboraciones de forma más deliberada, generando la simbiosis.

Esta clasificación se amplía años más tarde considerando tres categorías adicionales a las anteriores: el tipo construido y reclutado (B&R, *build and recruit*), el tipo de parque industrial reconvertido (RIP, *the retrofit industrial park model*), y el tipo de parque eco-industrial de economía circular (CE-EIP, *the circular economy eco-industrial park model*) (Chertow y Ehrenfeld 2012). El B&R es la base del PEIP pero sin las connotaciones ambientales, únicamente se buscan industrias compatibles para ser co-localizadas en un área industrial tradicional. El modelo RIP se basa en la transformación de un área tradicional en un parque eco-industrial. Este modelo implica un profundo cambio de mentalidad en relación a las normas habituales de operación, que les permita considerar las redes de intercambio en la operación habitual de las empresas. No obstante, este tipo sólo existe en Corea promovido por su Plan Nacional de Desarrollo de Parques Eco-industriales. El tipo CE-EIP se impulsa en China, implementando la idea de la economía circular de la Ley de la Promoción de la Economía Circular en 2009. Lo destacado de este modelo es el apoyo de instituciones coordinadoras (como comités de gestión de los parques) que solicitan a las autoridades públicas la creación de instrumentos legales y normativos para el soporte y promoción del intercambio de recursos, así como para otras iniciativas destinadas a reducir los costes privados y crear beneficios ambientales (Chertow y Ehrenfeld 2012).

Otros autores identifican un tipo intermedio entre las dos tipologías originales PEIP y SOS. La tipología denominada simbiosis industrial facilitada (FIS, *facilitated industrial symbiosis*). En ésta que existe una figura que se ocupa de la mediación y agilización de las relaciones entre las empresas (Paquin y Howard-Greenville 2009), cuyo ejemplo más claro de este modelo es el Programa Nacional de Simbiosis Industrial del Reino Unido, la experiencia del NISP (*National Industrial Symbiosis Programme*). Es sensiblemente similar al modelo PEIP, pero los estudiosos destacan el papel de la figura de gestión o mediación, que dirige sus esfuerzos hacia la conexión de empresas mediante acciones de “*conversación, conexión y co-creación*” en las etapas de pre-desarrollo de la red, desarrollo temprano y consolidación (Paquin y Howard-Greenville 2012).

De las múltiples experiencias desarrolladas en todo el mundo, se han elegido 17 ejemplos de los más representativos. Estos ejemplos ilustran las tipologías expuestas de parques eco-industriales, salvo la tipología B&R por denotarse una falta de connotaciones ambientales (Tabla 1).

**Tabla 1. Selección de experiencias de parques eco-industriales clasificadas por tipología.**

Tipología	Parque	Estado	Origen	Beneficios
PEIP	Verdal (Noruega)	Operacional	Evitar el cierre de empresas debido a la crisis económica.	Parque incubadora integral de nuevas empresas y creación de empleo. (Haskins 2008)
	Comunidad Planificada de Devens (USA)	Operacional	Desarrollo de un área industrial sostenible en un área militar desierta.	Creación de empleo y reclutamiento de nuevas empresas. (Gibbs y Deutz 2005, 2007)
	Nanning Sugar Co. Ltd. (China)	Operacional	Evolución de empresas tradicionales a modelos más sostenibles.	Maximización de la producción de empresas y la minimización de su consumo y contaminación. (Yang y Feng 2008)
	Choctaw (USA)	Planificado	Rediseño del	Se elabora un plan

			parque industrial.	maestro que define las necesidades de las empresas y las posibles relaciones entre ellas, mediante la reutilización de agua y materiales. (Potts 1998)
	Península de Kola (Rusia)	Planificado	Reducir la alta tasa de contaminación.	Conocidos los flujos de materiales de las cinco empresas más intensivas se buscan nuevas actividades que se puedan interrelacionar con ellas y aumenten la eficiencia del conjunto. (Salmi 2007)
	Carole Park (Australia)	Operacional	Reimpulso de la base industrial.	Une el desarrollo económico con la planificación del uso del suelo. Se basa en cuatro pilares: arrendamiento de parcelas y/o naves, almacén central común, cogeneración y tratamiento de efluentes. (Roberts 2004)
	Herning-Ikast Industrial Park (Denmark)	Extinto	Resolver problemas de desintegración urbana y degradación medioambiental.	Desarrollar un área basada en principios ecológicos industrialmente viables, mediante la cooperación entre empresas, reciclado de residuos y minimización de consumo de recursos. (Massard <i>et al.</i> 2014)
FIS	NISP (Reino Unido)	Operacional	Programa nacional para promover la simbiosis industrial.	Ahorros económicos, y ventas adicionales, creación de puestos de trabajo, recuperación de millones de toneladas de materiales, y ahorros en el consumo de agua. (NISP 2014)
SOS	Styria (Austria)	Operacional	Red de reciclado.	Mejora de la operación del parque a través de la

			expansión de la red de reciclado al intercambio entre procesos de diferentes empresas. (Schwarz y Steininger 1997)
Parque Industrial de Burnside (Canadá)	Operacional	Planificación de desarrollo local.	Planificación del uso del suelo reconociendo la función ambiental. (Côte y Smolenaars 1997)
Kwinana (Australia)	Operacional	Intercambios energéticos y de flujo material.	Mejora de la operación del parque y ahorro de energía a través de la recuperación de agua e innovación en equipos. (Van Berkel 2007)
Kalundborg (Dinamarca)	Operacional	Acuerdo entre las empresas del área para reducir la contaminación y mantener la operación industrial.	Creación de una red de intercambio de materiales, energía y agua. El mantenimiento y el desarrollo de nuevas oportunidades se promueven mediante el instituto de simbiosis industrial. (Côte y Hall 1995, Lowe y Evans 1995)
Guitang Group (China)	Operacional	Mejora del uso de los materiales dentro del ciclo de vida de productos de refino.	Reutilización de subproductos del refino del azúcar. Impulsado por la expansión del producto. (Zhu y Côte 2004, Chertow 2009).
Jyväskylä (Finlandia)	Operacional	Causas económicas y de regulación.	El suministro energético de la ciudad surge de la coproducción de calefacción y electricidad de un sistema altamente eficiente que emplea residuos industriales como combustibles. (Chertow 2007, Korhonen <i>et al.</i> 1999).
Landskrona (Sweden)	Extinto	Ampliar el número de colaboraciones	A partir de una red de intercambios materiales

			empresariales.	pre-existente entre las empresas, se cataliza su ampliación invirtiendo recursos económicos externos. Al acabarse la financiación no se ha registrado nuevos avances. (Mirata y Emtairah 2005)
RIP	Ulsan EIP Project (Corea del Sur)	Operacional	Área elegida para poner en práctica el desarrollo de parques eco-industriales.	Implementación de parques eco-industriales basándose en el desarrollo de redes de intercambio de subproductos. El apoyo financiero del Gobierno y la facilitación, favorecen la promoción y coordinación del proyecto. (Park y Won 2007)
CE-EIP	Lubei National Eco-Industrial Demonstration Park (China)	Operacional	Aplicación del modelo de la Ley de Economía Circular.	Desarrollo de redes de simbiosis industrial en un polo químico, favorecido por la diversidad de actividades y el apoyo financiero gubernamental. (Mathews y Tan 2011)

Observando las experiencias, no se detecta ninguna característica común que garantice su éxito o que sentencie su fracaso. En ningún caso el origen de la experiencia, emergencia o intencionalidad del proceso de implementación condicionan la evolución del proyecto. Sin embargo, se puede vislumbrar que la fórmula del éxito es resultado de una combinación de diversas circunstancias técnicas, sociales y de financiación, entre otras. Apoyándose en estas observaciones, el mundo académico empieza a cuestionarse el enfoque estático que caracteriza a la ecología

industrial para incluir aspectos propios de estos sistemas socioeconómicos, como su diversidad y dinamismo (Matutinović 2001, Sterman 2000).

En esta línea se proponen unos principios básicos que se dan en un ecosistema industrial, complementarios al de cierre de ciclos (*roundput*), como la diversidad de actores y flujos (*diversity*), la proximidad entre los actores (*locality*), y el cambio gradual de las prácticas (*gradual change*) (Korhonen 2001). La diversidad aumenta las posibilidades de intercambio dentro del ecosistema industrial y la proximidad favorece la viabilidad de las cooperaciones. Mientras que el cambio gradual denota el carácter progresivo en el que se forman y consolidan las redes de colaboración. Así, la diversidad, eficiencia, adaptabilidad y cohesión, son propiedades que contribuyen a mantener tanto la resiliencia como la longevidad de los sistemas que implementan prácticas sostenibles (Fiksel 2003).

Pero la implementación de estos nuevos modos de operación industrial, indudablemente está expuesta a múltiples riesgos. Algunos de carácter interno a los participantes del ecosistema industrial, como la falta de conocimiento sobre la ecología industrial, o la incertidumbre técnica de las empresas ante las nuevas prácticas y tecnologías (Isenmann 2009). O bien de carácter externo, como la incertidumbre existente al ejercer estas prácticas en la regulación normativa acerca de la responsabilidad ambiental, y en la gestión de los parques eco-industriales (Ruiz 2011, Solsbach *et al.* 2009). Así, las propiedades que son inherentes a las redes de cooperación (diversidad, adaptabilidad e intercambio de conocimientos tácitos) se van erosionando por estos riesgos durante el proceso de consolidación (Boons y Berends 2001). Las relaciones entre las empresas son generalmente frágiles e inestables, y la falta de resultados económicos a corto plazo, u otros problemas derivados de la coordinación de la red, inciden negativamente en el desarrollo de las redes de cooperación (Boons y Baas 1997). La longevidad del parque eco-industrial se

encuentra condicionado a la flexibilidad y adaptación de las relaciones de cooperación entre las empresas ante estos cambios (Tudor *et al.* 2007).

Con todo esto podemos comprobar que durante la etapa de operación de los ecosistemas industriales emerge una complejidad inherente a la naturaleza socio-técnica y económica del conjunto, la cual hace difícil entender y describir la fórmula del éxito. Así, comienza a incorporarse el estudio de la complejidad al campo de la ecología industrial. Esta nueva tendencia se consolida en 2009, cuando el *Journal of Industrial Ecology*, revista científica de referencia para los investigadores del área, publica un número especial sobre la complejidad y la ecología industrial (*Complexity and Industrial Ecology*). En su editorial, Dijkema y Basson (2009) hacen referencia a la orientación sistémica de la ecología industrial, la cual condiciona el estudio de las áreas industriales sostenibles hacia la perspectiva de sistemas que interaccionan con su entorno. Este enfoque amplía los límites de estudio más allá de los del parque eco-industrial, permitiendo considerar aspectos tales como su interacción con el entorno y los procesos de toma de decisiones (Lifset 2009). Como reflexiona Ehrenfeld (2009), lo que únicamente era un complicado sistema mecánico de partes interconectadas pasa a convertirse en un sistema complejo debido a la presencia de factores sociales. La teoría de sistemas complejos es útil para considerar las interacciones entre los actores en diferentes niveles, examinando cómo estas interacciones dan forma y cambian la estructura del sistema y sus funciones (Ashton 2009). La perspectiva de los sistemas complejos ayudará a enfrentarnos a su incertidumbre, dinamismo y comportamiento emergente, facilitando su comprensión y análisis, así como el desarrollo de herramientas para su estudio.

*¿Es necesario comprender algo más para apoyar el proceso de  
implementación del parque eco-industrial?*

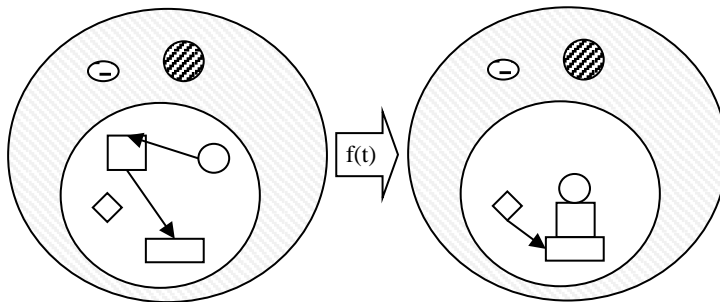
### **2.3. La complejidad de los parques eco-industriales y paradigmas de estudio**

Un sistema complejo se define como un conjunto de componentes elementales que interactúan entre sí, generando un comportamiento global emergente. Este comportamiento no es impuesto por un controlador central ni puede deducirse del comportamiento aislado de sus partes elementales, sino que resulta de las interacciones paralelas de cooperación y competición entre sus componentes (Schuster 2001, Mikulecky 2001, Boccara 2004, Holland 2006). Si un sistema de esta tipología puede aprender autónomamente de su experiencia y adaptar su comportamiento a nuevas circunstancias externas, se clasifica como sistema adaptativo complejo (CAS, *complex adaptive system*) (Potgieter *et al.* 2005, Rammel *et al.* 2007).

Los sistemas adaptativos complejos se clasifican como sistemas abiertos, ya que mantienen una relación de intercambio infinita con su entorno. El entorno establece las condiciones de operación, a las cuales el sistema se debe adaptar mediante procesos de auto-organización para mantener su operación. Esto provoca que también se caractericen como sistemas dinámicos cuya evolución varía en el tiempo; es decir, el conocimiento del comportamiento del sistema en un momento dado, no nos sirve



para extraer su historia completa (Ehrenfeld 2009). Esta dinámica del sistema adaptativo complejo emerge de las interacciones entre sus componentes y de su experimentación con el entorno (Railsback 2001). Las relaciones entre los componentes del sistema no se ajustan a leyes lineales. Cada componente trata de satisfacer sus propios objetivos en las interacciones con otros componentes o con su entorno, exhibiendo un comportamiento no intuitivo con alta incertidumbre y limitada previsibilidad (Holland y Miller 1991, Kay 2002, Haskins 2006). Este comportamiento individual se encuentra condicionado tanto por las circunstancias presentes como por las experiencias pasadas, aunque no se puede predecir de ellas (Ehrenfeld 2009). Así, el comportamiento del sistema global resulta de los patrones de comportamiento de sus componentes y de sus relaciones no lineales (Figura 9).



**Figura 9. Simbolización de un sistema adaptativo complejo.**

A la vista de estas características, un parque eco-industrial se puede estudiar como un sistema adaptativo complejo. En sí mismo, un parque industrial se trata de una agrupación de empresas individuales, con sus propias estructuras organizativas y objetivos de producción. Cada empresa desarrolla su actividad de forma independiente dentro del parque, y por tanto, la interacción entre las empresas es en estas circunstancias generalmente escasa. El nivel de producción de cada empresa, y por tanto de las cantidades de materias primas consumidas y de residuos generados,

son función de su demanda de mercado concreta. Un parque industrial tradicional se aproxima a un sistema complejo formado por subsistemas adaptativos complejos que se identifican con cada una de las empresas localizadas en él. Sin embargo, la pertenencia a un parque eco-industrial implica la participación y colaboración entre las empresas por el bien común del área. El uso compartido de infraestructuras o servicios del área, así como el intercambio de flujos residuales entre las empresas, causan que las empresas interactúen con mayor intensidad y que el conjunto se deba adaptar a las diversas condiciones de operación, aproximándose así al comportamiento de un sistema adaptativo complejo.

Estas interacciones requieren un contexto de confianza entre las empresas que favorezca un intercambio de información y una comunicación fluida entre ellas. Este contexto facilita la coordinación entre las empresas tanto en el uso de suministros conjuntos, como en las redes de intercambio, en las que recordemos que la función de producción será dependiente de los abastecimientos de flujos residuales internos a la red y por tanto se convertirá en más vulnerable. No obstante, aún bajo estas circunstancias, el desarrollo de estas relaciones no es predecible, pues el grado de compromiso con los objetivos de sostenibilidad del área variará de unas empresas a otras. Como hipótesis de partida las empresas deben aceptar los objetivos del área, pero su grado de compromiso depende de las políticas individuales y las decisiones estratégicas de las empresas.

El comportamiento de un sistema complejo no es predecible, lo que provoca que los modelos analíticos no sean suficientes para su diseño y planificación (Ehrenfeld 2009). Como plantea Holling (2001), el marco teórico y de procesos para entender los sistemas complejos debe ser tan simple como sea posible para permitir su comprensión y difusión, pero no el más simple; ser dinámico y perceptivo favoreciendo la evaluación de escenarios futuros, en vez de estático y descriptivo; y

abrazar la incertidumbre e imprevisibilidad inevitables en los sistemas sociales y naturales.

El proceso de modelado de sistemas complejos orienta al modelador en las etapas de abstracción, representación analítica, implementación computacional y validación de la reproducibilidad del comportamiento del sistema complejo real que se quiere simular (Sterman 2000, Izquierdo *et al.* 2008). Este proceso esquematizado en la Figura 10, y que se explicará detenidamente en el **Capítulo 3. Metodología**, se escoge por su clara orientación hacia el problema a resolver, y por poseer unas etapas bien estructuradas. El fin último de emplear el proceso de modelado de sistemas complejos es alcanzar un modelo computacional que demuestre la viabilidad de crear parques eco-industriales. Por un lado, el modelo computacional debe identificar las posibles relaciones de simbiosis industrial que se puedan dar en un área industrial, creando las redes cooperativas. Por otro lado, también debe servir para estudiar la evolución temporal de estas relaciones, comprobando que se cumplan los objetivos de sostenibilidad del área. Así la simulación de este modelo computacional pretende motivar la participación de los empresarios en este tipo de colaboraciones.

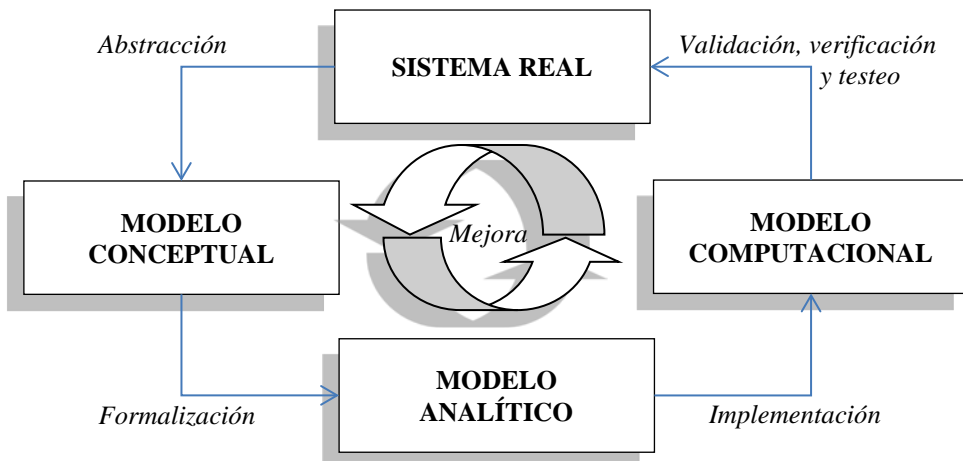


Figura 10. Esquema básico del proceso de modelado de sistemas complejos.

El proceso de modelado de sistemas complejos comienza con la abstracción del sistema que se desea modelar. Se observan las características principales del sistema real, identificando las propiedades relevantes que se deben reflejar en el comportamiento del modelo. Se trata de la etapa más reflexiva, pero también la más creativa para el modelador. Desafortunadamente, es poco habitual que esta etapa de modelado quede documentada más que en unas notas que guarde el modelador, por lo que el número de contribuciones al campo del modelado conceptual de parques eco-industriales se encuentra bastante limitado. No obstante, existe una discreta aportación que deja constancia de los enfoques más representativos en este campo.

La propuesta más temprana, es la planteada por Kay (2002), en la que relacionaba la teoría de la complejidad con la ecología industrial. En su propuesta exponía el marco conceptual de los sistemas abiertos jerárquicos auto-organizados (SOHO, *self-organizing hierarchical open*). Este marco conceptual da cabida a la representación de los ecosistemas naturales, así como a los modelos de ecología industrial, permitiendo describir la sostenibilidad humana e integridad ecológica. Un sistema SOHO se caracteriza por ser un sistema complejo, adaptativo, jerárquico y disipativo. Su evolución está condicionada por los principios de la termodinámica como la exergía y entropía, considerando la dispersión de materia y energía en el sistema, y su homogeneización de diferentes concentraciones para comprender el progreso del sistema (Cohen-Rosenthal 2003).

Otra propuesta que considera la perspectiva de la sostenibilidad en los procesos industriales es la de Bakshi y Fiksel (2003), en la que proponen ampliar los límites de estudio hacia su entorno de forma jerárquica. Así, el entorno del proceso industrial queda representado como un conjunto de sistemas jerárquicos anidados. Inicialmente, con una perspectiva del ciclo de vida que permita incluir la preparación de las entradas a proceso, así como recirculaciones y recuperación de flujos residuales

previo a su desecho. Seguidamente, hacia el campo de la economía ecológica (*ecological economics*) el cual evalúa los capitales naturales y sociales de forma conjunta con los capitales económicos tradicionales, integrando así los impactos a estos flujos, al contrario que el enfoque de la economía clásica. En este planteamiento los autores reconocían la dificultad de adoptar esta perspectiva por la falta de herramientas y técnicas adecuadas para tratar la complejidad propia de los ámbitos social, económico y medio ambiental.

La propuesta de Liwarska-Bizukojc *et al.* (2009), se ocupa expresamente del modelado conceptual de los parques eco-industriales. El modelo conceptual que plantean se basa en el entendimiento de las relaciones entre las empresas a semejanza de los ecosistemas naturales, identificando una taxonomía de empresas de acuerdo a su función en el ecosistema industrial (productores, consumidores y descomponedores). Esta iniciativa es prometedora desde el punto de vista de la semejanza con los ecosistemas naturales, pero mantiene una perspectiva estática del sistema sin profundizar en aspectos propios de la complejidad inherente a estos modelos.

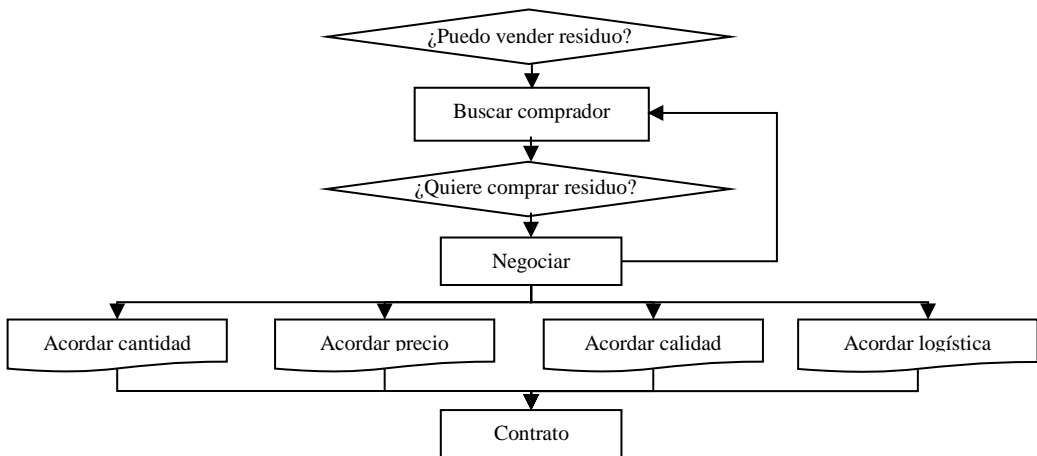
La última perspectiva, de gran impacto, es la propuesta por Nikolic *et al.* (2009). Ésta se basa en los sistemas socio técnicos a gran escala o sistemas- $\lambda$  (*large-scale socio technical systems* o  $\lambda$ -*systems*). Estos sistemas se definen como grandes redes sociales y técnicas interconectadas que se emplazan en contextos ecológicos. Su comportamiento emerge del de sus agentes individuales cuando estos poseen suficiente energía, conocimiento o potencial económico. Para estudiar analíticamente su funcionamiento, los autores emplean modelos basados en agentes y así predecir el comportamiento de los sistemas- $\lambda$ . Aunque, la conceptualización de los sistemas- $\lambda$  está fuertemente condicionada por la técnica de modelado analítico basado en agentes.

A pesar de que las cuatro perspectivas revisadas son inspiradoras, ninguno de estos modelos conceptuales cubre completamente las expectativas previstas para abstraer las peculiaridades de un parque eco-industrial y simbolizar la complejidad de su comportamiento. Por tanto, es preciso cuestionarse *cómo mejorar y completar la abstracción de las propiedades de un parque eco-industrial*.

El marco conceptual de los sistemas SOHO incluye gran parte de características inherentes a la complejidad, pero su evolución se mide según las leyes de la termodinámica, semejante a los ecosistemas naturales. Sin embargo, estas leyes son insuficientes para representar la realidad de la toma de decisiones y las relaciones sociales involucradas en los parques eco-industriales que se desea representar, así como la emergencia del comportamiento del sistema global. Las leyes de la termodinámica resultan insuficientes para valorar la compleja toma de decisiones y satisfacción de los objetivos múltiples de los empresarios. Entonces, *cómo se puede representar este proceso de toma de decisiones*. La decisión de formalizar una relación de intercambio depende, en la mayoría de los casos, de varios objetivos y es dependiente de las circunstancias externas. El enfoque de la termodinámica es incompleto para abordar la no linealidad e incertidumbres existentes en la operación de los ecosistemas industriales. Ni las incertidumbres propias del sistema industrial (operacionales, resultantes del proceso y temporales), ni las dependientes de las condiciones externas (regulaciones, fluctuaciones de la demanda, disponibilidad de suministro, precio de mercado, capacidad de consumo, clima, etc.), se encuentran cubiertas por este enfoque. Por tanto, se sugiere la aproximación de la Teoría de Juegos, la cual permite representar los intereses individuales y resolución de conflictos entre empresas (Lou *et al.* 2004).

La Teoría de Juegos se orienta a la resolución de problemas donde coexisten *“múltiples estrategias que generan los mejores beneficios en función de las acciones*

de otros agentes” (Dixit y Skeath 1999 citado en Grimes-Casey *et al.* 2007). Esta teoría soporta la evaluación de interacciones cooperativas, generando la estructura para el análisis de problemas con opciones estratégicas, la cual se ajusta a las necesidades de evaluación realizadas en los sistemas eco-industriales (Lou *et al.* 2004). En los juegos estratégicos de dos jugadores, el equilibrio de Nash se trata de la mejor solución de la cual ninguno de los jugadores desea desviarse para mejorar su utilidad (Myerson 1991, Başar y Olsder 1999). Esta aproximación ha sido empleada para analizar problemas de cooperación en un contexto de gestión sostenible (Grimes-Casey *et al.* 2007, Chew *et al.* 2009).

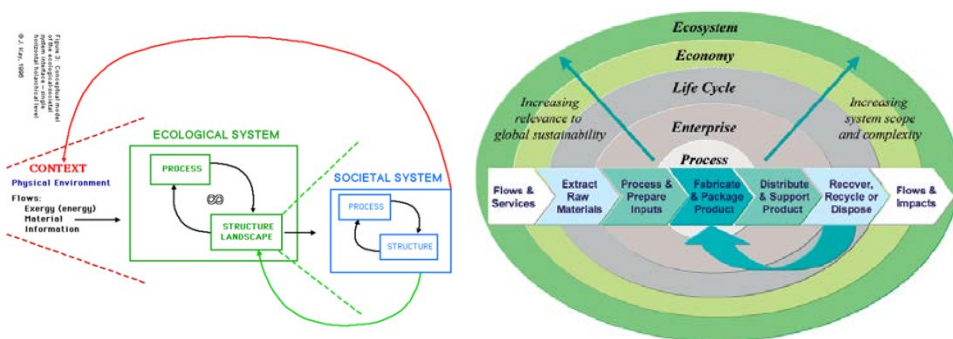


**Figura 11. Árbol de decisión de un proceso de negociación para el intercambio de subproductos.**

Uno de los aspectos clave que se quiere abstraer en el modelo conceptual de parque eco-industrial es la naturaleza de las relaciones sociales y de negociación, que den lugar al desarrollo de la red de intercambios entre las empresas. Si no se valoran las alternativas posibles, así como las diferentes reacciones y comportamientos de los agentes, no estaremos estudiando una perspectiva real. No todos los intercambios posibles, se llevan a cabo, y el porqué se esconde detrás de las decisiones de cada una de las empresas involucradas (Figura 11), de sus objetivos a largo plazo y prioridades

en su operación. Estas negociaciones son abstractas y difíciles de expresar analíticamente, incluso con un porcentaje de aleatoriedad; que sí permite considerar la Teoría de Juegos.

Siguiendo con el marco de los sistemas SOHO, éste ofrece además una aproximación del entorno del sistema de estudio. Lejos de ser un sistema aislado, el parque eco-industrial se encuentra embebido dentro de un sistema más amplio que conforma su entorno. La representación sistémica del entorno podría ser abordada de una forma lineal, con el que mantiene un intercambio abierto y constante; sin embargo la perspectiva propuesta por Kay (2002) de sistemas jerárquicos anidados, ofrece una visión más completa y realista del entorno que rodea y alberga al sistema del parque eco-industrial. En los sistemas SOHO se plantea una relación infinita y embebida de los sistemas naturales o socio-económicos, dentro de unos sistemas más grandes del mismo tipo, que mantienen una relación de intercambio infinita y relación constante (Figura 12(a)). Este enfoque también es empleado en la propuesta de Bakshi y Fiksel (2003). Aunque en este caso, la perspectiva de sistemas jerárquicos anidados se aplica al entorno en el que evoluciona la cadena de suministro de procesos sostenibles (Figura 12(b)).



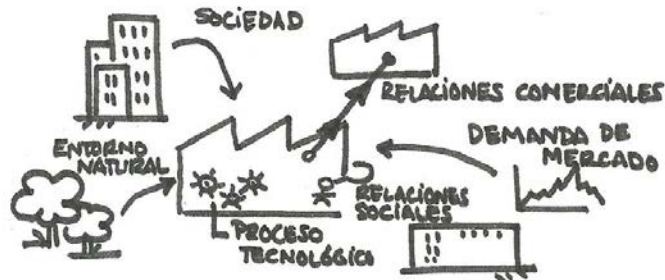
**Figura 12. Representación del entorno como sistemas jerárquicos anidados, (a) Perspectiva de los sistemas SOHO (Kay 2002); (b) Perspectiva sobre la cadena de suministro (Bakshi y Fiksel 2003).**



No obstante, la representación del entorno en ambas perspectivas se encuentra limitada para abordar las interacciones complejas del modelo de parque eco-industrial con su entorno. En el caso de los sistemas SOHO, el sistema de estudio se consideraría un sistema social, restringiendo sus relaciones con el sistema ecológico del entorno, cuando se aprecia la influencia de otros prismas como el económico y el técnico en el desarrollo de este sistema. Ambos prismas sí son integrados en la perspectiva del entorno propuesto para la cadena de suministro, el proceso técnico se encuentra dentro de un sistema empresa más grande, éste a su vez dentro del ciclo de vida, el cual está embebido por el sistema económico y éste a su vez por el natural. Si bien, en esta perspectiva se omite el enfoque social.

En conclusión, la representación del entorno del parque eco-industrial como un conjunto de sistemas jerárquicos anidados se considera un enfoque enriquecedor y fiel al contexto real. Si bien, la identificación de cada uno de los sistemas que lo integran debe complementarse con el análisis de qué tipo de influencias exteriores al parque se desean estudiar.

Por otro lado, el modelo conceptual que propone la taxonomía de las empresas (Liwarska-Bizukojc *et al.* 2009) sigue manteniendo una visión estática para el estudio del ecosistema industrial, la cual no es suficiente para representar la complejidad de las relaciones reales de un parque eco-industrial. El proceso industrial en sí mismo es complejo, se integra dentro de un sistema de gestión industrial y forma parte de los objetivos de una empresa. Es un proceso dinámico, función de la demanda, de las preferencias de los consumidores, o de la disponibilidad de los proveedores. Considerando el funcionamiento de un parque eco-industrial, este proceso se complica debido a las dependencias surgidas entre los procesos productivos del área (Figura 13). Cuando existe alguna alteración en las condiciones de operación, como en los suministros de recursos de una empresa, todo el sistema se ve afectado.



**Figura 13. Representación conceptual de las dimensiones de la complejidad en un parque eco-industrial.**

El estudio de la complejidad que emerge del modelo de parque eco-industrial se puede estudiar a partir de los distintos ámbitos en los que ésta se origina, tal y como se recoge en la Tabla 2.

**Tabla 2. Orígenes de complejidad destacados en los parques eco-industriales.**

Ámbito de la complejidad	Descripción
Proceso de concienciación sobre la filosofía de la ecología industrial	La filosofía del parque eco-industrial se fundamenta en un proceso de concienciación de los empresarios en las estrategias de la ecología industrial. Asumir responsabilidades ambientales, contemplar consecuencias sociales, económicas y ecológicas de su toma de decisiones, y participar activamente en formar a sus plantillas sobre estas directrices. No siempre existe este compromiso de la alta dirección, y se subestiman las ventajas de la cooperación, por la intangibilidad de los beneficios a corto plazo. Pero es preciso el apoyo desde la alta dirección para que el proyecto salga adelante.
Gestión técnica e informativa	La puesta en práctica de las estrategias cooperativas requiere un tejido diverso, estabilidad en el suministro, así como la disposición de gran cantidad de información para promocionar los intercambios, lo cual es difícil de gestionar (Haskins 2006, Côte y Smoolenaars 1997, Ehrenfeld y Getler 1997). Es preciso disponer de un buen sistema de comunicación y gestión para recoger los datos, asesorar en el funcionamiento y relaciones entre empresas y su comunidad.

Evolución temporal y dinamismo del sistema	Las relaciones se dan durante la operación y gestión, la etapa más duradera y dinámica del parque eco-industrial. Coexisten diversas empresas en diferentes momentos de su ciclo de vida, y se encuentran expuestas a influencias de su entorno social, ambiental y económico que ponen en riesgo la estabilidad de la red. Su operación debe ser robusta y flexible ante cualquier cambio, favoreciendo la regeneración de la red (diferentes alternativas, nuevas empresas...), adaptándose a cambiantes circunstancias de operación.
Relaciones sociales y decisiones individuales	La actitud de los empresarios en las relaciones debe ser abierta y receptiva, favoreciendo un clima de comunicación, entendimiento y confianza mutua, que vela por la duración a largo plazo del parque eco-industrial. Las relaciones entre las empresas son frágiles y existen múltiples intereses particulares, incertidumbres técnicas y dependencias que pueden hacer peligrar la operación del parque eco-industrial (Haskins 2006, Richard y Frosch 1997). Estos factores de confianza y acuerdo no siguen patrones lineales generando comportamientos impredecibles y añadiendo complejidad a las interacciones entre las empresas de un parque eco-industrial.
Respaldo de las entidades socio-políticas	La regulación de estas áreas es incierta o inexistente; los nuevos marcos legales y normativos aún no contemplan ni promocionan estos nuevos modelos. El pobre marco regulador y escasez de instrumentos económicos crean un ambiente incierto para su desarrollo y consolidación. Por lo que es necesario el apoyo de figuras políticas o gubernamentales para estos procesos.

---

En cambio, esta complejidad sí es abordada por el marco de modelado de los sistemas- $\lambda$ , considerando diferentes niveles de decisión en la estructura de los agentes y mecanismos de interacción. Sin embargo, el marco conceptual de los sistemas- $\lambda$  condiciona la aplicación de la técnica de modelado basado en agentes. Y por tanto, la definición de este modelo conceptual se ve influenciado por la técnica analítica que pasará a soportar el entorno de simulación, cuando la elección de esta técnica debe ser efectuada en una etapa posterior de formalización del modelo analítico.

Por tanto, observando las ventajas e inconvenientes de los marcos conceptuales de modelado aplicables a los parques eco-industriales, se deduce la necesidad de plantear un modelo conceptual propio (apartado **3.2 Desarrollo del modelo conceptual de parque eco-industrial**). Un modelo conceptual que integre las particularidades identificadas de las experiencias de parques eco-industriales, así

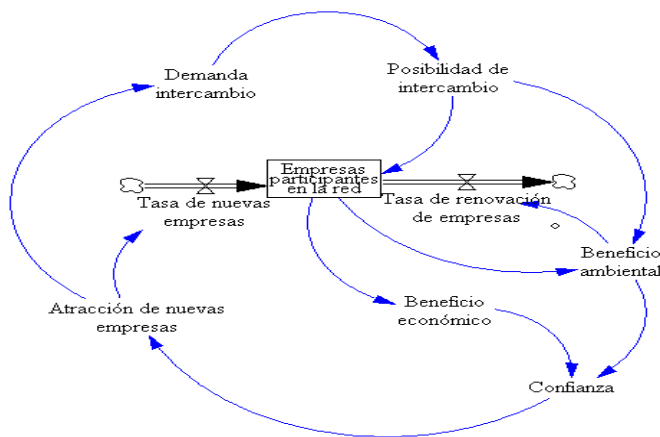
como la complejidad inherente al propio concepto, con el objetivo de facilitar la comprensión y disminuir la incertidumbre en su operación. Y así, una posterior revisión de las propiedades del sistema de estudio a representar permitirá elegir al modelador la técnica analítica más apropiada para su representación analítica.

Entonces, en el momento de formalizar el modelo conceptual *qué paradigma de representación analítica se empleará*. Para ello, además de identificar las variables o propiedades del modelo conceptual, es necesario profundizar en el conocimiento de las técnicas analíticas para la representación de sistemas adaptativos complejos: dinámica de sistemas, modelos basados en agentes y modelos híbridos (Scholl 2001, Schieritz y Milling 2003, Borshchev y Filippov 2004, Izquierdo *et al.* 2008, Barbati *et al.* 2012).

El primer paradigma, la dinámica de sistemas, se considera una aproximación *top-down* o deductivo; es decir, trata de comprender cómo la estructura de un sistema es responsable de su comportamiento. Este paradigma de modelado se basa en la observación de las variables más representativas del sistema, identificando sus relaciones de causalidad, realimentaciones, acumulación de stocks y retrasos temporales, para comprender y representar la evolución del sistema. Su representación gráfica se apoya en diagramas de lazos causales combinados con diagramas de flujos y stock. Éstas se trasladan a ecuaciones algebraicas matemáticas que describen las trayectorias de las variables representativas del modelo (Sterman 2000, Borshchev y Filippov 2004, Lorenz y Jost 2006, Izquierdo *et al.* 2008).

Las variables observables hacen referencia a atributos de los componentes del sistema o a magnitudes globales del mismo. Sobre un modelo de parque eco-industrial se pueden identificar el beneficio económico global, el impacto ambiental global, así como el número de relaciones de la red de intercambio, o el número de empresas participantes en la red. Estas variables tienen relaciones de dependencia entre sí, de

causalidad y realimentación, como por ejemplo, a medida que aumenta el número de relaciones de intercambio, se disminuyen los residuos generados dentro del área y por tanto se reduce el impacto ambiental. Pero estas relaciones no siempre son inmediatamente sucesivas, como por ejemplo desde la detección de un posible intercambio hasta su formalización; esta distancia temporal entre la causa y el efecto es uno de los causantes de la inestabilidad del sistema en el tiempo. Este paradigma de modelado también permite considerar la influencia de políticas en la operación del sistema, analizando los efectos beneficiosos o limitantes sobre la evolución del mismo (Sterman 2000). Un ejemplo de representación de un ecosistema industrial mediante dinámica de sistemas sería el mostrado en la Figura 14.



**Figura 14. Representación analítica de un modelo conceptual de parque eco-industrial mediante dinámica de sistemas.**

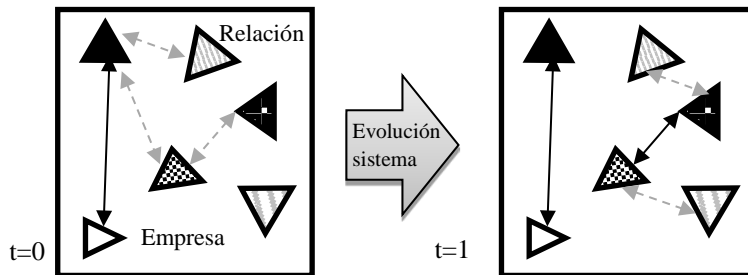
En la revisión bibliográfica realizada se han detectado dos contribuciones basadas en la dinámica de sistemas para modelar la operación de parques eco-industriales. La comunicación de Qu *et al.* (2010) evalúa los efectos de la cadena industrial sobre ciertas características para promover áreas industriales sostenibles, como la diversidad de empresas o grado de asociacionismo en la red. La contribución de Zhao *et al.*

(2008) se ocupa de la evaluación de los impactos ambientales, como la acumulación de sustancias contaminantes. Estos modelos se expresan mediante variables de estado descritas por ecuaciones diferenciales y relacionadas entre sí por lazos de realimentación. Estas variables de estado son las que representan la evolución del sistema de acuerdo a la modificación de ciertos parámetros, como el grado de asociación. Los modelos analíticos de estas contribuciones emplean las plataformas de Vensim®.

El segundo paradigma de modelado, modelado basado en agentes, describe el sistema complejo como un conjunto de entidades autónomas, denominadas agentes, que son caracterizadas con ciertas propiedades y con la capacidad de interactuar entre sí y con su entorno mediante unas reglas de comportamiento. De acuerdo a la definición de Wooldridge y Jennings (1995), un agente es un sistema computacional con las características de independencia, cada agente actúa sin el control humano o externo; capacidad social, las interacciones entre los agentes suceden mediante un lenguaje de comunicación para satisfacer los objetivos; re-actividad, la respuesta de los agentes surge en un sentido para responder a las señales que proceden de su entorno; y pro-actividad, los agentes están dotados con un comportamiento orientado a objetivos, tomando la iniciativa para satisfacer sus objetivos. Estas entidades que poseen objetivos individuales y son autónomas, heterogéneas e independientes, se denominan agentes. Al contrario que la dinámica de sistemas, se trata de una aproximación *bottom-up* o inductiva, puesto que a partir del estudio discreto de la evolución de los estados de los agentes emerge el comportamiento del sistema global durante el proceso de inferencia (Scholl 2001, Wooldridge 2002, Borshchev y Filippov 2004, Izquierdo *et al.* 2008, Barbati *et al.* 2012).

La representación de un parque eco-industrial mediante un modelo basado en agentes, identificaría como agentes a cada una de las empresas del parque. Cada uno

de los agentes-empresa se representaría por unas propiedades que lo caracterizarán inequívocamente, como emplazamiento, sector de actividad, proceso productivo o flujos de productos que fabrica. Las empresas son entidades independientes con sus propios objetivos de lucro económico, son autónomas en su proceso de toma de decisiones y negociaciones, y adaptables ante cambios externos (Figura 15).



**Figura 15. Representación analítica de un modelo conceptual de parque eco-industrial mediante modelado basado en agentes.**

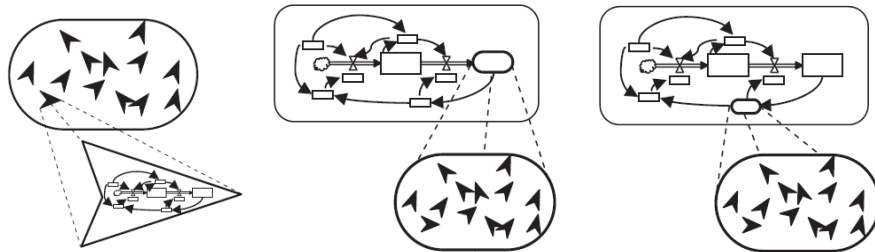
En la revisión bibliográfica se han detectado tres contribuciones que enfocan el estudio de parques eco-industriales mediante la técnica de modelado basado en agentes. Estas contribuciones se basan en el estudio de los componentes del sistema de parque eco-industrial y de sus relaciones, a partir de las cuales emerge el comportamiento del sistema. En cuanto a la contribución de Li y Wei (2009) se define un modelo de información que permite un análisis integrado del sistema eco-industrial. Para tal fin, se establecen cuatro categorías de agentes que pertenecen al sistema eco-industrial: agente empresa, agente técnico, agente comunidad y agente mano de obra. A pesar de que no se profundiza en las particularidades de los sistemas eco-industriales, se describen los protocolos de razonamiento y reacción entre los agentes. La comunicación de Cao *et al.* (2009) estudia la evolución de un sistema eco-industrial considerando las interacciones del sistema con su entorno, mediante la

definición de tres tipos de agentes: agente fábrica, agente entorno y agente consumidor. Estos agentes se relacionan a través de los flujos de materiales y determinan los precios de los productos. El estudio de la sostenibilidad se basa en un análisis de emergencia, ilustrando su aplicación con un hipotético caso de simbiosis industrial en el que la red de intercambios ya se encuentra formalizada. En el caso de Bichraoui *et al.* (2013) sí se plantea la evaluación de redes de intercambio partiendo de un sistema sin relaciones, pero la aproximación y estudio de las cooperaciones es muy elemental, mediante coincidencia de un código aleatorio entre 0 y 5 para las entradas y salidas de proceso.

El tercer paradigma citado, los modelos híbridos, se proponen en aquellas situaciones en las que los métodos de modelado no sean suficientes para abordar el problema a modelar, es decir que no cubran todos los requisitos o tengan dificultades para resolverlos (Lättilä *et al.* 2010). Estos modelos integran las dos perspectivas anteriores de modelado basado en agentes y dinámica de sistemas, tratando de aprovechar las ventajas de ambos paradigmas. Se pueden identificar tres enfoques diferentes como muestra la Figura 16 (Swinerd y McNaught 2012): (a) dentro de un modelo basado en agentes, modelar los comportamientos de cada agente individual mediante dinámica de sistemas, lo cual permite integrar algoritmos de realimentación y aprendizaje para que el agente se adapte a su entorno (Schieritz 2002, Schieritz y Größler 2003); (b) dentro de un modelo de dinámica de sistemas modelar cada proceso de stock como un submodelo de agentes, de cuyas interacciones emerge el comportamiento del proceso; y (c) dentro de un modelo de dinámica de sistemas modelar los parámetros como un submodelo de agentes del que emerge su comportamiento. En esta misma contribución de Swinerd y McNaught (2012) se plantea la integración de esta perspectiva con otros paradigmas como eventos discretos, empleado en logística y procesos de fabricación por representar los sistemas según transiciones discretas de entidades pasivas entre procesos, o autómatas



celulares, que se tratan de la aproximación más elemental a los modelos basados en agentes, los cuales tienen capacidad de moverse e interactuar con su entorno.



**Figura 16. Diferentes enfoques de modelos híbridos (Swinerd y McNaught 2012).**

La representación de un parque eco-industrial mediante modelos híbridos debería considerar por tanto, la combinación de los paradigmas anteriores, representando por ejemplo cada empresa como agente del modelo y sus mecanismos de decisión y relación a través de dinámica de sistemas. El realismo de las simulaciones ha generado un creciente interés en este multiparadigma de modelado. Ciertos autores (Schieritz 2002, Schieritz y Größler 2003) demuestran su adaptación para representación de problemas de cadena de suministro. Si bien actualmente, el desarrollo de plataformas computacionales que permitan este modelado híbrido es aún demasiado incipiente. Las plataformas como AnyLogic® o NetLogo®, permiten la comparación de modelos de ambos paradigmas, modelo basado en agentes y dinámica de sistemas, pero no las integra según el modelo híbrido. A pesar de que algunos investigadores, como Größler *et al.* (2003) han planteado el modelado híbrido mediante la combinación de las plataformas Vensim® para el modelado de dinámica de sistemas y RePast® para el modelado basado en agentes, el tiempo computacional es bastante elevado.

La elección del paradigma de modelado se aborda con posterioridad a la representación del modelo conceptual, tal y como se plantea en el apartado

correspondiente del **Capítulo 3. Metodología**; no obstante es necesario resumir las debilidades y fortalezas potenciales de cada una de las técnicas para enfrentarnos a esta tarea. Por un lado, la técnica de dinámica de sistemas, no permite indagar en los mecanismos de evaluación técnica y negociación de las cooperaciones, como las que rigen la formalización de la red de intercambios. Sin embargo, es muy adecuado para el estudio de influencias externas como políticas o fluctuaciones de mercado. Por otro lado, la perspectiva de los modelos basados en agentes sí permite incluir reglas de comportamiento individuales en la estructura de cada agente y evaluar diferentes propiedades socio-técnicas en la negociación y formalización de los intercambios de subproductos. La contribución más reciente en este área de modelado basado en agentes aplicado a parques eco-industriales (Bichraoui *et al.* 2013) demuestra que es posible la evaluación cualitativa de flujos. No obstante, la propuesta que se plantea aquí es más ambiciosa. Se pretende integrar una base de conocimiento con los posibles intercambios de flujo registrados de experiencias anteriores de simbiosis industrial, que permita una detección más autónoma de las posibilidades de cooperación. Adicionalmente, se desea representar el comportamiento social de los agentes. La relación con su entorno también es posible modelarla en modelos basados en agentes mediante la introducción de modelos matemáticos complejos que representen por ejemplo la evolución de demanda, de los precios, o de restricciones legales que afecten a todo el sistema o incluso flujos concretos, tal y como demuestran las otras contribuciones del campo. Aunque la perspectiva de los modelos híbridos se formula como la más integradora y prometedora, el desarrollo teórico de estas aproximaciones se encuentra aún demasiado incipiente y requiere un esfuerzo mayor para el modelado, demasiado como para aventurarse en su aplicación para un modelo preliminar. Además, debido a la falta de plataformas computacionales abiertas que empleen esta aproximación, se descarta como la técnica más adecuada para abordar el modelo preliminar. No obstante, en futuras mejoras del modelo de parque eco-industrial, se valora la complementación de una perspectiva híbrida que

permita un estudio más completo de la variación de escenarios posibles que se puedan dar (apartado **5.2 Líneas futuras de investigación**). En el caso de los modelos basados en agentes, existen numerosas plataformas computacionales para la implementación y simulación de estos modelos (Railsback *et al.* 2006). La elección de la plataforma más adecuada se basará en la facilidad de su uso y aplicabilidad del modelo.

Finalmente se concluye la necesidad de diseñar y elaborar un modelo conceptual propio. Un modelo conceptual que sea representativo e integrador de la complejidad inherente de los parques eco-industriales y cuyas propiedades conceptuales orientarán la elección del paradigma de modelado analítico.



# **CAPÍTULO 3.**

## **METODOLOGÍA**

---

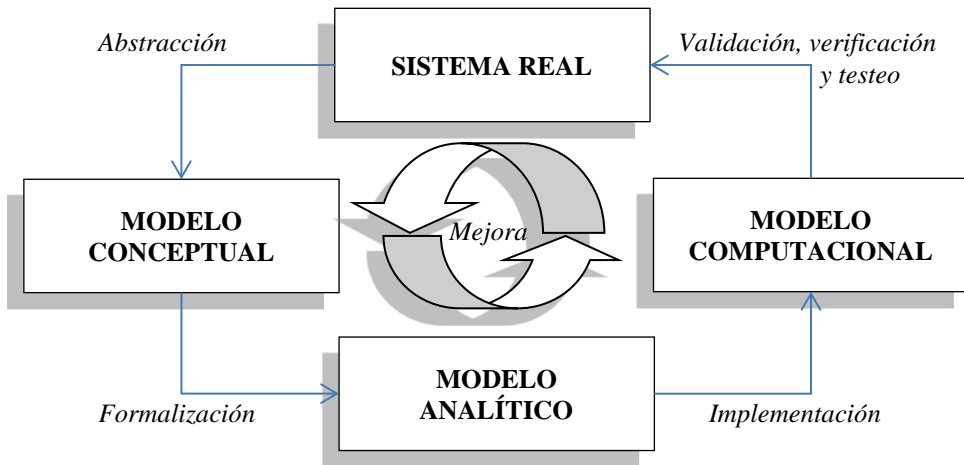


*¿Cómo es posible implementar el modelo de operación de  
parque eco-industrial en un área tradicional en funcionamiento?*

### **3.1. Metodología aplicada**

Tras la revisión del conocimiento actual sobre los parques eco-industriales realizado en el **Capítulo 2. Estado del Arte**, se concluye su estudio como sistema adaptativo complejo, de acuerdo a sus características de comportamiento dinámico, no lineal, emergente y poco predecible.

La metodología seguida para la representación del parque eco-industrial, sigue por tanto el proceso de modelado de sistemas complejos (Stermán 2000, Izquierdo 2008), según las etapas ilustradas en la Figura 17. Este proceso parte de la abstracción del sistema real hasta llegar a obtener una herramienta computacional, que permita tanto identificar las oportunidades de cooperación mediante prácticas sostenibles ofrecidas por un sistema industrial tradicional, como simular la evolución del ecosistema industrial.



**Figura 17.** Esquema simplificado-básico del proceso de modelado de sistemas complejos.

Inicialmente, el proceso de modelado comienza con la abstracción del sistema real que se desea modelar. A pesar de la complejidad del sistema real, se observan las características principales de su operación, identificando las propiedades relevantes que se quieren reflejar en el comportamiento del modelo y los parámetros que midan la evolución del fenómeno. Para ello, esta abstracción precisa de un estudio de los mecanismos de formación y operación de los parques eco-industriales reales, cuyo comportamiento se quiere reproducir. En este análisis se profundiza en la caracterización de los objetivos del sistema de estudio y de sus componentes, así como de los mecanismos de relación. Además de estas propiedades observables, se proponen características complementarias deducidas del propio concepto de parque eco-industrial y que se desean integrar en el modelo.

La etapa en la que se define el modelo conceptual se trata de la más creativa para el modelador. El foco de atención en esta etapa se centra en la conceptualización del sistema de estudio, separándolo de su entorno, y definiéndolo según a sus objetivos, propiedades y elementos que lo componen. El modelo conceptual de parque eco-industrial debe permitir el estudio tanto de la red de intercambios entre empresas,



como de la evolución de su operación en términos económicos y ambientales. Estas particularidades son las mínimas necesarias para que el modelo reproduzca y evalúe los comportamientos esperados en la transformación de áreas industriales tradicionales hacia la forma más sostenible sugerida en un parque eco-industrial.

Una vez descritas las propiedades del modelo conceptual, etapa generalmente no documentada en la literatura científica, éstas se deben expresar formalmente. En el modelo analítico, las premisas que esbozan el modelo conceptual, se declaran analíticamente mediante ecuaciones matemáticas o expresiones lógicas que representen la evolución del sistema en el tiempo y reproduzcan los comportamientos observados en el sistema real. El modelo formal debe construir por tanto, una expresión representativa de la abstracción anterior. De acuerdo a las características del sistema de estudio, así como de las propiedades a representar en el modelo, se elegirá el paradigma de modelado más adecuado para conducir esta formalización analítica.

La implementación computacional agiliza el proceso de análisis e inferencia del modelo analítico. De acuerdo a las proposiciones del modelo analítico y su paradigma de modelado, éste se codifica en un lenguaje de programación formal (Izquierdo *et al.* 2008). El proceso de inferencia se lleva a cabo ejecutando el modelo computacional en una plataforma de simulación apropiada. Los resultados de la simulación del modelo computacional han de reproducir el comportamiento del sistema real y su evolución en diferentes escenarios de trabajo.

Sobre esta última etapa del proceso se procederá con la verificación, validación y ensayos. La verificación consiste en comprobar que el modelo computacional cumple con las premisas planteadas en las etapas previas (Sargent 2003). Este proceso se ocupa de la revisión de los enunciados y estructuras de las proposiciones computacionales, con la finalidad de resolver posibles fallos que puedan conducir a

resultados erróneos durante la inferencia del modelo. La validación se ocupa de comprobar la veracidad de los resultados obtenidos de la simulación comparándolos con los resultados obtenidos en un sistema real. La validación del modelo computacional necesita por tanto de la adquisición, programación e inferencia de unos datos obtenidos de experiencias reales. En el caso de que los resultados de la simulación sean los esperados, el modelo se ha representado correctamente y es válido para soportar el estudio para el que se ha planteado. Finalmente, se llevarán a cabo diferentes ensayos, valorando las distintas condiciones de operación en las que el sistema real pueda encontrarse, analizando así la sensibilidad y robustez del modelo computacional.

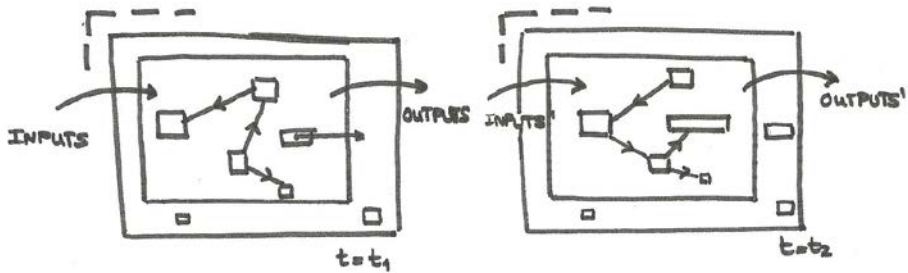
El análisis de los resultados de simulación ofrece información acerca de las posibles mejoras del modelo. Estas mejoras pueden ser abordadas desde diferentes ámbitos; como el replanteamiento del modelo conceptual, lo cual implicaría una profunda revisión a lo largo de todas las etapas del proceso de modelado; o hasta leves retoques en el código para reducir el tiempo computacional.

*¿En qué características debo fijarme para reproducir el comportamiento del parque eco-industrial?*

### **3.2. Desarrollo del modelo conceptual de parque eco-industrial**

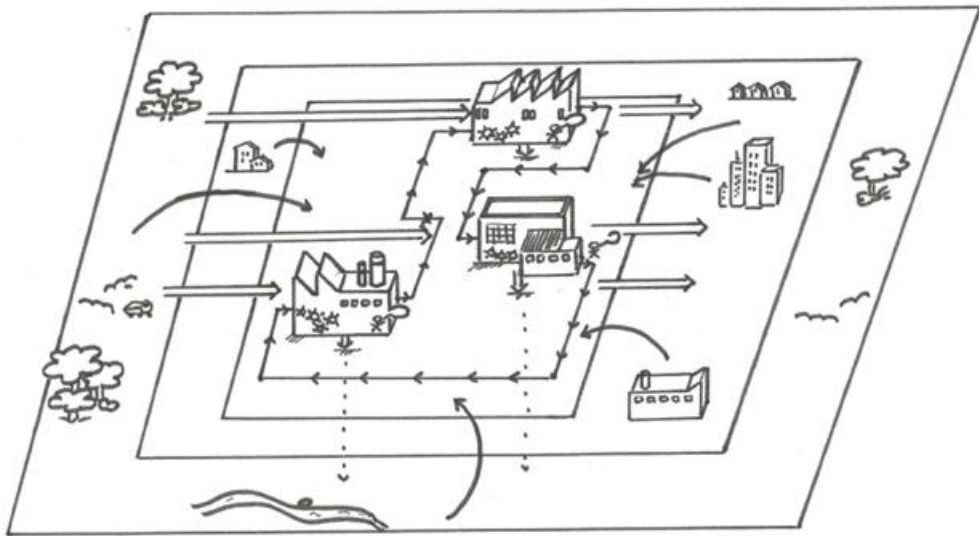
El modelo conceptual debe captar las particularidades del concepto de parque eco-industrial y de las experiencias reales, así como representar las características propias de un sistema adaptativo complejo.

La identificación de un parque eco-industrial como sistema adaptativo complejo viene corroborada por diversos investigadores. Se destaca que el parque eco-industrial es objeto de cambios rápidos, no lineales y discontinuos a causa de sus dependencias en las fuerzas del mercado (Spiegelman 2003, Chertow 2009, Chertow y Ehrenfeld 2012). Estas relaciones no lineales no obedecen a leyes predictivas, causando que el comportamiento del sistema sea no intuitivo y emerja de los patrones de comportamiento individual y de la interacción entre sus elementos (Haskins 2006). El sistema se encuentra embebido en un entorno mayor, jerárquicamente ordenado, con el que mantiene un intercambio infinito de materia, energía e información. Este entorno condiciona la operación y las relaciones del sistema, el cual para su mantenimiento desarrolla un proceso dinámico y adaptativo auto-organizado sin control externo (De Wolf y Holvoet 2004 citado en Boons 2008). Estas características de sistema complejo son simbolizadas en la Figura 18.



**Figura 18. Simbolización de un parque eco-industrial como sistema adaptativo complejo.**

Cada uno de los elementos del sistema eco-industrial se identifica con una empresa individual que en sí misma se puede caracterizar como sistema complejo, puesto que cada una de ellas opera autónomamente dentro de su organización jerárquica. Estas empresas generalmente llevan a cabo su operación según las reglas del mercado y sus propias estrategias para el aumento de los beneficios económicos. Al formar parte de un sistema eco-industrial, las empresas aumentan el número e intensidad de las relaciones establecidas con otros miembros del sistema. La finalidad de estas relaciones de colaboración es alcanzar una operación ambientalmente más respetuosa y unos mayores beneficios económicos. La colaboración entre las empresas mejora la robustez del sistema y lo convierte en más adaptable y flexible a los cambios de su entorno. La cooperación entre empresas se fomenta por factores como la confianza y los acuerdos, pero estos factores no siguen patrones lineales, por lo que se generan comportamientos impredecibles, añadiendo complejidad a las interacciones entre las empresas de un parque eco-industrial. Estos comportamientos complejos, como la creación de relaciones de confianza o acuerdos, no emergen hasta que un parque eco-industrial está en operación, la etapa más duradera y variable de su ciclo de vida (Figura 19).



**Figura 19. Simbolización del modelo conceptual de un parque eco-industrial.**

La complejidad inherente a estos sistemas tiene diferentes orígenes, tal y como se planteó en el apartado correspondiente del **Capítulo 2. Estado del Arte** (Tabla 2). Inicialmente, se puede identificar la complejidad asociada a la base teórica o a la propia filosofía del concepto de parque eco-industrial. La comprensión y puesta en práctica requiere un proceso de concienciación de los empresarios en las nuevas prácticas de ecología industrial y de formación a sus empleados. Por otro lado, cabe anotar la complejidad que surge al implementar las prácticas cooperativas. Cuanto más diverso y denso es el tejido industrial, más oportunidades de colaboración surgirán entre las empresas. No obstante, el aumento de nodos en la red incrementa la complejidad para gestionarla. Es necesario disponer de un eficiente sistema de comunicación y asesoramiento para una puesta en práctica eficaz de las cooperaciones. Además, la independencia de la empresa se puede identificar como otra fuente de complejidad. Sus relaciones sociales y decisiones individuales son autónomas y no se encuentran limitadas por un agente controlador del parque. Así, para favorecer el desarrollo y mantenimiento de las relaciones, se desea un clima de

comunicación y confianza mutua. Complementariamente a estas relaciones internas en el parque eco-industrial se deben valorar las relaciones con las entidades externas a él, como entidades gubernamentales, reguladoras o de desarrollo económico. El apoyo de las entidades socio-políticas favorecerá la creación de un clima de fiabilidad para una próspera evolución de estas experiencias innovadoras, pero indudablemente esta influencia externa aumenta la complejidad operacional. Finalmente, se anotaba la complejidad resultante del dinamismo del sistema. El sistema sufre una constante evolución sujeta a innumerables alternaciones, tanto internas como externas. El sistema debe estar preparado para adaptarse dinámicamente a ellas manteniendo su operación y cumpliendo sus objetivos. Un conocimiento detallado del entorno permite una respuesta más rápida y coherente del sistema.

A continuación se ha revisado la presencia de estas fuentes de complejidad sobre las experiencias reales recogidas en la Tabla 1. Esta revisión permite llegar a identificar las características a reproducir del modelo de operación de referencia y propias del modelo conceptual (ver Tabla 3).

Comenzando con el conocimiento teórico del concepto de parque eco-industrial a nivel de empresa, en la mayoría de las experiencias prácticas se comprueba una falta de un proceso de concienciación previo a la implementación. Esto puede ralentizar o incluso frenar el desarrollo de las redes de intercambio entre las empresas. Haskins (2006) enuncia que el conocimiento teórico sobre los conceptos de parques eco-industriales es uno de los factores críticos del éxito que emerge de los casos de estudio de la literatura. Una formación elemental acerca de los objetivos y estrategias de la ecología industrial, así como en la diseminación de casos exitosos de parques eco-industriales, aumenta las expectativas y motivación de los miembros de un parque eco-industrial o de un área industrial tradicional que se aventure en este proceso de transformación.

Acerca del proceso de gestión de la información técnica como otra de las fuentes de complejidad, se busca la existencia de una implementación metodológica de las estrategias cooperativas, la cual es clave para implementar efectivamente las estrategias sostenibles y alcanzar los objetivos de un parque eco-industrial. En el caso de las experiencias tipificadas como planificadas, PEIP, es común encontrar que en su temprano desarrollo se persigue el reclutamiento de empresas compatibles para el intercambio de recursos. Por ejemplo, las estrategias basadas en ecología industrial guían la transición de Nanning Sugar Co. Ltd. (Yang y Feng 2008) a una operación que alcanza considerables mejoras económicas así como la reducción sustancial de los impactos del entorno desde 1997 a 2004. Sin embargo, en experiencias auto-organizadas, SOS, existe una falta de estrategias tempranas que inciden en esta fuente de complejidad. Si bien, una vez que comienzan a establecerse cooperaciones se ponen en práctica estrategias que favorezcan futuras sinergias, fomentando el desarrollo de nuevos y más complejos intercambios entre las empresas, como en el caso de Kalundborg (Jacobsen 2005 citado en Chertow 2007).

En cuanto a la tercera fuente de complejidad que era originada por las decisiones individuales y relaciones sociales, se puede observar fácilmente su existencia en la mayoría de las experiencias independientemente de su tipología (PEIP, SOS, FIS, etc.). Tanto en parques planificados como auto-organizados, se observa que la confianza mutua entre las empresas es esencial para el desarrollo y mantenimiento de acciones cooperativas y alargar el horizonte de vida de los parques eco-industriales (Sterr y Ott 2004).

De acuerdo al respaldo de entidades socio-políticas, o la intervención de entidades externas en el desarrollo del eco-parque, se comprueba que su influencia existe tempranamente en las experiencias planificadas PEIP. Concretamente, la canalización de esfuerzos externos es una de las fortalezas de esta tipología. Los

parques planificados presentan un escenario seguro y fiable para el desarrollo de relaciones de colaboración. Este tipo de escenario se crea por las entidades que promocionan la implementación de los parques eco-industriales planificados, como en el United States President's Council en Desarrollo Sostenible, el cual promueve el establecimiento de estos proyectos en los Estados Unidos (Gibbs y Deutz 2005). La participación de empresas en el PEIP es promovida e incluso se financia por entidades involucradas en la creación del PEIP, mientras que la falta de soporte externo es una característica común en las etapas tempranas de los parques creados por simbiosis auto-organizada SOS. La experiencia del Parque Industrial de Burnside (Halifax, Nueva Escocia, Canadá) también demuestra la relevancia del soporte externo. Las pequeñas y medianas empresas que forman este parque pueden participar en un programa voluntario para mejorar su operación a través de las buenas prácticas medio ambientales. El apoyo de esta iniciativa es realizado por el Centro de Eco-Eficiencia de la Universidad de Dalhousie (Halifax, Nueva Escocia, Canadá), el cual es dirigido por un equipo de agentes públicos y privados, y financiado en parte por el gobierno. El programa tiene una tasa de participación exitosa y ha resultado en un gran progreso en el desarrollo de relaciones cooperativas para el intercambio de residuos entre las empresas (Côté y Crawford 2003). En cuanto a la tipología de simbiosis industrial facilitada FIS, también se detecta el éxito del apoyo externo. El Programa Nacional de Simbiosis Industrial (NISP), operativo en el Reino Unido desde hace 8 años, ha demostrado que un soporte externo es efectivo aumentando el número de intercambios activos de simbiosis industrial y en el número de empresas que participan en el programa desde 2005 a 2009. El soporte de socios externos supone un catalizador para el desarrollo de una red de cooperación entre las empresas. Sin embargo, actualmente existe un debate sobre la influencia de estos aspectos sociales en diferentes modelos de simbiosis industrial, como anotan Lombardi *et al.* (2012).



Finalmente, la consideración detallada del entorno, en su contexto más amplio, no se trata de una característica generalmente contemplada en las experiencias prácticas. Los parques eco-industriales se encuentran embebidos dentro de un entorno más amplio, en el que interactúan con otras entidades sociales, políticas, económicas o ambientales (Schlarb 2001). Cuanto más amplio y detallado sea la comprensión del entorno de un parque eco-industrial, más adaptable será el sistema a los cambios, como por ejemplo a alteraciones en la disponibilidad de materias primas, o en la demanda de productos.

Como síntesis de la revisión anterior se elabora la Tabla 3. Ésta relaciona las características propias de la complejidad de los parques eco-industriales, con su presencia en las diferentes tipologías que clasifican las experiencias prácticas de parques eco-industriales. Como resultado de esta revisión se exponen las características a reproducir del modo de operación ideal del parque eco-industrial, identificando cada una de ellas con una propiedad elemental del modelo conceptual.

**Tabla 3. Características deseadas en los parques eco-industriales.**

Ámbito de la complejidad	Presencia en experiencias reales	Propiedad del modelo conceptual	Características deseadas en el parque eco-industrial
Proceso de concienciación sobre la filosofía de la ecología industrial	Poco común en cualquier tipología	<i>SopORTE teórico</i>	Identificación de los principios de la ecología industrial en las empresas miembro del parque eco-industrial.
Gestión técnica e informativa	Destacable en experiencias PEIP, FIS y SOS	<i>Funcionalidad</i>	Implementación metodológica de las estrategias de los parques eco-industriales.
Evolución temporal y dinamismo del sistema	Poco común en cualquier tipología	<i>Adaptabilidad</i>	Consideración robusta del entorno del parque eco-industrial.
Relaciones sociales y decisiones individuales	Destacable en experiencias PEIP, FIS y SOS	<i>Durabilidad</i>	La fuerza de acuerdos entre las empresas y confianza en las relaciones.

Respaldo de las entidades socio-políticas	Destacable en experiencias PEIP, FIS, RIP y CE-EIP	<i>Clima de fiabilidad</i>	Soporte externo de los parques eco-industriales desde entidades gubernamentales y no gubernamentales.
---	--	----------------------------	---

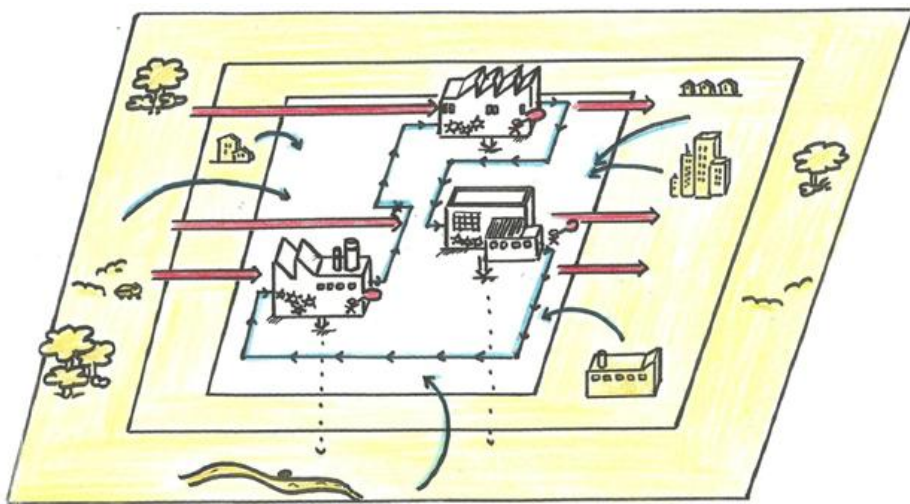
Identificadas las propiedades que deben ser integradas en el modelo conceptual abstraídas del modo de referencia, parque eco-industrial, el siguiente paso es describir los elementos del modelo que permiten su representación. Como resume la Tabla 4, se proponen tres medios principales para abordar esta tarea de conceptualización.

**Tabla 4. Medios de representación de las propiedades del modelo conceptual**

<b>Propiedad del modelo conceptual</b>	<b>Medios de representación</b>
<i>Soporte teórico</i>	(i) Objetivos del sistema y de sus elementos
<i>Funcionalidad</i>	(ii) Definición del entorno del sistema
<i>Durabilidad</i>	(iii) Relaciones externas e internas del sistema
<i>Clima de fiabilidad</i>	

Estos medios de representación se destacan sobre el esquema de simbolización conceptual de parque eco-industrial, Figura 20. Los objetivos del sistema están orientados a la mejora de la operación tanto en términos económicos como en ambientales y mediante el uso eficiente de recursos. Los objetivos de los elementos deben sintonizar con estas condiciones globales, pero además integran la perspectiva estratégica empresarial de cada componente del sistema (destacado en rojo en la Figura 20). La descripción de estos medios permite integrar las propiedades *soporte teórico* y *funcionalidad* en la implementación de las estrategias cooperativas. Seguidamente se destaca la comprensión del entorno y de las circunstancias bajo las que puede actuar su influencia (destacado en amarillo en la Figura 20) como medio para representar la propiedad *adaptabilidad*. Las relaciones del sistema se pueden

caracterizar en dos niveles, interno, entre los elementos del sistema y externos, entre el entorno y el sistema o sus elementos (destacado en azul en la Figura 20). El desarrollo de estas relaciones mediante la definición de los patrones de comportamiento y procesos de toma de decisiones individual, condicionarán las propiedades *durabilidad* y *clima de fiabilidad*. A continuación, se abordará la descripción de cada uno de estos medios de representación para documentar adecuadamente el modelo conceptual propuesto.



**Figura 20. Medios de representación de las propiedades del modelo conceptual.**

### **(i) Objetivos del sistema y de sus elementos**

Inicialmente, se describen los objetivos del sistema y de sus elementos. La caracterización de ambos conceptos servirá de medio para representar las propiedades *soporte teórico* y *funcionalidad* del modelo conceptual de parque eco-industrial.

Los objetivos que demuestran el potencial de un parque eco-industrial son tanto el beneficio económico como el ambiental, obtenidos gracias a la colaboración entre las empresas (Lowe 1997). Tal y como expresa la ecuación (1), la maximización de los beneficios económicos a través de la cooperación en el parque eco-industrial es mayor que la suma de los máximos beneficios que se pudieran alcanzar a través de la optimización individual en cada empresa. De forma similar la ecuación (2) plantea la mejora ambiental del sistema, la minimización de los impactos ambientales a través de la cooperación en el parque eco-industrial es menor que la suma de los mínimos impactos que se pudieran alcanzar a través de la optimización individual en cada empresa.

$$\max(\text{Beneficio Económico}_{\text{parque eco-industrial}}) > \sum_{i=\text{empresa } 1}^{\text{empresa } n} \max(\text{Beneficio Económico})_i \quad (1)$$

$$\min(\text{Impacto Ambiental}_{\text{parque eco-industrial}}) < \sum_{i=\text{empresa } 1}^{\text{empresa } n} \min(\text{Impacto Ambiental})_i \quad (2)$$

Estos objetivos de mejora de la operación del área industrial son el resultado de la puesta en práctica de las estrategias cooperativas. Como corrobora Ehrenfeld (2009) “*las salidas deseadas de un sistema complejo frecuentemente son propiedades emergentes de aquellos sistemas, (...) la sostenibilidad no es una propiedad, per se, sino una meta-cualidad que puede ser descrita como la posibilidad de que un sistema pueda dar las salidas deseadas en largos periodos de tiempo*”. En otras palabras, las mejoras en la operación de un parque eco-industrial, como una mejora en la conservación de los recursos o la minimización de impactos ambientales, emergen de prácticas específicas que originalmente se llevan a cabo para conseguir otros objetivos de operación, como un intercambio de subproductos o del uso compartido de infraestructura. Ambas metas operacionales medioambientales y económicas, deben ser consideradas y comprendidas por las empresas cuando ellas desarrollan la

estrategia global. Así, mediante el establecimiento de los objetivos del sistema, se materializa la puesta en práctica de las premisas teóricas de la ecología industrial que dan soporte al parque eco-industrial.

Es importante recordar que mientras la estructura del parque eco-industrial favorece y promueve la cooperación, cada empresa desarrolla su operación dentro de un marco de competición económica velando por alcanzar en todo momento sus metas individuales. Por tanto, la evolución del sistema está condicionada por el comportamiento de sus elementos individuales y sus relaciones. El número de empresas incrementa la diversidad de la red y el número de posibles combinaciones de relaciones cooperativas. Como sugiere la Ley de Metcalfe, cuantos más nodos formen parte en una red colaborativa, mayor será el valor de la red. Pero no hay que olvidar que el comportamiento del sistema se vuelve más complejo puesto que aumentan las interacciones entre los elementos y su impredecibilidad. Si bien, antes de discutir estos conceptos es preciso describir y comprender los objetivos de las empresas, los cuales condicionan los patrones anteriores.

Las empresas individuales que se emplazan en el parque eco-industrial son en sí mismas sistemas adaptativos complejos. Poseen unos objetivos económicos específicos relacionados con sus niveles de producción y con los márgenes de beneficios a obtener en su operación. El objetivo general de una empresa es maximizar estos beneficios económicos, lo cual puede cumplirse al introducir mejoras individuales, como la optimización de la producción, o aumento de la eficiencia en el uso de recursos. Además, poseen unas restricciones ambientales, estipuladas por normativa o legislación, en materias de gestión de residuos y contaminación, a los cuales se deben ajustar en su operación. Las responsabilidades sociales forman el tercer objetivo individual de empresa, aunque éstos son más abstractos y difíciles de

valorar, dependientes en la mayoría de los casos del compromiso de la gerencia de cada empresa.

Cuando una empresa desarrolla su actividad en un parque eco-industrial, las posibilidades para la mejora de su operación aumentan, pero su comportamiento y objetivos también son más complejos. Las empresas cooperadoras pueden alcanzar beneficios económicos adicionales a los alcanzados mediante la optimización individual de sus procesos. Estos beneficios económicos tangibles resultantes de la cooperación en intercambios materiales, como las ventas de subproductos, reducción de pagos de tasas de gestión de residuos, o disminución de la compra de recursos y suministros, también deben considerarse al medir los objetivos de las empresas, tal y como plantea la ecuación (3). De forma similar, se debe contemplar el beneficio conseguido mediante la reducción del impacto ambiental a través de estas prácticas cooperativas, reduciendo el consumo de recursos y de generación de residuos (4). Además, se deben incluir otros beneficios intangibles, resultantes del valor añadido por pertenecer a un parque eco-industrial, como la mejora de la imagen medioambiental, la adquisición de un perfil innovador y el aumento de confianza en las relaciones contractuales. Estos beneficios intangibles son más difíciles de medir, pero se deberán considerar en la función objetivo de beneficios globales de la empresa (5).

$$(\textit{Beneficio Económico})'_{\textit{empresa}} = (\textit{Beneficio Económico})_{\textit{empresa}} + (\textit{Beneficio Económico})_{\textit{cooperación}} \quad (3)$$

$$(\textit{Beneficio Ambiental})'_{\textit{empresa}} = (\textit{Beneficio Ambiental})_{\textit{empresa}} + (\textit{Beneficio Ambiental})_{\textit{cooperación}} \quad (4)$$

$$(\textit{Beneficio Global})'_{\textit{empresa}} = (\textit{Beneficio Económico})'_{\textit{empresa}} + (\textit{Beneficio Ambiental})'_{\textit{empresa}} + (\textit{Beneficio Social})'_{\textit{empresa}} \quad (5)$$

## (ii) Definición del entorno del sistema

Seguidamente, se aborda la definición del entorno del parque eco-industrial. La descripción del entorno se empleará para representar la propiedad *adaptación* del modelo conceptual. Una descripción de los límites del sistema real parque eco-industrial, como se representaba en la Figura 20, ofrece un punto de partida para determinar dónde acaba el parque eco-industrial y dónde empieza el entorno.

Los límites del sistema están influenciados por la distancia física entre las empresas (Chertow 2000, Fernández 2009). El aumento de la distancia favorece la diversificación de las empresas y promueve la variedad de los flujos. Sin embargo, el aumento de la distancia también causa que algunos intercambios sean inviábiles debido al aumento de los costes de distribución y en la disminución de la calidad de algunos flujos, como el energético o de vapor. Estos límites espaciales deben alcanzar, por tanto, un compromiso entre la diversidad de empresas y la viabilidad económica de los intercambios. Un parque eco-industrial, como se ha planteado anteriormente, se encuentra embebido en un entorno más amplio, formado a su vez por sistemas, siendo éste variable e imperfecto. La comprensión del entorno y de sus mecanismos de relación con el parque eco-industrial, son necesarios para predecir la adaptabilidad de la operación del sistema de estudio.

A partir de la revisión de la literatura científica, abordada en el apartado correspondiente del **Capítulo 2. Estado del arte**, se propone plantear el entorno del parque eco-industrial desde una perspectiva de sistemas jerárquicos anidados, combinando el enfoque que se sugiere en trabajos previos (Kay 2002, Bakshi y Fiksel 2003). Si bien, se anotaba la necesidad de completar la descripción de estos sistemas anidados sin limitarse a las propuestas de entorno natural o entorno económico.

La categorización de los sistemas anidados que forman el entorno del parque eco-industrial se ha apoyado tanto en la identificación de los factores influyentes sobre el sistema, como en la de los flujos que circulan a través del sistema. Estos factores se detallan en el siguiente apartado relativo a **(iii) Relaciones externas e internas del sistema**. La enumeración de los flujos ha sido inspirada por la teoría del capitalismo natural (Kuo y Hsiao 2008, Lovins y Lovins 2001). El capitalismo natural es una propuesta para el desarrollo socioeconómico que reconoce la interdependencia de la economía global de los recursos naturales y propone los medios para el uso racional del capital natural, como la reinversión de parte de los beneficios económicos en la conservación de los recursos naturales. En base a las premisas de esta teoría se identifican cuatro tipos de flujos o capitales que fluyen desde el entorno a través del sistema de parque eco-industrial. Desde el sistema natural surge el capital natural, es decir el flujo material de recursos naturales, que se transforman en el sistema parque eco-industrial generando el flujo residual que se deposita en el entorno natural. Desde el sistema social fluye el capital social, que se refiere al flujo de capital humano, incluyendo la mano de obra y conocimiento. Desde el sistema económico el correspondiente capital financiero y flujos monetarios. Finalmente, del sistema de estudio embebido en los sistemas anteriores, surge el capital manufacturado y los flujos técnicos asociados a los medios para conseguir ese capital. Así, el marco de sistemas anidados propuesto para comprender el entorno de un parque eco-industrial se basa en la observación de que el área industrial desarrolla sus funciones, forma parte y está regulado por tres tipos de sistemas, natural, social y económico.

La representación de estos tres sistemas sigue el esquema planteado en la Figura 21, siendo el sistema natural el de mayor extensión, dentro de éste el sistema social, y dentro del segundo, el sistema económico. El sistema natural sustenta y rodea al resto de sistemas anidados, produce los recursos naturales y ofrece el soporte físico, aunque su dinámica puede distorsionar a los sistemas que engloba. El sistema social es visto



como un sistema desarrollado dentro del natural. Los seres humanos se organizan en subsistemas con estructuras jerárquicas para desarrollar diferentes actividades y alcanzar los objetivos sociales y económicos. La evolución de estos subsistemas sociales se determina por cada contexto cultural, político y organizacional, así como por el marco económico. Pero el marco económico no solamente establece las reglas para el desarrollo de las organizaciones sociales, mercados, e industrias, sino que también es producto del sistema social. Por tanto, los límites de los sistemas social y económico se consideran entrelazados, como la Figura 21 ilustra mediante una línea discontinua separando ambos. El parque eco-industrial se considera un tipo de subsistema orientado específicamente a la actividad industrial con la perspectiva del desarrollo sostenible y cooperativo. El sistema parque eco-industrial se ubica en el nivel más bajo de los sistemas anidados, viéndose influenciado por el resto de sistemas anidados, y por tanto debe adaptarse a las alteraciones de su entorno.

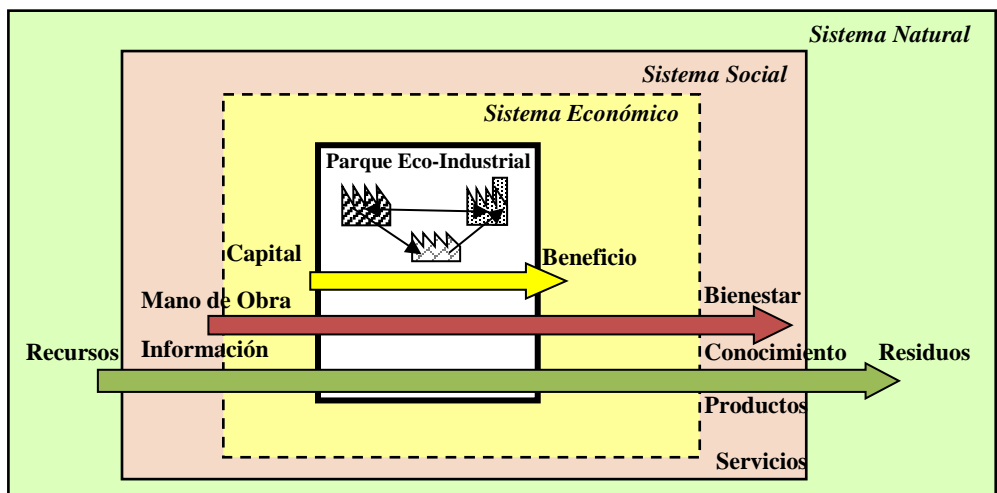
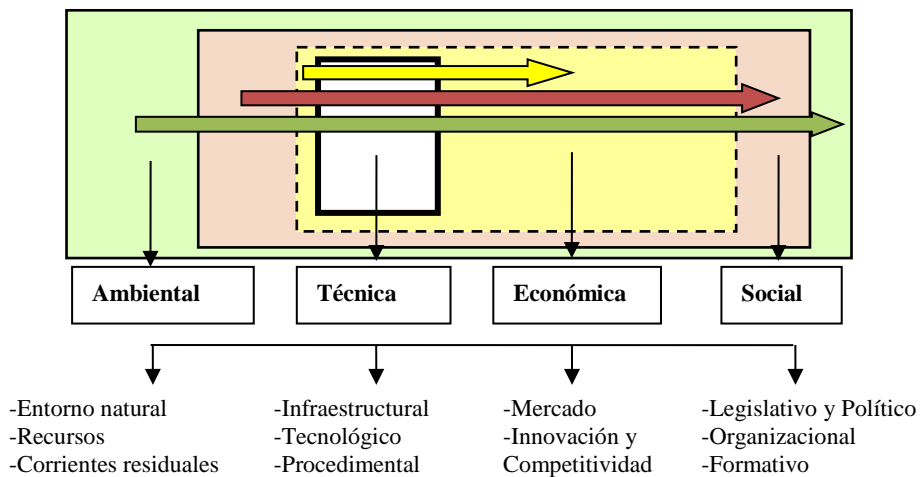


Figura 21. Entorno de sistemas jerárquicos anidados y flujos circulares.

### (iii) Relaciones externas e internas del sistema

Finalmente, es preciso describir los mecanismos de relación del sistema, tanto externos con su entorno, como internos entre los componentes del sistema. Comprender la dinámica de estas relaciones permite representar las propiedades *fiabilidad* y *durabilidad* del modelo conceptual. Estas relaciones externas e internas, de competición, cooperación y comercio, resultan de las decisiones individuales de las empresas, causando cambios sobre los flujos que circulan en el sistema y condicionando su evolución.

La descripción de las relaciones externas se basa en la identificación de los factores del entorno que influyen sobre el parque eco-industrial. Estos factores se han clasificado en cuatro categorías relacionadas con los sistemas jerárquicos anidados que forman el entorno y los correspondientes flujos que surgen desde ellos, factores medioambientales, sociales, económicos y técnicos (Figura 22).



**Figura 22. Categorías de factores y subcategorías según los sistemas jerárquicos anidados del entorno.**

El sistema natural define la categoría medioambiental de factores influyentes, determinando qué alteraciones pueden actuar sobre los flujos de recursos naturales y residuales. Esta categoría incluye las entradas asociadas a la producción y las salidas del parque eco-industrial, así como la capacidad del entorno natural para absorber esos flujos. El sistema social es el origen de los factores influyentes de la categoría social, incluyendo patrones de comportamiento y relacionales que se crean tanto espontáneamente como normativamente. El sistema económico es el origen del flujo monetario que fluye en el sistema definiendo los factores influyentes de categoría económica. Esta categoría considera la influencia del mercado sobre las empresas y las fluctuaciones en el precio de los subproductos de la red de intercambio del parque eco-industrial. El parque eco-industrial que se correspondería con el sistema técnico enuncia la categoría técnica donde se recogen los factores relacionados con los flujos de productos y servicios, así como los que soportan la implementación de estrategias sostenibles. La Tabla 5 plantea una breve descripción de las categorías de factores y las subcategorías expuestas.

**Tabla 5. Descripción de categorías de factores y subcategorías.**

<b>Categoría</b>	<b>Subcategorías</b>	<b>Definición de subcategoría de factores influyentes</b>
<b>Medioambiental</b>	<i>Entorno Natural</i>	Capacidad del entorno natural para absorber los impactos generados por el sistema.
	<i>Recursos</i>	Relacionados con las entradas del sistema natural al sistema parque eco-industrial.
	<i>Corriente de residuos</i>	Relacionados con las salidas del sistema parque eco-industrial al entorno natural.
<b>Social</b>	<i>Legal y político</i>	Iniciativas legales o políticas del entorno para promover comportamientos específicos dentro del sistema parque eco-industrial.
	<i>Organizacional</i>	Patrones de comportamiento y relacionales que se soportan en la normativa del sistema parque eco-industrial.
	<i>Formativo</i>	Patrones operacionales que surgen de doctrinas educativas.

<b>Económico</b>	<i>Mercado</i>	Relacionados con el desarrollo económico de las actividades productivas.
	<i>Innovación y competitividad</i>	Prácticas empresariales orientadas a mejorar la operación y alcanzar mayores beneficios.
<b>Técnico</b>	<i>Infraestructural</i>	Infraestructuras y servicios orientados a la implementación de sistemas más sostenibles.
	<i>Tecnológicos</i>	Medios de producción orientados a aumentar la eficiencia operativa.
	<i>Procedimental</i>	Métodos de trabajo orientados a prácticas más sostenibles.

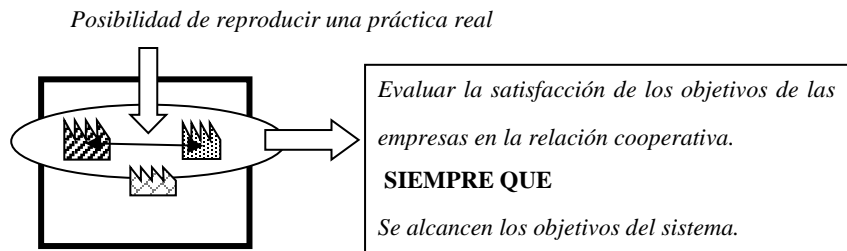
---

Así, se identifica la influencia de los sistemas jerárquicos que forman el entorno, los cuales pueden alterar la evolución del parque eco-industrial modificando los flujos de cada naturaleza que circulan a través de él. La materialización de estos efectos debe ser posteriormente descrito de forma analítica.

En cuanto a las relaciones internas, los componentes del sistema interaccionan para la implementación de las estrategias cooperativas de ecología industrial, tanto la red de intercambios materiales como para el uso compartido de servicios e infraestructuras comunes. La filosofía del parque eco-industrial promueve el desarrollo de estas colaboraciones, pero la participación en ellas dependerá de la decisión última de la empresa.

El modelo conceptual contempla la consulta a una base de conocimiento, en la que se almacenan datos de prácticas reales de simbiosis industrial. Ésta base de conocimiento sirve de referencia para detectar las oportunidades ofrecidas por la población de empresas que forma el parque eco-industrial de estudio. Cuando se detecta una relación identificada en la base de conocimiento como oportunidad de sinergia entre las empresas del modelo conceptual, debe entrar en funcionamiento un mecanismo de evaluación de objetivos individuales de la empresa y la posterior negociación con la otra empresa involucrada. Las empresas establecen una relación

cooperativa cuando alcanzan satisfactoriamente sus objetivos individuales, siempre y cuando esto contribuya a mejorar la operación global del sistema (Figura 23).



**Figura 23. Relaciones internas entre empresas y proceso de evaluación.**

La descripción de los mecanismos de relación externos e internos, permiten representar las propiedades *durabilidad* y *fiabilidad*. Con estas dos últimas propiedades se completa la caracterización del modelo conceptual.

*¿Cómo expreso analíticamente las particularidades  
identificadas del parque eco-industrial?*

### **3.3. Desarrollo del modelo analítico de parque eco-industrial**

El modelo analítico formaliza las proposiciones planteadas en el modelo conceptual mediante expresiones matemáticas o lógicas, dando soporte al proceso de inferencia. La formalización del modelo analítico se apoya en una de las técnicas específicas que se revisaron en el **Capítulo 2. Estado del Arte** (dinámica de sistemas, modelado basado en agentes, o modelos híbridos). La técnica más apropiada se escoge a partir de las propiedades que se desean representar en el modelo conceptual.

El modelo conceptual integra las propiedades de *soporte teórico, funcionalidad, durabilidad, clima de fiabilidad y adaptabilidad*, las cuales se representan mediante **(i) objetivos del sistema y de sus elementos, (ii) definición del entorno del sistema y (iii) relaciones externas e internas del sistema** (Tabla 4). Estas particularidades han de expresarse formalmente en esta etapa identificando variables cuantificables del sistema y sus relaciones de dependencia. Los objetivos del sistema, acerca de los beneficios económicos y ambientales, deben expresarse cuantitativamente haciendo también referencia a los elementos del sistema. Así estos elementos individuales precisan de una caracterización propia, para soportar la evaluación de sus propios objetivos, como de los globales del sistema. En cuanto a la descripción analítica de los mecanismos de relación internos, debe integrar la detección de oportunidades de

colaboración, la evaluación de las decisiones de las partes involucradas en la colaboración, así como la formalización de la colaboración y adaptación del sistema a la nueva situación de operación. La descripción de las relaciones externas, se apoya tanto en la descripción del entorno como en la capacidad del sistema en adaptarse a los cambios externos.

De acuerdo a la revisión de los paradigmas de modelado analítico de sistemas complejos planteada en apartado correspondiente del **Capítulo 2. Estado del Arte**, el paradigma de modelado basado en agentes se trata de la técnica más adecuada para representar integralmente las particularidades anteriormente descritas del modelo conceptual. La técnica de dinámica de sistemas representa igualmente los objetivos del sistema y su evolución en el tiempo, permitiendo además valorar las relaciones de realimentación con el entorno mediante la definición de lazos causales. La notación de los lazos causales empleada en dinámica de sistemas permite identificar intuitivamente la relación de refuerzo o compensación entre dos variables. Sin embargo, la técnica de dinámica de sistemas no facilita la consideración de los elementos que forman el sistema, hasta el nivel de detalle requerido por el modelo conceptual para valorar las cooperaciones. La perspectiva *bottom-up* de la técnica de modelado basado en agentes permite la descripción del sistema complejo como un conjunto de agentes autónomos, correspondientes a cada una de las empresas emplazadas en el parque eco-industrial. Estos agentes se caracterizan a través de sus propiedades, objetivos y reglas de comportamiento, las cuales les da la capacidad de interactuar entre sí y con su entorno. Esto permite evaluar explícitamente las propiedades de las empresas, y por tanto valorar el desarrollo de redes de colaboración dentro de un sistema de flujos conocidos. Si bien la relación causa-efecto sugerida en la dinámica de sistemas no es directamente simbolizada en el modelo basado en agentes, pero esta influencia se puede codificar mediante reglas de comportamiento quedando la interacción oculta durante la simulación del modelo.

Además es posible incluir modos de aprendizaje complejo en las reglas de comportamiento de los agentes, lo cual refleja más fielmente el comportamiento socio-técnico del sistema real. Su perspectiva inductiva permite inferir la evolución del sistema a partir del comportamiento de las entidades que lo forman y el progreso de sus relaciones. Los modelos híbridos se desestiman por la falta de herramientas computacionales para su implementación.

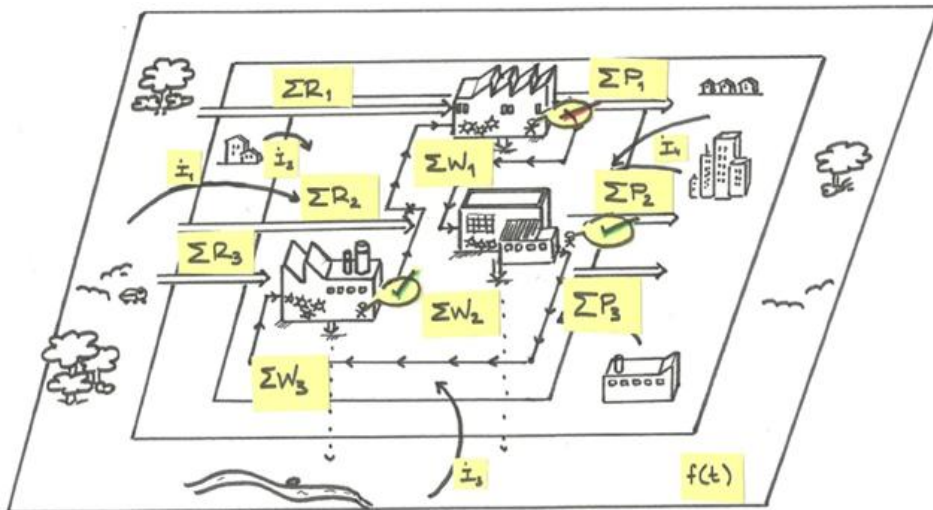
Por tanto, la definición del modelo descriptivo y analítico se plantea según la técnica de modelado basado en agentes. Esta formalización del modelo conceptual se apoya en los siguientes cinco bloques de modelado: **(a) agentes, (b) población de agentes, (c) objeto de la simulación, (d) paradigma de interacción y (e) capacidad de adaptación** (Billari *et al.* 2006 y Weiss 1999, citados en Barbat *et al.* 2012). La Tabla 6 resume la relación de los medios de representación de las propiedades del modelo conceptual con estos cinco bloques de modelado.

**Tabla 6. Relación entre los medios de representación y los bloques de modelado analítico**

Medios de representación	Bloques de modelado analítico				
	(a) Agentes	(b) Población de agentes	(c) Objeto de la simulación	(d) Paradigma de interacción	(e) Capacidad de adaptación
(i) Objetivos del sistema y de sus elementos	X	X	X		
(ii) Definición del entorno del sistema					X
(iii) Relaciones externas e internas del sistema		X		X	X

A continuación se plantearán las expresiones analíticas que permiten modelar cada uno de los bloques de modelado propuestos, los cuales se corresponden con los elementos del modelo conceptual como se indica en la Figura 24.





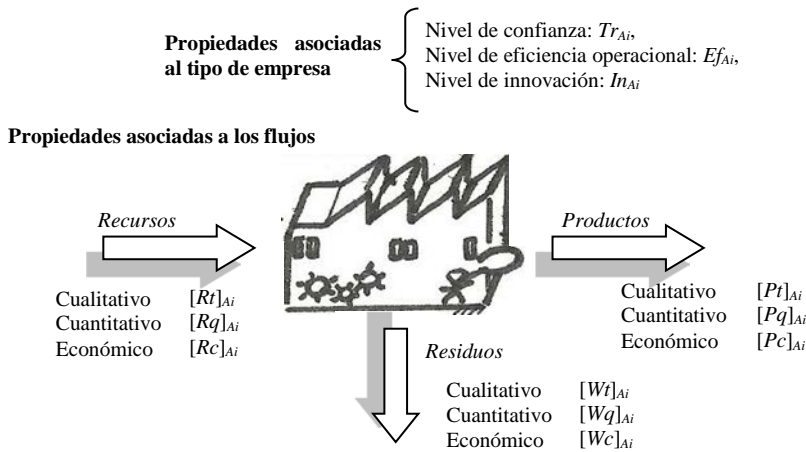
**Figura 24. Variables analíticas sobre la simbolización del modelo conceptual de parque eco-industrial.**

#### (a) Agentes

La descripción del modelo analítico comienza definiendo las características del bloque de modelado o elemento constructivo básico del paradigma de modelado, los agentes.

Los agentes que forman el sistema serán las empresas individuales, que poseen objetivos concretos, como la maximización de su beneficio económico. Cada agente debe poseer independencia, capacidad social, re-actividad y pro-actividad, justificando ésta última su comportamiento orientado a objetivos (Wooldridge y Jenning 1995). Por tanto, estos agentes serán definidos de forma unívoca por un conjunto de propiedades y reglas de comportamiento que las otorgan la independencia y capacidad para establecer relaciones orientadas a objetivos, favoreciendo así la heterogeneidad de la población.

Cada agente  $A_i$ , del modelo se describe mediante un conjunto de propiedades que condicionan tanto su operación, como sus mecanismos de relación con otros agentes. Estas propiedades se definen como vectores de información cualitativa y cuantitativa relativa a la empresa. Dentro de éstas se distinguen las propiedades asociadas a los flujos que circulan a través del sistema y las propiedades asociadas al tipo de empresa que condicionan el comportamiento social (Figura 25). Las propiedades asociadas a los flujos que circulan a través del sistema se refieren a características técnicas cualitativas, cuantitativas y económicas de los flujos materiales que son consumidos ( $R$ , recursos) y generados por las empresas ( $P$ , productos y  $W$ , residuos). Estas propiedades están directamente relacionadas con las funciones de producción. Las propiedades técnicas ofrecen información sobre la naturaleza del flujo ( $t$ ) y cantidades de materia ( $q$ ) que circulan a través de cada agente. Esta información es necesaria para poder analizar las posibilidades de colaboración. Además, se definen las propiedades económicas, referentes al valor monetario de los flujos físicos que circulan por la empresa ( $c$ ), los costes de los recursos, de la gestión de residuos o del precio de venta de sus productos. Esta información económica rige las transacciones comerciales de los agentes. Las propiedades asociadas al tipo de empresa tratan de representar las características independientes a los flujos físicos que hacen referencia al comportamiento social de la empresa ( $Tr$ ,  $Ef$ ,  $In$ ).



**Figura 25. Estructura de un agente del modelo analítico.**

$$A_i = \{[Rt]_i, [Rq]_i, [Rc]_i, [Wt]_i, [Wq]_i, [Wc]_i, [Pt]_i, [Pq]_i, [Pc]_i, Ep, Tr, Ef, In\}_{A_i} \quad (6)$$

Para cada agente  $A_i$ , las propiedades asociadas a los flujos vienen dadas por un conjunto de 10 vectores fila. Cada elemento del vector de propiedades (6) es a su vez un vector individual que está compuesto por un listado de elementos que aportará la información específica, como plantea la Tabla 7. En el caso de los tres primeros vectores,  $[Rt]_{A_i}$ ,  $[Rq]_{A_i}$ ,  $[Rc]_{A_i}$ , que tienen una dimensión  $1 \times n_R$ , se refieren a las propiedades de tipo, cantidad y coste del flujo recursos del agente. Los tres vectores siguientes,  $[Wt]_{A_i}$ ,  $[Wq]_{A_i}$ ,  $[Wc]_{A_i}$ , de dimensión  $1 \times n_W$ , se refieren a las propiedades de tipo, cantidad y coste de los residuos respectivamente. Y los tres posteriores de dimensión  $1 \times n_P$ ,  $[Pt]_{A_i}$ ,  $[Pq]_{A_i}$ ,  $[Pc]_{A_i}$ , a las propiedades de tipo, cantidad y precio de los productos. El último parámetro relacionado con los flujos es  $Ep_{A_i}$ , que representa el beneficio económico. Este valor, resultante de la combinación de otras propiedades del agente, es indicativo de la evolución económica de la empresa, siendo su evaluación necesaria para la toma de decisiones.

**Tabla 7. Propiedades de los agentes asociadas a los flujos.**

Propiedades asociadas a flujos		Expresiones
$Rt_{Ai}$	Tipos de recursos consumidos	$[Rt]_{A_i} = [rt_1, rt_2, \dots, rt_j, \dots, rt_{n_R}]_{A_i}$ $rt_j = \{\text{Nombre del recurso}\}$ $j = 1, \dots, n_R$
$Rq_{Ai}$	Cantidades de recursos consumidos	$[Rq]_{A_i} = [rq_1, rq_2, \dots, rq_j, \dots, rq_{n_R}]_{A_i}$ $rq_j \in \mathfrak{R}$ $j = 1, \dots, n_R$ $RQ_{A_i} = \left[ \sum_{j=1}^{n_R} rq_j \right]_{A_i}$
$Rc_{Ai}$	Costes unitarios de recursos consumidos	$[Rc]_{A_i} = [rc_1, rc_2, \dots, rc_j, \dots, rc_{n_R}]_{A_i}$ $rc_j \in \mathfrak{R}$ $j = 1, \dots, n_R$
$Wt_{Ai}$	Tipos de residuos generados	$[Wt]_{A_i} = [wt_1, wt_2, \dots, wt_k, \dots, wt_{n_W}]_{A_i}$ $wt_k = \{\text{Nombre del residuo}\}$ $k = 1, \dots, n_W$
$Wq_{Ai}$	Cantidades de residuos generados	$[Wq]_{A_i} = [wq_1, wq_2, \dots, wq_k, \dots, wq_{n_W}]_{A_i}$ $wq_k \in \mathfrak{R}$ $k = 1, \dots, n_W$ $WQ_{A_i} = \left[ \sum_{k=1}^{n_W} wq_k \right]_{A_i}$
$Wc_{Ai}$	Costes unitarios de gestión de los residuos generados	$[Wc]_{A_i} = [wc_1, wc_2, \dots, wc_k, \dots, wc_{n_W}]_{A_i}$ $wc_k \in \mathfrak{R}$ $k = 1, \dots, n_W$
$Pt_{Ai}$	Tipos de productos fabricados	$[Pt]_{A_i} = [pt_1, pt_2, \dots, pt_m, \dots, pt_{n_P}]_{A_i}$ $pt_m = \{\text{Nombre del producto}\}$ $m = 1, \dots, n_P$
$Pq_{Ai}$	Cantidades de productos fabricados	$[Pq]_{A_i} = [pq_1, pq_2, \dots, pq_m, \dots, pq_{n_P}]_{A_i}$ $pq_m \in \mathfrak{R}$ $m = 1, \dots, n_P$
$Pc_{Ai}$	Precios unitarios de venta de los productos fabricados	$[Pc]_{A_i} = [pc_1, pc_2, \dots, pc_m, \dots, pc_{n_P}]_{A_i}$ $pc_m \in \mathfrak{R}$

$Ep_{Ai}$	Beneficio obtenido de la venta de los productos	$m = 1, \dots, n_p$ $Ep_{Ai} = [Pq]_{Ai} \cdot [Pc]_{Ai}^T - ([Rq]_{Ai} \cdot [Rc]_{Ai}^T + [Wq]_{Ai} \cdot [Wc]_{Ai}^T)$
-----------	---	--

Las tres últimas propiedades indicadas en la ecuación (6) se asocian al tipo de empresa y condicionan su comportamiento social. Éstas se relacionan con la percepción de los agentes, tales como la confianza que ofrece una empresa a las demás para establecer relaciones comerciales  $Tr_{Ai}$ , la eficiencia operacional que refleja una mejor imagen medioambiental de la empresa  $Ef_{Ai}$ , o la iniciativa respecto al desarrollo de nuevas estrategias innovadoras  $In_{Ai}$ . Estas propiedades se definen como escalares aleatorios, cuyo valor estará condicionado por la categoría de agente, como resume la Tabla 8. Estas propiedades asociadas al tipo de empresa, categorías que serán descritas en el apartado **(b) Población de agentes**, pretenden reflejar la heterogeneidad de una población real tanto en sus características como en sus decisiones. Los criterios empleados en la toma de decisiones del mundo real no solamente se basan en aspectos cuantificables, como un ahorro económico o disminución de los impactos ambientales, sino también en aspectos más intangibles relacionados con la política de la empresa que evalúan las nuevas oportunidades desde un punto de vista estratégico a medio o largo plazo.

**Tabla 8. Propiedades de los agentes asociadas al tipo de empresa.**

Propiedades asociadas al tipo de empresa		Expresiones
$Tr_{Ai}$	Nivel de confianza	Si $A_i \in \text{Agente Tradicional} \rightarrow Tr_{Ai} \in (1,2)$ $Tr_{Ai} > (Ef_{Ai}, In_{Ai})$
$Ef_{Ai}$	Nivel de eficiencia operacional	Si $A_i \in \text{Agente Ecológico} \rightarrow Ef_{Ai} \in (1,2)$ $Ef_{Ai} > (Tr_{Ai}, In_{Ai})$
$In_{Ai}$	Nivel de innovación	Si $A_i \in \text{Agente Estratégico} \rightarrow In_{Ai} \in (1,2)$ $In_{Ai} > (Tr_{Ai}, Ef_{Ai})$

Finalmente se hace referencia a las reglas de comportamiento de los agentes, las cuales están orientadas a satisfacer sus objetivos. Los objetivos de las empresas planteados en el modelo conceptual (expresiones (3) y (4)) deben expresarse en función de las propiedades de los agentes, según las expresiones (7) y (9). Por un lado, el beneficio económico individual obtenido a través de la cooperación (8) implica beneficios económicos en caso de que se participe intercambiando una cantidad  $q_x$  de subproductos. Bien por la venta del residuo, o por el ahorro en la compra de recursos. O en su caso, por el aprovechamiento de las economías de escala al hacer un uso compartido en una cantidad  $q_x$  de un servicio común. El impacto ambiental se mejora también mediante la cooperación reduciendo el depósito de residuos y consumo de recursos en la cantidad correspondiente  $q_x$  (10). Los beneficios intangibles se deducen a partir de la mejora de las propiedades asociadas al tipo de empresa, las cuales incrementan su valor al participar en las cooperaciones (11).

$$Ep'_{Ai} = Ep_{Ai} + Ep(q_x)_{Ai}|_{coop.} \quad (7)$$

$$Ep(q_x)_{Ai}|_{coop.} = (Wq_x \cdot Wc)_{residuo\ vendido} + (Rq_x \cdot Rc)_{recurso\ ahorrado} + Ep(q_x)_{servicio\ compartido} \quad (8)$$

$$EI'_{Ai} = EI_{Ai} - EI(q_x)_{Ai}|_{coop.} \quad (9)$$

$$EI(q_x)_{Ai}|_{coop.} = (Wq_x)_{residuo\ vendido} + (Rq_x)_{recurso\ ahorrado} \quad (10)$$

$$SB(q_x)_{Ai}|_{coop.} = Tr_{Ai}' + Ef_{Ai}' + In_{Ai}' \quad (11)$$

El criterio que rige sus decisiones (cooperar o no cooperar) viene condicionado por el grado de satisfacción de los objetivos de los agentes. Este grado de satisfacción

se representa por medio de la función de utilidad  $P(q_x)$ , la cual es función de la estrategia que escoge el agente  $A_i$  en su interacción con otro agente (12). Las estrategias vendrán definidas según la cantidad  $q_x$  del flujo que intervendrá en la cooperación. La función de utilidad se expresa como la combinación de cuatro índices que valoran desde diferente perspectiva la ganancia obtenida con cada estrategia escogida (Tabla 9).

$$P(q_x)_{A_i} = \alpha_{A_i} \cdot iEP(q_x)_{A_i} + \beta_{A_i} \cdot iEI(q_x)_{A_i} + \gamma_{A_i} \cdot iSP(q_x)_{A_i} + \delta(q_x)_{A_i} \quad (12)$$

**Tabla 9. Parámetros de la función de utilidad.**

Parámetros de la función de utilidad		Expresiones
$q_x$	Estrategia dada por la cantidad que entra en juego en la cooperación	$q_x \in [\min(rq_{A_i}, wq_{A_i}), 0]$
$iEP_{A_i}$	Índice económico de la empresa.	$iEP(q_x)_{A_i} = \frac{Ep(q_x)_{A_i}  _{coop.}}{Ep_{A_i}  _{non-coop.}}$
$iEI_{A_i}$	Índice medioambiental de la empresa.	$iEI(q_x)_{A_i} = \frac{WQ(q_x)_{A_i}  _{coop.}}{WQ_{A_i}  _{non-coop.}} + \frac{RQ(q_x)_{A_i}  _{coop.}}{RQ_{A_i}  _{non-coop.}}$
$iSB_{A_i}$	Índice estratégico de la empresa.	$iSB_{A_i} = \frac{Tr_{A_i} + Ef_{A_i} + In_{A_i}  _{coop.}}{Tr_{A_i} + Ef_{A_i} + In_{A_i}  _{non-coop.}}$
$\alpha_{A_i}$	Coficiente del beneficio económico	$\alpha_{A_i} \in (0,1)$
$\beta_{A_i}$	Coficiente del impacto medioambiental	$\beta_{A_i} \in (0,1)$
$\gamma_{A_i}$	Coficiente del beneficio estratégico	$\gamma_{A_i} \in (0,1)$
$\delta_{A_i}$	Grado de conveniencia de la estrategia	$\delta_{A_i} = \delta(q_x, Categoría\ Agente) = [-1,0,1]$

El índice económico ( $iEP$ ) compara el beneficio económico que obtiene la empresa en la situación de cooperación, respecto al beneficio económico obtenido en

una situación de no cooperación. El índice medioambiental (*iEI*) compara la mejora ambiental de la empresa (causado por la reducción en el consumo de recursos y en la generación de residuos) en la situación de cooperación, respecto al impacto ambiental causado en una situación de no cooperación. El índice estratégico (*iSP*) evalúa la mejora estratégica de la empresa comparando los valores de las propiedades asociadas al tipo de empresa en la situación de cooperación, respecto a sus valores en una situación de no cooperación. Estos tres índices tienen asociados unos coeficientes ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ) cuya finalidad es ponderar, de acuerdo al tipo de empresa, la aportación de cada uno de estos índices a la función de utilidad. El último parámetro de la función de utilidad se denomina el grado de conveniencia de la estrategia ( $\delta$ ). Este índice tomará un valor entre [1, 0, -1] según la estrategia sea favorable, indiferente o desfavorable, en función del tipo de empresa, como se verá en el apartado **(b) Población de agentes**. En esencia, los objetivos de los agentes serán función del tipo de empresa. Por lo que en el apartado siguiente se exponen las premisas que rigen las decisiones de cada categoría de agente.

### **(b) Población de agentes**

La población de agentes es función del sistema real que se quiere representar. Con la finalidad de recoger la variabilidad y heterogeneidad del mundo real, en este modelo se ha optado por definir tres tipos de empresas o categorías de agentes. Éstas se diferencian según el planteamiento de sus estrategias en la toma de decisiones.

Los tres tipos de empresas o categorías de agente son: *Agente Tradicional*, *Agente Ecológico* y *Agente Estratégico*. Estas categorías de agente se diferencian en los valores asignados a las propiedades asociadas al tipo de empresa, en los coeficientes de la función de utilidad y en el grado de conveniencia de la estrategia, según su papel de *Compradora* o *Vendedora* en una relación de intercambio de subproductos (Tabla 10).



**Tabla 10. Categorías de agentes y parámetros condicionados a ellas.**

Categorías de agentes		<i>Tradicional</i>	<i>Ecológico</i>	<i>Estratégico</i>
Propiedad asociada al tipo de empresa		$Tr_{A_i} \in (1,2)$	$Ef_{A_i} \in (1,2)$	$In_{A_i} \in (1,2)$
		$Tr_{A_i} > (Ef_{A_i}, In_{A_i})$	$Ef_{A_i} > (Tr_{A_i}, In_{A_i})$	$In_{A_i} > (Tr_{A_i}, Ef_{A_i})$
Coeficientes de la función de utilidad		$\alpha_{A_i} \in (0,1)$	$\beta_{A_i} \in (0,1)$	$\gamma_{A_i} \in (0,1)$
		$\alpha_{A_i} > (\beta_{A_i}, \gamma_{A_i})$	$\beta_{A_i} > (\alpha_{A_i}, \gamma_{A_i})$	$\gamma_{A_i} > (\alpha_{A_i}, \beta_{A_i})$
Grado de conveniencia de la estrategia	<i>Compradora</i>	$\delta_{A_i}(q_x) = \begin{cases} q_x > rq_{A_i} \rightarrow \delta = -1 \\ q_x = rq_{A_i} \rightarrow \delta = 1 \\ q_x < rq_{A_i} \rightarrow \delta = q_x/rq_{A_i} \in (0,1) \\ q_x = 0 \rightarrow \delta = 0 \end{cases}$	$\delta_{A_i}(q_x) = \begin{cases} q_x > rq_{A_i} \rightarrow \delta = -1 \\ q_x = rq_{A_i} \rightarrow \delta = 1 \\ q_x < rq_{A_i} \rightarrow \delta = -1 \end{cases}$	$\delta_{A_i}(q_x) = \text{random}[-1,0,1]$
	<i>Vendedora</i>	$\delta_{A_j}(q_x) = \begin{cases} q_x > wq_{A_j} \rightarrow \delta = -1 \\ q_x = wq_{A_j} \rightarrow \delta = 1 \\ q_x < wq_{A_j} \rightarrow \delta = -1 \\ q_x = 0 \rightarrow \delta = 0 \end{cases}$	$\delta_{A_j}(q_x) = \begin{cases} q_x > wq_{A_j} \rightarrow \delta = -1 \\ q_x = wq_{A_j} \rightarrow \delta = 1 \\ q_x < wq_{A_j} \rightarrow \delta = 0 \\ q_x = 0 \rightarrow \delta = -1 \end{cases}$	$\delta_{A_j}(q_x) = \text{random}[-1,0,1]$

La categoría *Agente Tradicional* agrupa empresas cuya propiedad de confianza empresarial  $Tr_{A_i}$  es la más destacable entre las asociadas al tipo de empresa. Este tipo de empresa prioriza la obtención de beneficios económicos a la hora de establecer una cooperación. Por ello, en el cálculo de su función de utilidad el coeficiente prioritario es  $\alpha$ , ya que el índice económico, *iEP*, es determinante para hallar la utilidad de cada estrategia en una interacción de cooperación. El grado de conveniencia de la estrategia se ve favorecido cuanto más se ajuste la cantidad intercambiada  $q_x$  a la cantidad disponible del flujo correspondiente (residuo o recurso en su caso).

La categoría *Agente Ecológico* agrupa a empresas cuya propiedad de eficiencia operacional  $Ef_{A_i}$  es la más destacable entre las asociadas al tipo de empresa. Este tipo de empresa busca reducir sus impactos sobre el entorno a través de las relaciones cooperativas. Por tanto, en el cálculo de su función de utilidad el coeficiente

prioritario es  $\beta$ , ya que el índice ambiental,  $iEI$ , es determinante para hallar la utilidad de cada estrategia en una interacción de cooperación. El grado de conveniencia de la estrategia se ve favorecido por la compra o venta de la cantidad completa del flujo correspondiente.

La categoría *Agente Estratégico* agrupa a empresas cuya propiedad de nivel de innovación  $In_{Ai}$  es la más destacable entre las asociadas al tipo de empresa. Este tipo de empresa pretende mejorar su imagen y perspectiva social a través de la cooperación. Así, en el cálculo de su función de utilidad el coeficiente prioritario es  $\gamma$ , ya que el índice estratégico,  $iSP$ , es determinante para hallar la utilidad de cada estrategia en una interacción de cooperación. En este tipo de empresa, el grado de conveniencia de la estrategia es aleatorio.

### **(c) Objeto de la simulación**

El objeto de la simulación es conocer si en la evolución del sistema se desarrollan redes de colaboración, y se cumplen los criterios de maximización del beneficio económico y minimización del impacto medio ambiental, ecuaciones (1) y (2). Una relación de colaboración entre dos empresas se formaliza cuando ambas satisfacen sus objetivos; pero también se debe comprobar que esa relación mejora la situación económica y medioambiental del conjunto de empresas.

Para medir estas mejoras se proponen unos indicadores que evalúan la evolución del sistema a través de la formalización de las relaciones cooperativas. En cada iteración<sup>2</sup> se evalúa si la cooperación planteada por las empresas supone una mejora

---

<sup>2</sup> Entendiendo iteración como el periodo de tiempo en el que se llevan a cabo la evaluación de una serie de procedimientos sobre el modelo.

económica y ambiental para el conjunto del parque eco-industrial, según los siguientes indicadores:

- *Número de agentes (N)*. Contabiliza el número de empresas que componen el sistema. Este indicador puede variar ya que si una empresa entra en pérdidas económicas, desaparece del sistema.
- *Número de links (L)*. Número de relaciones cooperativas desarrolladas entre dos agentes diferentes. Este indicador puede representar uno o más flujos intercambiados entre la misma pareja de agentes.

$$L = \text{número de links}(N) \quad (13)$$

- *Número de relaciones de intercambio (E)*. Número de intercambios elementales correspondientes a un flujo elemental que se formalizan entre dos agentes. Este indicador debe ser mayor o igual que  $L$ .

$$E = \text{número de intercambios}(N) \quad (14)$$

- *Índice de beneficio económico global (IGEP)*. Relación del beneficio económico global, alcanzado en la situación en la que las empresas implementan estrategias de cooperación, entre la suma de los beneficios económicos individuales de cada empresa en el supuesto de que no exista cooperación, para cada escenario dado. Es un valor adimensional cuya tendencia debe ser creciente y mayor que 1.

$$IGEP = \frac{GEP_{EIP}}{\sum_{i=1}^N Ep_{A_i} \Big|_{non-coop.}} = \frac{\sum_{i=1}^N Ep_{A_i} \Big|_{coop.}}{\sum_{i=1}^N Ep_{A_i} \Big|_{non-coop.}} \quad (15)$$

- *Índice de impacto ambiental global (IGEI)*. Relación del impacto ambiental global, considerado como la suma de los recursos consumidos y los residuos generados por las empresas en la situación de cooperación, entre la suma de los impactos ambientales individuales de cada empresa, considerados éstos

como la suma de los recursos consumidos y los residuos generados en el supuesto de que no exista cooperación, para cada escenario dado. Este índice valora la reducción del consumo de recursos. Es un valor adimensional cuya tendencia debe ser decreciente y menor de 1.

$$\begin{aligned}
 IGEI &= \frac{GEI_{EIP}}{\sum_{i=1}^N WQ_{A_i} \Big|_{non-coop.} + \sum_{i=1}^N RQ_{A_i} \Big|_{non-coop.}} = \\
 &= \frac{\sum_{i=1}^N WQ_{A_i} \Big|_{coop.} + \sum_{i=1}^N RQ_{A_i} \Big|_{coop.}}{\sum_{i=1}^N WQ_{A_i} \Big|_{non-coop.} + \sum_{i=1}^N RQ_{A_i} \Big|_{non-coop.}} \quad (16)
 \end{aligned}$$

- *Índice de medida de sostenibilidad global (IGMSP)*. Relación entre el índice de beneficio económico global *IGEP* y el índice de impacto ambiental global *IGEI*. Este índice es adimensional y mayor de 1. Este índice combina la medida de ambos resultados económicos y ambientales favoreciendo la comparación del sistema en diferentes escenarios. Una tendencia creciente significa mejores resultados económicos y ambientales.

$$IGMSP = \frac{IGEP}{IGEI} \quad (17)$$

#### (d) Paradigma de interacción

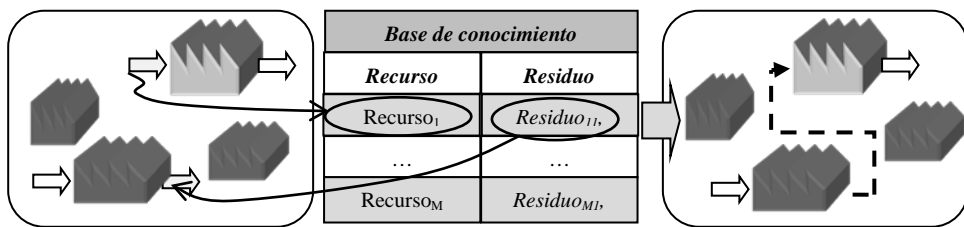
Independientemente de su categoría, los agentes pueden realizar cuatro tipos de acciones durante la operación del área: producción, cooperación, adaptación y desaparición.

El primer modo, producción, se trata de la operación habitual de la empresa. En función de la actividad, la empresa consume ciertos recursos y genera ciertos productos y residuos, en tales cantidades que obtendrá un beneficio económico determinado, todo ello es representado como las propiedades asociadas a los flujos de

cada agente  $A_i$ . El segundo modo de comportamiento es la cooperación, en el caso en el que la empresa tenga posibilidades de colaborar con otras empresas próximas, mediante el intercambio de un flujo residual, bien como consumidora o vendedora del mismo, o mediante el uso compartido de servicios comunes. Las reglas de comportamiento permiten que cada agente tenga la iniciativa de establecer relaciones de cooperación, sin seguir un orden establecido. Este modo de comportamiento implica la interacción con otros agentes y será detenidamente analizado a continuación. El tercer modo adaptación, sucede en el momento en que su operación habitual ha sido alterada como efecto de un cambio en el entorno o en la red y la empresa debe actualizar sus propiedades. Este modo se detalla en el apartado sobre **(e) Capacidad de adaptación**. El cuarto modo, desaparición, sucede cuando la operación de la empresa no es viable en el escenario de trabajo (sus beneficios económicos son negativos) por lo que ésta emigra del área.

A continuación se analiza detalladamente la acción de cooperación, ya que se trata del único modo de los planteados en el que los agentes interactúan directamente entre sí. Dentro de la cooperación, se va a especificar la valoración de intercambios de subproductos para la formalización de redes. Esta acción de cooperación está condicionada a que alguno de los flujos de las empresas sea apto para su intercambio con otro agente. Esta comprobación debe ser previa al desarrollo de la acción. Para ello, el modelo integra una base de conocimiento sobre las combinaciones de flujos que pueden ser intercambiados, obtenido a partir de la coincidencia de datos con experiencias reales de simbiosis industrial (Schwarz y Steininger 1997, Mirata 2004, Mirata y Emtairah 2005, Centre of Excellence in Cleaner Production 2007, Yang y Feng 2008, Eckelman y Chertow 2009, Francois *et al.* 2009, Fiksel *et al.* 2011, NISP 2012). En esta base de conocimiento se identifican diferentes flujos de recursos que pueden ser consumidos por las empresas. Cada tipo de recurso sustituible tiene asociado un listado de residuos o subproductos capaces de sustituirlo. Para cada

agente del modelo se comprueba si alguno de los recursos que consume, recogido en la propiedad  $[Ri]_{Ai}$ , se encuentra indexada en la base de conocimiento. En tal caso, el listado de residuos asociados en la base de conocimiento a ese recurso se utiliza como parámetro de búsqueda para detectar a los agentes que generan esos residuos en el sistema (Figura 26). Siempre que se cumpla la condición de correspondencia de flujos y desigualdad de costes unitarios, es decir, que el residuo esté indexado en la base de conocimiento y se corresponda con el recurso a sustituir, y el coste unitario del residuo sea menor que el coste unitario de la materia prima, se podrá plantear una acción de cooperación entre agentes.



**Figura 26. Proceso de detección de posibles cooperaciones.**

Detectadas las posibilidades de intercambio entre los agentes, se proceden a evaluar las estrategias de los agentes para formalizar el intercambio. La empresa cuyo flujo de entrada puede ser sustituido toma el papel de *Compradora*, y aquella cuyo flujo residual sea un sustituto apto toma el papel de *Vendedora*. La formalización de la relación de *cooperación* requiere llegar a un acuerdo entre ambas empresas sobre la cantidad de residuo intercambiada. Para ello, ambas empresas plantearán sus diferentes estrategias de intercambio que dependerán de los flujos disponibles para su posible compra o venta ( $rq_{j Ai}$ , o  $wq_{k Aj}$  respectivamente). De acuerdo a cada estrategia se procede a la determinación de las utilidades, calculadas según la expresión de la función de utilidad  $P(q_x)$  (12). El último término de la expresión,  $\delta$ , depende de la

categoría de agente a la que pertenezcan la *Compradora* y la *Vendedora*, como resume la Tabla 10.

Este proceso de evaluación se soporta analíticamente en la Teoría de Juegos, como se planteaba en el apartado correspondiente del **Capítulo 2. Estado del Arte**. La aplicación de esta teoría es adecuada en problemas donde existe una potencial coexistencia de múltiples estrategias para las que los mejores beneficios dependen de las acciones de otros agentes (Dixit y Skeath 1999). Concretamente, esta teoría ya ha sido aplicada en el estudio de áreas eco-industriales. Como planteaban Lou *et al.* (2004) la Teoría de Juegos permite generar la estructura para el análisis de los problemas con elecciones estratégicas. Según esta teoría, un juego se refiere a cualquier interacción que involucra dos o más jugadores (Myerson 1991). Dadas las características del planteamiento propuesto, como se planteaba en la Figura 11, el juego será no-cooperativo ya que los jugadores no establecen acuerdos vinculantes para coordinar sus estrategias.

El juego se define como  $G=\{A_i, A_j\}$ , donde la jugadora  $A_i$  es la empresa *Compradora* y la  $A_j$  la *Vendedora*. Las estrategias que pueden desarrollar son función de la cantidad de residuo a intercambiar. La *Compradora* plantea cuatro estrategias de compra según que la cantidad intercambiada del residuo  $q_x$  sea mayor, igual o menor que la cantidad de materia prima consumida, o que se rechace el intercambio (18). La *Vendedora* también considera los supuestos anteriores, según que la cantidad intercambiada de residuo  $q_x$  sea mayor, igual o menor que la cantidad de residuo generada en la empresa o decida no vender el residuo (19).

$$q_{A_i} = \{q_{A_i}^1, q_{A_i}^2, q_{A_i}^3, q_{A_i}^4\} = \{q_{A_i}^1 : q_x > r q_{jA_i}, q_{A_i}^2 : q_x = r q_{jA_i}, q_{A_i}^3 : q_x < r q_{jA_i}, q_{A_i}^4 : q_x = 0\} \quad (18)$$

$$q_{A_j} = \{q_{A_j}^1, q_{A_j}^2, q_{A_j}^3, q_{A_j}^4\} = \{q_{A_j}^1 : q_x > w q_{kA_j}, q_{A_j}^2 : q_x = w q_{kA_j}, q_{A_j}^3 : q_x < w q_{kA_j}, q_{A_j}^4 : q_x = 0\} \quad (19)$$

En función de la categoría de los agentes ((b) **Población de agentes**), se procede al cálculo de la utilidad o recompensa que les reporta cada estrategia. La expresión del juego de cooperación entre los dos agentes en su forma estratégica se indica en la Tabla 11, donde cada celda indica la recompensa para la *Compradora* ( $A_i$ ) y la *Vendedora* ( $A_j$ ) para cada par de estrategias ( $q^i_{A_i}, q^j_{A_j}$ ). El rango de valores de  $q_x$  se encuentra limitado entre  $q_x \in [\min(rq_{j A_i}, wq_{k A_j}), 0]$ , por lo que la menor cantidad de flujo será la de condicione la determinación de las utilidades de los jugadores. En este tipo de juegos el equilibrio de Nash es la solución de la que ningún jugador se desviaría unilateralmente para mejorar su recompensa (Başar y Olsder 1999). Cada pareja de *Vendedora* y *Compradora* alcanza su equilibrio de Nash con una combinación de estrategias concreta en función de su categoría de agente.

**Tabla 11. Tabla de recompensas del juego.**

$A_i / A_j$	$q^1_{A_i}: q_x > rq_{j A_i}$	$q^2_{A_i}: q_x = rq_{j A_i}$	$q^3_{A_i}: q_x < rq_{j A_i}$	$q^4_{A_i}: q_x = 0$
$q^1_{A_j}: q_x > wq_{k A_j}$	$P_i(q^1_{A_i}, q^1_{A_j}),$ $P_j(q^1_{A_i}, q^1_{A_j})$	$P_i(q^2_{A_i}, q^1_{A_j}),$ $P_j(q^2_{A_i}, q^1_{A_j})$	$P_i(q^3_{A_i}, q^1_{A_j}),$ $P_j(q^3_{A_i}, q^1_{A_j})$	$P_i(q^4_{A_i}, q^1_{A_j}),$ $P_j(q^4_{A_i}, q^1_{A_j})$
$q^2_{A_j}: q_x = wq_{k A_j}$	$P_i(q^1_{A_i}, q^2_{A_j}),$ $P_j(q^1_{A_i}, q^2_{A_j})$	$P_i(q^2_{A_i}, q^2_{A_j}),$ $P_j(q^2_{A_i}, q^2_{A_j})$	$P_i(q^3_{A_i}, q^2_{A_j}),$ $P_j(q^3_{A_i}, q^2_{A_j})$	$P_i(q^4_{A_i}, q^2_{A_j}),$ $P_j(q^4_{A_i}, q^2_{A_j})$
$q^3_{A_j}: q_x < wq_{k A_j}$	$P_i(q^1_{A_i}, q^3_{A_j}),$ $P_j(q^1_{A_i}, q^3_{A_j})$	$P_i(q^2_{A_i}, q^3_{A_j}),$ $P_j(q^2_{A_i}, q^3_{A_j})$	$P_i(q^3_{A_i}, q^3_{A_j}),$ $P_j(q^3_{A_i}, q^3_{A_j})$	$P_i(q^4_{A_i}, q^3_{A_j}),$ $P_j(q^4_{A_i}, q^3_{A_j})$
$q^4_{A_j}: q_x = 0$	$P_i(q^1_{A_i}, q^4_{A_j}),$ $P_j(q^1_{A_i}, q^4_{A_j})$	$P_i(q^2_{A_i}, q^4_{A_j}),$ $P_j(q^2_{A_i}, q^4_{A_j})$	$P_i(q^3_{A_i}, q^4_{A_j}),$ $P_j(q^3_{A_i}, q^4_{A_j})$	$P_i(q^4_{A_i}, q^4_{A_j}),$ $P_j(q^4_{A_i}, q^4_{A_j})$

Por ejemplo, se plantea la acción de cooperación entre dos agentes, donde la empresa *Compradora* pertenece a la categoría *Agente Tradicional* y la *Vendedora* a la categoría *Agente Ecológico*, siendo la cantidad ofertada de residuo mayor que la necesaria por el comprador, es decir  $wq_{k A_j} > rq_{j A_i}$ , y por tanto,  $q_x \in [rq_{j A_i}, 0]$ . En este caso, las estrategias de cooperación se limitan a  $q_{A_i} = \{q^2_{A_i}, q^3_{A_i}, q^4_{A_i}\}$  para la *Compradora*, y a  $q_{A_j} = \{q^3_{A_j}, q^4_{A_j}\}$  para la *Vendedora*. El orden de magnitud de los índices  $iEP$ ,  $iEI$  e  $iSP$ , es similar, sin embargo los coeficientes de ponderación de



mayor peso para cada categoría de empresa, permiten simplificar la valoración preliminar de la utilidad como  $P(q_{Ai}) \approx iEP(q_{Ai}) + \delta(q_{Ai})$  para la empresa *Compradora* de la categoría *Tradicional*, y a la expresión  $P(q_{Aj}) \approx iEI(q_{Aj}) + \delta(q_{Aj})$  para la empresa *Vendedora* de la categoría *Ecológica*. Para la empresa *Compradora*, cuanto mayor sea la cantidad intercambiada  $q_x$ , mayores serán los ahorros económicos en la situación de intercambio, y por tanto, mayor su índice económico, *iEP*. El grado de conveniencia de la estrategia será mayor cuanto mayor es la cantidad intercambiada. Por tanto, la estimación de las preferencias para las estrategias de la empresa *Compradora* para  $q^3_{Ai}$  fijo es:  $q^2_{Ai} > q^3_{Ai} > q^4_{Ai}$ . Cuando no se realiza el intercambio ( $q_x = 0$ ), esta relación le reportaría a la compradora una utilidad nula,  $P(0)_{Ai} \approx iEP(0) + \delta(0) \approx 1 - 1 \approx 0$ . Para la *Vendedora*, el índice ambiental, *iEI*, también es mayor cuanto más cantidad del residuo sea vendida. En este supuesto  $q_x < wq_{k Aj}$ , por lo que el grado de conveniencia de la estrategia será nulo para todas las estrategias, salvo en la que contemple la venta del residuo, en el que tomará valor (-1). Así la estimación de las preferencias para la *Vendedora* es  $q^2_{Aj} > q^3_{Aj} > q^4_{Aj}$ , y siendo la utilidad en los casos de  $q_x = 0$ ,  $P(0)_{Aj} \approx iEI(0) + \delta(0) \approx 0 - 1 \approx -1$ , de valor negativo. El equilibrio de Nash en este ejemplo, se daría para un intercambio de  $q_x = r q_{j Ai}$ , cantidad que reporta una utilidad a cada agente de la que no quisieran desviarse.

Por tanto, la solución de formalizar o no cada intercambio dependerá de las categorías de los agentes y de la cantidad a intercambiar entre ellas. Como se observa, la evolución del modelo está condicionada por las decisiones de sus elementos individuales, que establecerán o no, las relaciones de intercambio de residuos o subproductos.

### (e) Capacidad de adaptación

La capacidad de adaptación de los agentes se basa en los medios que se les otorgan para adaptarse a los cambios. En este caso, para asimilar los cambios del entorno y las modificaciones derivadas de la formalización de intercambios internos.

Inicialmente se plantea la capacidad de adaptación de los agentes ante los estímulos externos de su entorno. La respuesta de los agentes surge como reacción a las señales que proceden del entorno. Como se introducía en el modelo conceptual, apartado **3.2 Desarrollo del modelo conceptual de parque eco-industrial**, el entorno se define como un conjunto de sistemas jerárquicos anidados, natural, social, económico y técnico, en el que se emplaza el sistema eco-industrial. La influencia de estos sistemas sobre el parque eco-industrial se ejerce a través de la modificación de los diferentes flujos que circulan entre ellos (Figura 21). La Tabla 12 plantea analíticamente los efectos de las subcategorías de factores (que fueron enumeradas en la Tabla 5) los cuales se representan como parámetros o ratios que modificarán propiedades específicas de los agentes.

**Tabla 12. Influencia de los factores del entorno sobre las propiedades de los agentes.**

<b>Categoría</b>	<b>Subcategoría</b>	<b>Propiedades de agentes</b>
<b>Medioambiental</b>	<i>Entorno natural</i>	$[Rq]_{Ab}$ $[Wq]_{Ai}$
	<i>Recursos</i>	$[Rt]_{Ab}$ $[Rq]_{Ab}$ $[Rc]_{Ai}$
	<i>Corriente residual</i>	$[Wt]_{Ab}$ $[Wq]_{Ai}$
<b>Social</b>	<i>Legislativo y político</i>	$[Wc]_{Ai}$
	<i>Organizacional</i>	$Tr_{Ab}$ $Ef_{Ai}$
	<i>Formativo</i>	$In_{Ai}$
<b>Económico</b>	<i>Mercado</i>	$[Pq]_{Ai}$
	<i>Innovación y competitividad</i>	$[Pt]_{Ai}$
<b>Técnico</b>	<i>Infraestructural</i>	$Ef_{Ab}$ $[Rc]_{Ab}$ $[Wc]_{Ai}$
	<i>Tecnológico</i>	$[Pc]_{Ai}$
	<i>Procedimental</i>	$Ef_{Ai}$

No obstante, dada la diversidad de factores, en esta primera aproximación únicamente se atenderá a tres efectos principales, cada uno correspondiente a uno de los sistemas anidados. Como efecto principal del entorno natural, se valora la disponibilidad de recursos. Según la escasez o abundancia de los mismos, sus costes se verán aumentados o reducidos. Por tanto, un cambio en el entorno natural afecta a las propiedades económicas de los agentes  $[Rc]_{Ai}$ . Como efecto principal del entorno social, se valora la influencia de políticas en materia de gestión de residuos. Si se trabaja en un contexto legal relajado, las tasas de gestión no serán elevadas. En cambio, si el contexto legal es más rígido los costes de gestión de los residuos serán más altos. Un cambio en el entorno social se traduce en una modificación de las propiedades económicas del flujo residuos,  $[Wc]_{Ai}$ . Acerca del entorno económico, se valorarán los efectos de variaciones en la demanda de mercado. El aumento de la demanda, se traduce en un aumento en la cantidad solicitada de productos, es decir modifica directamente la propiedad  $[Pq]_{Ai}$  acerca de la cantidad del flujo de productos del agente. Esto implica que los recursos consumidos y residuos generados también se vean incrementados y por tanto habrá que recalcular estas propiedades.

Además, es preciso valorar la capacidad de adaptación de los agentes ante cambios internos del sistema, es decir, qué efectos sufren las propiedades de los agentes una vez que se formaliza un intercambio material en la red de subproductos. La cooperación, tal y como se planteaba en el apartado **(d) Paradigma de interacción**, daba lugar a una disminución de recursos y de residuos liberados al entorno, así como a una mejora económica y social. Analizando en primer lugar la mejora ambiental producida, se valora la cantidad de recursos naturales ahorrada por la *Compradora* del residuo o subproducto, expresión (20), así como la disminución en la cantidad de residuos depositados en el medio ambiente por la *Vendedora* (21). Esta relación de intercambio también altera a los vectores cualitativos de las propiedades,

los cuales serán actualizados con los nuevos tipos de flujos (residuo comprado y residuo vendido).

$$(RQ)'_{Ai \text{ Compradora}} = (RQ)_{Ai} - (q_x) \quad (20)$$

$$(WQ)'_{Aj \text{ Vendedora}} = (WQ)_{Aj} - (q_x) \quad (21)$$

Seguidamente, se valora los beneficios económicos obtenidos como resultado del intercambio. Desde el punto de vista de la *Compradora*, está alcanzando un ahorro por la compra de un residuo o subproducto a un precio menor que el recurso natural, expresión (22). Desde el punto de vista de la *Vendedora*, éste consigue un ingreso por la venta del residuo o subproducto junto con el ahorro en el pago de tasas de gestión del residuo, expresión (23).

$$(Ep)'_{Ai \text{ Compradora}} = (Ep)_{Ai} + (q_x)(rc_{jAi} - wc_{kAj}) \quad (22)$$

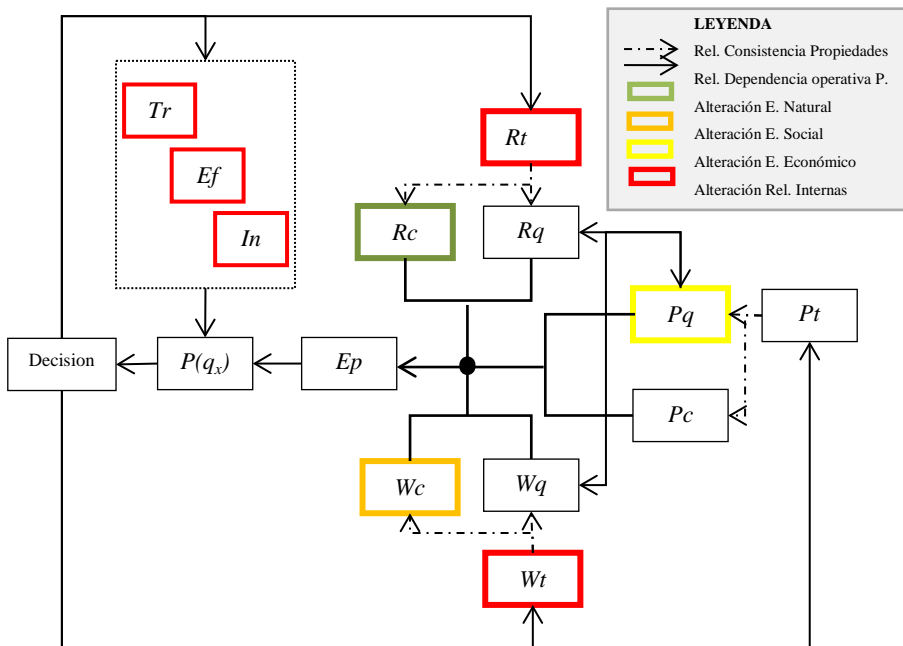
$$(Ep)'_{Aj \text{ Vendedora}} = (Ep)_{Aj} + (q_x)(wc_{kAj} + wc_{kAj}) \quad (23)$$

Las propiedades asociadas al tipo de empresa también se ven alteradas tras formalizar una relación de intercambio. En el caso de la *Compradora*, se considera que la formalización de un intercambio mejora tanto el nivel de confianza, como el nivel de eficiencia operacional en el uso de los recursos, expresión (24). En el caso de la *Vendedora*, la venta de un residuo o subproducto le implicará mejorar su nivel de eficiencia operacional, así como el nivel de innovación, expresión (25).

$$(Tr)'_{Ai \text{ Compradora}} = (Tr)_{Ai} + 0,1 \quad \& \quad (Ef)'_{Ai \text{ Compradora}} = (Ef)_{Ai} + 0,1 \quad (24)$$

$$(Ef)'_{Aj \text{ Vendedora}} = (Ef)_{Aj} + 0,1 \quad \& \quad (In)'_{Aj \text{ Vendedora}} = (In)_{Aj} + 0,1 \quad (25)$$

De esta forma, se formaliza que cualquier modificación interna o externa del sistema afecta a las propiedades de los agentes. Así, esta capacidad de adaptación de los agentes se establece como el mecanismo que poseen para actualizar sus propiedades después de sufrir una alteración. Cuando los valores de una propiedad cambian es necesario comprobar la coherencia de las otras propiedades y recalcular los valores de aquellas que estén relacionadas operativamente para que la definición del agente siga siendo consistente. La Figura 27 muestra las relaciones de dependencia y consistencia (operacional y relacional) entre las propiedades del agente.



**Figura 27. Relaciones de dependencia y consistencia entre las propiedades del agente.**

Con este último bloque se ha finalizado la formalización analítica del modelo conceptual, con lo que se puede proceder a su implementación computacional.

*¿Cómo debo implementar computacionalmente el modelo  
de eco-parque industrial sin perder información?*

### **3.4. Desarrollo de modelo computacional de parque eco-industrial**

El modelo analítico basado en agentes se implementa computacionalmente en la última etapa de modelado. Esta implementación agiliza el proceso de análisis e inferencia del modelo. El proceso de inferencia se lleva a cabo ejecutando el modelo computacional en una plataforma de simulación apropiada. Actualmente, existe una gran diversidad de herramientas software para la implementación de modelos basados en agentes (Railsback *et al.* 2006). Si bien, la plataforma de simulación escogida para la implementación este modelo computacional es NetLogo®, desarrollada por Uri Wilensky (1999). Esta herramienta ha sido elegida por su flexibilidad y manejabilidad para el usuario, así como por la disponibilidad de extensa documentación científica, la cual presenta una tendencia notablemente creciente a partir de 2009. El área de conocimiento mayoritaria en el uso de esta plataforma es la de ciencias de la computación seguida de ingeniería y matemáticas. En concreto, sobre el área de modelado de simbiosis industrial o parques eco-industriales se han detectado dos contribuciones recientes que emplean la plataforma NetLogo® (Bichraoui *et al.* 2013, Zhu y Ruth 2013). La contribución de Bichraoui *et al.* (2013) presenta un modelo computacional preliminar de simbiosis industrial. Mientras que el modelo

computacional de Zhu y Ruth (2013) se centra en el estudio de la resiliencia de la simbiosis industrial.

El propósito final del modelo es servir de apoyo a la transformación de áreas industriales tradicionales a áreas eco-industriales construidas sobre los principios de sostenibilidad y las estrategias de la simbiosis industrial. Para este fin, el modelo computacional debe servir para la detección de las posibles cooperaciones entre las empresas del área industrial (los intercambios materiales, flujos residuales capaces de sustituir flujos de recursos naturales), así como para simular el comportamiento del sistema ante diversos impactos de su entorno socio-económico y natural. Esto permite prever las repercusiones de cambios en el entorno sobre la estabilidad del sistema.

Para proceder con la definición del modelo computacional se puede seguir el protocolo ODD (Grimm *et al.* 2006; Grimm *et al.* 2010), ya que ofrece un formato estructurado para documentar los modelos basados en agentes, y es independiente de la plataforma computacional escogida para su simulación, favoreciendo la comprensión y difusión de los modelos. Este protocolo plantea un primer apartado, *Overview*, en el que se recogen las características generales del modelo. Este apartado permite integrar el trabajo previo desarrollado por los autores (Romero and Ruiz, 2013; Romero and Ruiz, 2014) con la descripción del modelo computacional. Seguidamente, en el apartado *Design Concepts*, se indican aquellos principios de diseño, sobre los 11 establecidos por Grimm *et al.* (2010) que afectan al modelo planteado. Finalmente, en el apartado *Details*, se especifican los datos de inicialización y los submodelos que describen las subrutinas del modelo computacional. Actualmente, se registran cerca de 16.500 contribuciones de diversas áreas de conocimiento que usan el citado protocolo para describir y difundir sus modelos. Dado el nivel de detalle incluido en los apartados del actual **Capítulo 3. Metodología**, en vez de reproducir el protocolo ODD por completo, se profundizará

en los procedimientos específicos del proceso computacional por tratarse de ser los aspectos distintivos de esta etapa de modelado.

### **(0) Proceso computacional**

El horizonte de simulación planteado es de 50 ciclos o iteraciones, que se aproximan a un año real cada una. Esta aproximación se debe a que los flujos cuantitativos de producción y consumo se definen según sus valores anuales. El horizonte de simulación escogido se considera de largo plazo para la vida de áreas industriales, pero esta elección se soporta por el horizonte de vida del caso empleado para la validación del modelo.

En cada ciclo de simulación se evalúan ocho procedimientos computacionales específicos siguiendo la secuencia representada en la Figura 28. Una vez que se cargan los datos de entrada al modelo y se escoge el escenario de simulación según la influencia del entorno y se procede a la evaluación de las relaciones de intercambio. En cada iteración se evalúan tantas posibilidades de intercambio, como el menor número de flujos de recursos consumido por los agentes, parámetro definido como frecuencia de intercambio,  $f$  (26). Esto se justifica ya que para una misma iteración, un mismo agente no puede formalizar más intercambios que los flujos de recursos que disponga.

$$f = \min_{A_i}(\text{length}[Rt]_{A_i}) \quad (26)$$



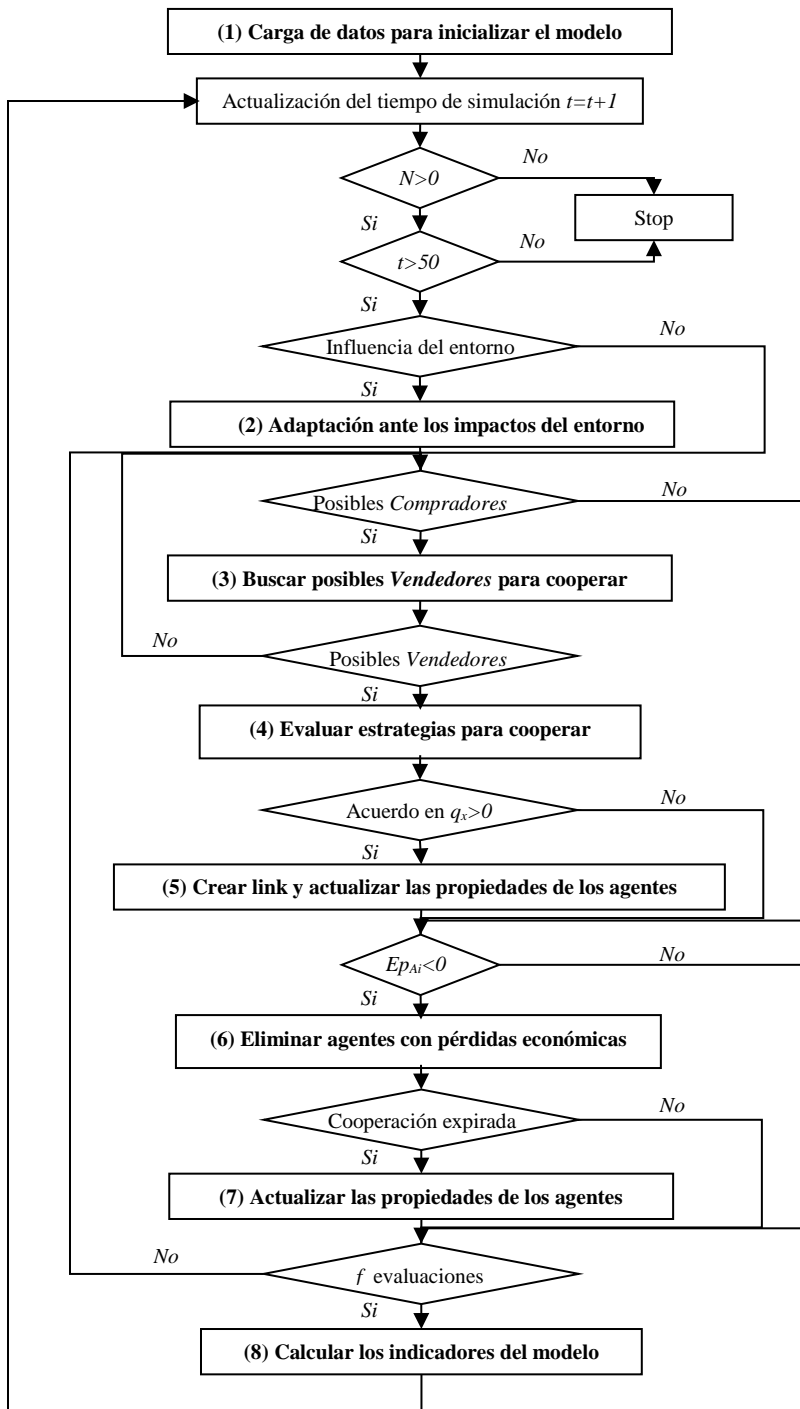


Figura 28. Proceso computacional.

Para que un intercambio se produzca, se ha de cumplir que el flujo residual de un agente sea susceptible de sustituir un flujo de recurso de otro agente. Para ello ambos flujos deben encontrarse asociados en la base de conocimiento. Detectada la correspondencia se comprueba que los agentes alcanzan satisfactoriamente sus objetivos para formalizar el intercambio. Después de formalizarse la relación de intercambio, las propiedades de los agentes se actualizan. Esta actualización se realiza de forma asíncrona, en palabras de Grimm *et al.* (2010), “*un atributo es inmediatamente actualizado tras ser calculado por un proceso*”. Finalmente y para concluir la iteración, se eliminan aquellos agentes que impacten negativamente en la red, es decir que presenten pérdidas económicas, y se actualiza el sistema. Antes de iniciar una nueva iteración se calculan los índices de evolución del modelo (*N, L, E, IGEP, IGEL e IGMSP*). Completadas las iteraciones de la simulación, se obtiene una red de cooperación estimada para las empresas del sistema industrial inicial de acuerdo al escenario de trabajo. La configuración de la red de cooperación de simbiosis industrial, se complementa con la información acerca de la evolución de sus beneficios económicos y ambientales a nivel global.

A continuación serán detallados cada uno de los ocho módulos de evaluación (Figura 28): **(1) Carga de datos para inicializar el modelo; (2) Adaptación ante los impactos del entorno; (3) Buscar posibles *Vendedores* para cooperar; (4) Evaluar estrategias para cooperar, (5) Crear link y actualizar las propiedades de los agentes; (6) Eliminar agentes con pérdidas económicas; (7) Actualizar las propiedades de los agentes; (8) Calcular los indicadores del modelo.** En cada procedimiento se indican los bloques de modelado analítico al que hacen referencia y se señalan las particularidades de la programación asociadas a la plataforma de simulación NetLogo®.

**(1) Carga de datos para inicializar el modelo.** Mediante este procedimiento se cargan los datos iniciales de la población de agentes a partir de un fichero externo. Los datos necesarios para inicializar el modelo consisten en la definición del número de agentes que componen el modelo junto con sus propiedades específicas, el tipo de población según el porcentaje de cada categoría de agente, y fijar el escenario de trabajo. Con esta información se completa el bloque de modelado relativo la población de agentes de estudio.

Sobre estos datos cabe destacar las siguientes particularidades: (i) el usuario puede limitar el número de empresas ( $N$ ) que formará la población por debajo del máximo de empresas cargadas, escogiéndose éstas arbitrariamente; (ii) es necesario disponer de las propiedades cualitativas para la evaluación de la cooperación, mientras que en caso de que no se disponga de las cuantitativas referentes a cantidades y costes se pueden establecer de forma arbitraria según el tamaño de la empresa; (iii) desconocido el patrón de comportamiento de cada empresa, la asignación de las propiedades asociadas al tipo de empresa se puede efectuar aleatoriamente de acuerdo al perfil de población escogida por el usuario; (iv) en este modelo preliminar se han planteado tres escenarios de trabajo, según se desee estudiar el impacto del entorno natural, social o económico sobre el sistema respectivamente (ver submodelo **(2) Adaptación ante los impactos del entorno**). El interfaz de la plataforma de simulación incluye unos selectores que permiten ajustar estos datos de inicialización (Figura 29).

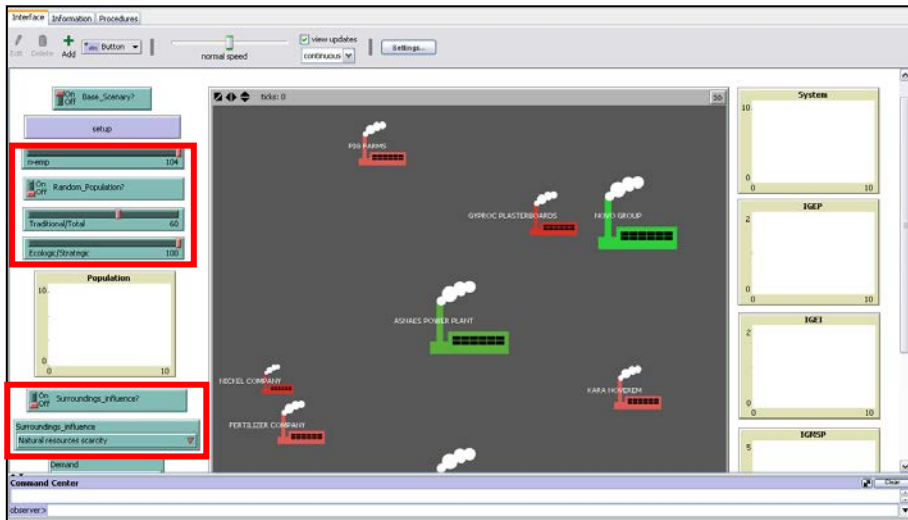


Figura 29. Interfaz del modelo computacional señalando los selectores de inicialización.

(2) **Adaptación ante los impactos del entorno.** Este procedimiento establece la influencia del entorno sobre el sistema, en función del escenario que se haya escogido en el interfaz del modelo computacional. De acuerdo a las premisas planteadas en el modelo analítico basado en agentes, el estudio de la influencia del entorno sobre el modelo se simplifica a tres escenarios correspondientes a la influencia del entorno natural, social y económico:

(III.I) **Escasez de recursos naturales.** La escasez de recursos naturales se refleja sobre el sistema como un incremento del precio de los recursos  $[Rc]_{Ai}$ . Por tanto, todos los recursos de los agentes sufren un incremento en su precio.

(III.II) **Marco legal de residuos estricto.** La existencia de un marco legislativo estricto con la generación de residuos, se refleja en el sistema con una penalización a las empresas generadoras de residuos, aumentando su coste de gestión  $[Wc]_{Ai}$ .

**(III.III) Modificación en la demanda de productos.** Un aumento en la demanda, se considera como un aumento proporcional de la cantidad de productos fabricados  $[Pq]_{Ai}$  por los agentes. Esto implica un aumento proporcional tanto en el consumo de recursos como en la generación de residuos, lo cual influirá en las relaciones de intercambio establecidas en el sistema y cantidades de residuos intercambiadas.

El efecto de estos escenarios se computa como el aumento de la propiedad correspondiente en un ratio o tasa porcentual de influencia, el cual es seleccionado por el usuario, como plantea la expresión (27). El módulo de la plataforma NetLogo® “Behavior Space” permite la comparación de ensayos modificando la tasa de influencia de un escenario concreto dentro de un rango (Figura 30).

$$Escenario \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} (III.I) \rightarrow ratio(\%) \cdot [Rc]_{Ai} \\ (III.II) \rightarrow ratio(\%) \cdot [Wc]_{Ai} \\ (III.III) \rightarrow ratio(\%) \cdot [Pq]_{Ai} \end{array} \right\} \quad (27)$$

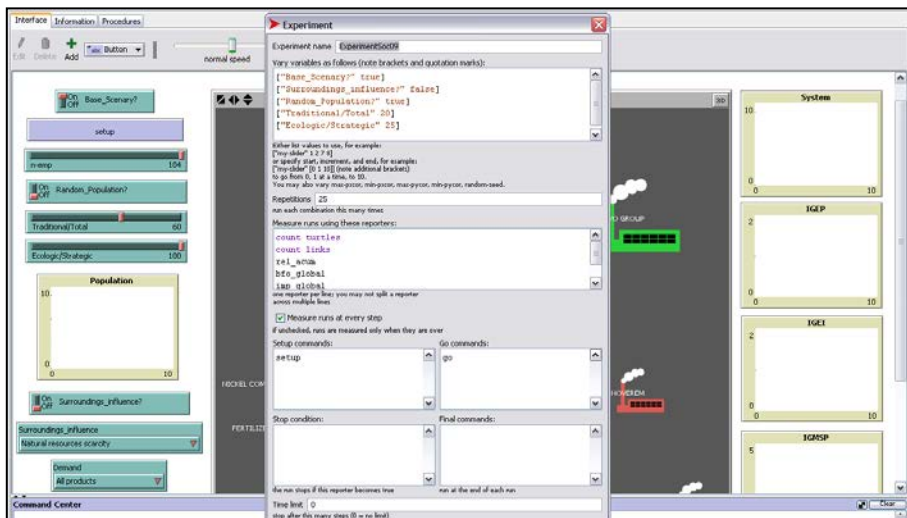


Figura 30. Módulo de comparación de ensayos de NetLogo®.

**(3) Buscar posibles Vendedores para cooperar.** Antes de proceder con la búsqueda de *Vendedores* el modelo debe detectar las posibles empresas *Compradoras*. La *Compradora* se detecta mediante un algoritmo de búsqueda aleatoria entre las propiedades cualitativas de los flujos de recursos de los agentes. El primer agente evaluado en el que al menos uno de sus flujos de recursos consumidos ( $rq_{j Ai} > 0$ ) se corresponda con uno de la base de conocimiento, tal y como se planteaba en el modelo analítico ( $rt_{j Ai} = r_{i ref}$ ), se le asignará el papel de *Compradora*.

Una vez detectados una posible *Compradora* y su flujo de recurso sustituible, se procede a la búsqueda de un *Vendedora*. Para detectar a la *Vendedora* adecuada, se busca el residuo asociado al recurso de la *Compradora* en la base de conocimiento ( $wt_{i ref} \approx rt_{i ref}$ ), entre los residuos generados por los otros agentes ( $wt_{k Aj} = wt_{i ref}$ ). La base de conocimiento está alimentada con los datos de experiencias de simbiosis industrial documentadas, como se indicaba en el modelo analítico. La Figura 31 muestra un extracto de la base de conocimiento integrada en la programación. Para asegurar la detección de los flujos, tanto las propiedades cualitativas de los agentes ( $rt_{j Ai}$  y  $wt_{k Aj}$ ), como la base de conocimiento, se han normalizado según los nombres de recursos del código CNPA, y de los residuos del código LER.

Este procedimiento así como el siguiente tratan de implementar el bloque del modelo analítico correspondiente a **(d) Paradigma de interacción**.

```

File Edit Tools Zoom Tab Help
Interface Information Procederes
Proc... Check | Procederes
;;
to-report carga-tabla
set matching-list (list
(list "Aceites hidráulicos" (list "Aceites y grasas comestibles")))
(list "Alimento para animales (biomasas)" (list "Residuos de la PFDU de productos farmacéuticos, residuos sólidos"))
(list "Aceites de motor, de transmisión mecánica y lubricantes" (list "Aceites y grasas comestibles"))
(list "Productos de aceites y grasas" (list "Aceites y grasas comestibles"))
(list "Productos básicos de hierro, acero y ferrosaleaciones" (list "Límaduras y virutas de metales férreos" "Escorias de horno"))
(list "Aditivo para cemento" (list "Residuos de aceites hidráulicos" "Cenizas y polvo de caldera" "Cenizas y polvo de caldera (carbón)" "Escorias de hor"))
(list "Arena" (list "Cenizas y polvo del caldera" "Resas y materiales cerámicos" "Escorias de horno" "Residuos de la fabricación de productos cerámicos"))
(list "Borras metálicas" (list "Envases metálicos"))
(list "Biomasas" (list "Residuos biodegradables" "Serrín, virutas, recortes, madera sin sustancias peligrosas"))
(list "Catalizadores" (list "Catalizadores usados"))
(list "Levaduras" (list "Residuos de la PFDU de productos farmacéuticos, residuos en forma de lodos"))
(list "Líquidos de freno hidráulicos; preparados anticongelantes y líquidos deshelantes" (list "Disolventes y líquidos de limpieza"))
(list "Caucho" (list "Virutas y rebabas de plástico"))
(list "Fibras artificiales y sintéticas" (list "Residuos fuera de uso"))
(list "Fibra de vidrio" (list "Vidrio"))
(list "Componentes cerámicos para la construcción" (list "Residuos de la fabricación de productos cerámicos y materiales de construcción" "Residuos de f"))
(list "Fertilizantes" (list "Materiales de la construcción a base de yeso"))
(list "Madera en bruto" (list "Serrín, virutas, recortes, madera sin sustancias peligrosas"))
(list "Polvo y partículas de níquel" (list "Cenizas y polvo de caldera (hidrocarburos)"))
(list "Residuos textiles" (list "Residuos de fibras textiles" "Residuos de materiales compuestos (textiles empregados, elastómeros, plásticos)"))
(list "Placas, hojas, tubos y perfiles de plástico" (list "Virutas y rebabas de plástico"))
(list "Pasta papelera" (list "Residuos procedentes de la clasificación de papel y cartón destinados al reciclado"))
(list "Tinta de imprenta" (list "Residuos de tinta"))
(list "Sulfato de amonio" (list "Residuos que contienen azufre procedentes de la desulfuración del petróleo"))
(list "Vapor" (list "Vapor residual"))
(list "Residuo de yeso" (list "Residuo de yeso (a reciclado)"))
(list "Cal y/o yeso" (list "Materiales de construcción a base de yeso" "Residuos de la fabricación de cemento, cal, yeso y productos derivados" "Residuo"))
set matching-table:from-list matching-list
report matching

```

**Figura 31. Extracto de la base de conocimiento implementada en la plataforma computacional.**

**(4) Evaluar estrategias para cooperar.** Encontrada una pareja de empresas *Compradora* y *Vendedora* que puedan cooperar, se deben plantear sucesivas evaluaciones para formalizar la relación de cooperación (Figura 32). Primero se debe comprobar qué cantidad de residuo hay disponible. Seguidamente se valora que el coste del recurso sea mayor que el precio que se asignará a la venta del residuo. Finalmente, se procede al cálculo de las estrategias de los agentes,  $P(q_x)_{Aj}$  *Vendedora* y  $P(q_x)_{Ai}$  *Compradora*, en las diferentes situaciones de intercambio, acotando los valores que pueda tomar  $q_x \in \{\min(rq_{jA_i}, wq_{kA_j}), 0\}$ . Según la Teoría de Juegos, en la que se apoya esta valoración, la cantidad de intercambio  $q_x$  será para la que los agentes alcancen el Equilibrio de Nash, que implica la mejor utilidad para los agentes de la que no se quieren desviar, como se planteaba en el modelo analítico (Tabla 11). Se muestra adicionalmente un extracto del código (Figura 33).

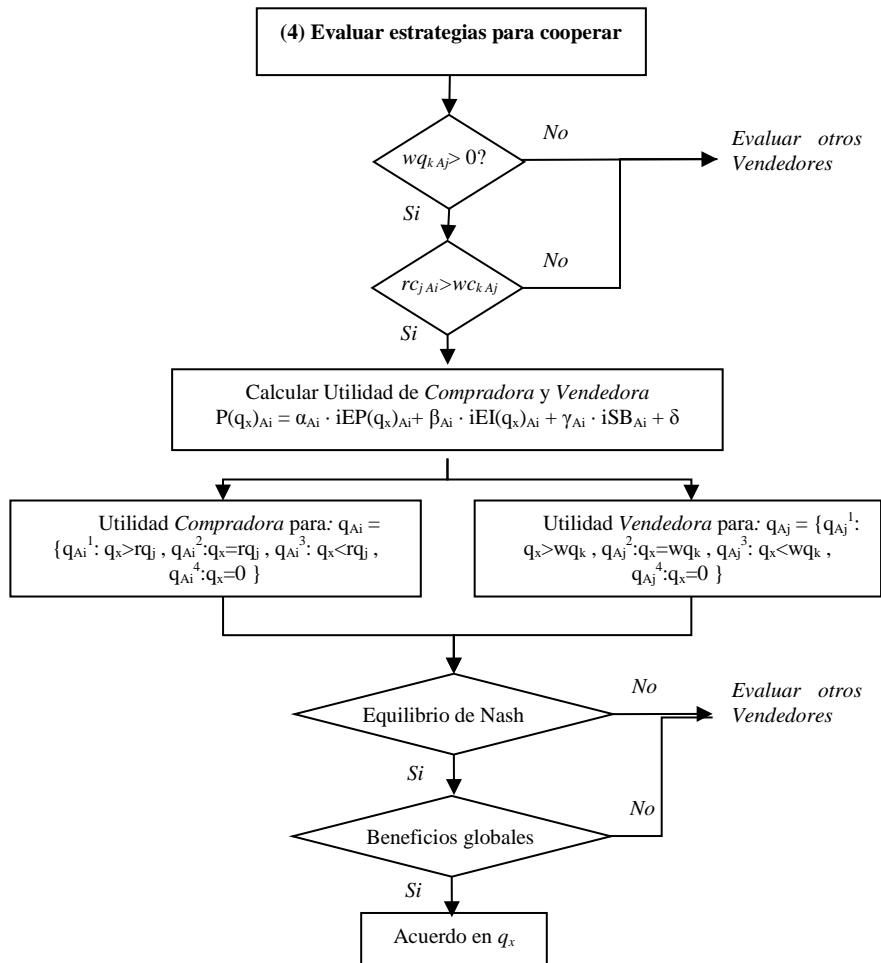


Figura 32. Árbol de decisión del procedimiento (4) Evaluar estrategias para cooperar.



```

Impersonal_pseof4_art - NetLogo (F:\WORK\5_informacion)
File Edit Tools Zoom Tabn Help
Interface Information Procedures
Proc... Check Procedures
let Spayoff04 calc=Spayoff seller 0 wq crq cmq residuo m1 ;;q=0
let Spayoff05 calc=Spayoff seller 0 wq crq cmq residuo m1 ;;q=0
let Spayoff06 calc=Spayoff seller 0 wq crq cmq residuo m1 ;;q=0

show (list (list Spayoff11 Spayoff12 Spayoff13 Spayoff14 Spayoff15 Spayoff16) (list Spayoff21 Spayoff22 Spayoff23 Spayoff24 Spayoff25 Spayoff26) (list Spa
(list Spayoff41 Spayoff42 Spayoff43 Spayoff44 Spayoff45 Spayoff46) (list Spayoff51 Spayoff52 Spayoff53 Spayoff54 Spayoff55 Spayoff56) (list Spayoff61 Spa
(list Spayoff71 Spayoff72 Spayoff73 Spayoff74 Spayoff75 Spayoff76) (list Spayoff81 Spayoff82 Spayoff83 Spayoff84 Spayoff85 Spayoff86) (list Spayoff91 Spa
(list Spayoff01 Spayoff02 Spayoff03 Spayoff04 Spayoff05 Spayoff06))

let mc1 position (max (list Spayoff11 Spayoff12 Spayoff13 Spayoff14 Spayoff15 Spayoff16)) (list Spayoff11 Spayoff12 Spayoff13 Spayoff14 Spayoff15 Spayoff1
let mc2 position (max (list Spayoff21 Spayoff22 Spayoff23 Spayoff24 Spayoff25 Spayoff26)) (list Spayoff21 Spayoff22 Spayoff23 Spayoff24 Spayoff25 Spayoff2
let mc3 position (max (list Spayoff31 Spayoff32 Spayoff33 Spayoff34 Spayoff35 Spayoff36)) (list Spayoff31 Spayoff32 Spayoff33 Spayoff34 Spayoff35 Spayoff3
let mc4 position (max (list Spayoff41 Spayoff42 Spayoff43 Spayoff44 Spayoff45 Spayoff46)) (list Spayoff41 Spayoff42 Spayoff43 Spayoff44 Spayoff45 Spayoff4
let mc5 position (max (list Spayoff51 Spayoff52 Spayoff53 Spayoff54 Spayoff55 Spayoff56)) (list Spayoff51 Spayoff52 Spayoff53 Spayoff54 Spayoff55 Spayoff5
let mc6 position (max (list Spayoff61 Spayoff62 Spayoff63 Spayoff64 Spayoff65 Spayoff66)) (list Spayoff61 Spayoff62 Spayoff63 Spayoff64 Spayoff65 Spayoff6
let mc7 position (max (list Spayoff71 Spayoff72 Spayoff73 Spayoff74 Spayoff75 Spayoff76)) (list Spayoff71 Spayoff72 Spayoff73 Spayoff74 Spayoff75 Spayoff7
let mc8 position (max (list Spayoff81 Spayoff82 Spayoff83 Spayoff84 Spayoff85 Spayoff86)) (list Spayoff81 Spayoff82 Spayoff83 Spayoff84 Spayoff85 Spayoff8
let mc9 position (max (list Spayoff91 Spayoff92 Spayoff93 Spayoff94 Spayoff95 Spayoff96)) (list Spayoff91 Spayoff92 Spayoff93 Spayoff94 Spayoff95 Spayoff9
let mc0 position (max (list Spayoff01 Spayoff02 Spayoff03 Spayoff04 Spayoff05 Spayoff06)) (list Spayoff01 Spayoff02 Spayoff03 Spayoff04 Spayoff05 Spayoff0

if ((mf1 = 0) and (mc1 = 0)) or ((mf2 = 0) and (mc1 = 1)) or ((mf1 = 1) and (mc2 = 0)) or ((mf2 = 1) and (mc2 = 1))
[ type "EM an estrategia Seller" type [name] of turtle seller type " qmwq, "type wq type" Buyer " type [name] of turtle buyer type " Aceptas, hay acuerdo
report wq]

if ((mf3 = 0) and (mc1 = 2)) or ((mf4 = 0) and (mc1 = 3))
[ type "EM an estrategia Seller" type [name] of turtle seller type " qmwq, "type wq type" pero Buyer " type [name] of turtle buyer type " Negocia qrcq
report wq]

if ((mf3 = 1) and (mc1 = 2)) or ((mf4 = 1) and (mc2 = 3))
[ type "EM an estrategia Seller" type [name] of turtle seller type " qmwq, "type wq type" pero Buyer " type [name] of turtle buyer type " Negocia qrcq
report 0]

if ((mf5 = 0) and (mc1 = 4)) or ((mf2 = 0) and (mc1 = 5)) or ((mf5 = 1) and (mc2 = 4)) or ((mf6 = 1) and (mc2 = 5))
[ type "EM an estrategia Seller" type [name] of turtle seller type " qmwq, "type wq type" pero Buyer " type [name] of turtle buyer type " Rechaza q=0,
report 0]

```

Figura 33. Extracto de la programación del procedimiento (4) Evaluar estrategias para cooperar.

(5) **Crear link y actualizar las propiedades de los agentes.** Alcanzado el acuerdo de intercambio entre los agentes que cooperan, *Compradora* y *Vendedora*, esta relación contractual se representa por un *link* entre ambos agentes. En el propio *link* se incluye la información relativa a la cooperación, como el tipo de residuo que se intercambia, la cantidad y coste de venta del mismo (Figura 34). Seguidamente, se actualizan las propiedades relacionadas con los correspondientes flujos, lo cual implementa el bloque de modelado analítico relativo a (e) **Capacidad de adaptación**. El tipo de residuo comprado ( $w_{t_k A_j}$ ) se incluye como nuevo recurso en el vector de propiedades  $[Rt]_{A_i}$  de la *Compradora*, así como la cantidad ( $q_x$ ) y el coste ( $w_{c_k A_j}$ ) en las correspondientes propiedades  $[Rq]_{A_i}$  y  $[Rc]_{A_i}$ . Además, se reduce en esta cantidad  $q_x$ , la cantidad de recurso original comprado ( $rq_{j A_i}' = rq_{j A_i} - q_x$ ) (ecuaciones analíticas (20) y (22)). Asimismo, el residuo vendido por el *Vendedor* se contabiliza como un subproducto ( $-q_x$ ), y por tanto se reduce la cantidad de residuo generada que se destina a la gestión o tratamiento ( $w_{q_k A_j}' = w_{q_k A_j} - q_x$ ). Estos nuevos valores se incluyen en las

propiedades  $[Wt]_{Aj}$  y  $[Wc]_{Aj}$  de la *Vendedora* (ecuaciones analíticas (21) y (23)). Además se deben actualizar las propiedades sociales tal y como se planteaba en las ecuaciones analíticas (24) y (25), Figura 35.

```
ask turtle seller [create-link-to turtle buyer]
let residuo item al [infof] of turtle seller
let crescido item al [infof] of turtle seller
let mal (length [infof] of turtle seller - 1)
show mal
let aprisa item nl [infof] of turtle buyer
let nml (length [infof] of turtle buyer - 1)
let extra 0
let cal 0
if cant > item nl [qinfof] of turtle buyer
[set extra cant - item nl [qinfof] of turtle buyer
 set cal (length [infof] of turtle buyer - 1) cuando hay sobrante
ask link seller buyer [set color red
 set death? false
 if materia = 0
 [set materia (list )]
 set materia (put (list buyer seller residuo cant crescido aprisa nl nml al mal extra cal) materia
 let aux (list)
 foreach materia [set aux (put sublist ? 2 3 aux)]
 set label aux
 ]

]
]
ask turtles [set label (list name bfo tags impv (list tx ef im)) ;actualiza las etiquetas
 show "Despues"
 type "Recursos" type [infof] of turtle buyer type [qinfof] of turtle buyer type "de Buyer" print [name] of turtle buyer
 type "Reservas" type [infof] of turtle seller type [qinfof] of turtle seller type "de Seller" print [name] of turtle seller

end

;;
***** actualiza-link *****
4]
```

Figura 34. Extracto de la programación en la que se implementa la formalización de la cooperación.

```
Interface Information Procedures
Procedures
to actualiza [buyer nl seller al cant] ;ACTUALIZA LAS PROPIEDADES DE LAS EMPRESAS QUE COLABORAN
show "antes"
show [infof] of turtle buyer show [qinfof] of turtle buyer
show [infof] of turtle seller show [qinfof] of turtle seller

set [infof] of turtle buyer (put (item al [infof] of turtle seller) [infof] of turtle buyer
set [infof] of turtle seller (put (item al [infof] of turtle buyer) [infof] of turtle seller
set [aux] of turtle buyer (put nl [aux] of turtle buyer
set [aux] of turtle seller (put al [aux] of turtle seller

set [infof] of turtle buyer (put (item al [infof] of turtle seller) [infof] of turtle buyer
set [infof] of turtle seller (put (item al [infof] of turtle buyer) [infof] of turtle seller

set [tx] of turtle seller ([tx] of turtle seller + 0.1)
set [ef] of turtle seller ([ef] of turtle seller + 0.1)
set [ef] of turtle buyer ([ef] of turtle buyer + 0.1)
set [im] of turtle buyer ([im] of turtle buyer + 0.1)
ask turtle buyer [set soc precision (tx + ef + im) 2]
ask turtle seller [set soc precision (tx + ef + im) 2]

set [qinfof] of turtle seller (put (- cant) [qinfof] of turtle seller
set [qinfof] of turtle buyer (put (+ cant) [qinfof] of turtle buyer (item al [qinfof] of turtle seller - cant)
set [bfo] of turtle seller (bfo] of turtle seller + cant * (item al [infof] of turtle seller * 2)
set [impv] of turtle seller sum (sublist [qinfof] of turtle seller 0 ([f] of turtle seller) )

ifelse cant <= item nl [qinfof] of turtle buyer
[set [qinfof] of turtle buyer replace-item nl [qinfof] of turtle buyer (item nl [qinfof] of turtle buyer - cant)
 set [qinfof] of turtle buyer (put cant [qinfof] of turtle buyer
 set [bfo] of turtle buyer ([bfo] of turtle buyer + cant * (item nl [infof] of turtle buyer - item al [infof] of turtle seller))
 set [impv] of turtle buyer sum (sublist [qinfof] of turtle buyer 0 ([f] of turtle buyer))
 ]
[let sobrante cant - item nl [qinfof] of turtle buyer
 set [qinfof] of turtle buyer (put cant [qinfof] of turtle buyer
 set [bfo] of turtle buyer ([bfo] of turtle buyer + (item nl [qinfof] of turtle buyer * (item nl [infof] of turtle buyer - item al [infof] of turtle seller)) - sobrante * (item
 set [qinfof] of turtle buyer replace-item nl [qinfof] of turtle buyer 0
 set [qinfof] of turtle buyer (put sobrante [qinfof] of turtle buyer
 set [infof] of turtle buyer (put item al [infof] of turtle seller [infof] of turtle buyer

4]
```

Figura 35. Extracto de programación en la que se implementa la actualización de propiedades.

(6) **Eliminar agentes con pérdidas económicas.** El objetivo del sistema es la mejora del beneficio económico global, así como de la reducción de los impactos ambientales generados, por lo que en el momento que una empresa entra en pérdidas económicas ( $Ep_{Ai} < 0$ ) el programa establece la desaparición de la misma del sistema. El lenguaje de programación de NetLogo® incluye una instrucción específica que elimina los agentes correspondientes del sistema, procedimiento “*die*”.

(7) **Actualizar las propiedades de los agentes.** El cese de una relación contractual de intercambio elimina el *link* previamente creado. La *Vendedora* deja de vender una cantidad  $q_x$  de residuo, y la *Compradora* debe volver a abastecerse de recursos originales. En cada caso se deben reincorporar las cantidades que anteriormente fueron intercambiadas. Por tanto, las propiedades relacionadas con los respectivos flujos deben de ser recalculadas. Estos agentes y sus respectivos flujos vuelven a entrar en juego de las valoraciones de los posibles intercambios (Figura 36).

```

to actualiza-link
ask links
[if death?
[let nlink 0
while (nlink < length materia)
[show nlink
set tto item 0 item nlink materia
set tfrom item 1 item nlink materia
set qlink item 2 item nlink materia
set posmp item 3 item nlink materia
set posmp (item 7 item nlink materia) - nlink
set posres item 8 item nlink materia
set posres (item 9 item nlink materia) - nlink
set extra item 10 item nlink materia
set poseres (item 11 item nlink materia) - nlink
;BUYER va a desaparecer, debo actualizar seller a la situación inicial sin este link
[ask turtle tfrom
[type "Seller" type name type "antes" type qinfo2 print info2
let aux item posres qinfo2
set qinfo2 replace-item posres qinfo2 (qlink + aux)
set bfo (bfo - qlink + (item posres cinfo2 * 2))
set lmpw (lmpw + qlink)
set tz (tz - 0.1)
set ef (ef - 0.1)
set sse precision (tz + ef + in) 2
set info2 remove-item posres info2
set qinfo2 remove-item posres qinfo2
set cinfo2 remove-item posres cinfo2
type "Seller" type name type "se actualiza" type qinfo2 print info2]
]

;SELLER va a desaparecer, debo actualizar buyer a la situación inicial sin este link
[ifelse extra = 0
[ask turtle tto
[type "Buyer" type name type "antes" type qinfo1 print info1
let aux item posmp qinfo1

```

**Figura 36.** Extracto de programación en la que se actualizan las propiedades, eliminado un agente del sistema.

**(8) Calcular los indicadores del modelo.** Efectuadas las  $f$  evaluaciones, correspondientes al mínimo número de flujos de recursos consumido en el sistema, se pasa a valorar los índices del sistema. Esta evaluación permite la implementación del bloque de modelado **(c) Objetivo de la simulación.** Al final de la iteración o ciclo de simulación, los índices que medirán la evolución del sistema se calculan y se grafican. Estos índices se corresponden con los definidos en el modelo analítico.

Complementariamente, se actualizan los datos correspondientes a la población de agentes, los porcentajes de cada categoría *Tradicional*, *Ecológica* y *Estratégica* que forman el modelo, puesto que después de los intercambios, las propiedades sociales se ven alteradas y por tanto el perfil de la población puede evolucionar hacia otras formas.

Una vez definidas las particularidades del modelo computacional, el siguiente paso es la verificación, validación y ensayo del mismo, para comprobar su adecuación en la representación de los sistemas reales. Esta etapa es abordada en el **Capítulo 4. Análisis de Resultados.**

# **CAPÍTULO 4.**

## **ANÁLISIS DE RESULTADOS**

---



*¿Es viable la herramienta computacional para simular el comportamiento de un parque eco-industrial real?*

#### **4.1. Verificación y validación del modelo computacional**

La verificación del modelo computacional se ha efectuado paralelamente a su implementación. A medida que se programaban las premisas analíticas, se ha ido comprobando la adecuación de las proposiciones y estructuras computacionales. Para la detección y resolución de fallos se han probado segmentos del código de forma aislada con datos genéricos. Estas verificaciones se realizaron inicialmente sobre el código de los procedimientos elementales de programación. Resultados positivos de estas pruebas permitieron la verificación de segmentos de código combinados.

Una vez implementado y verificado el modelo computacional en la plataforma NetLogo®, se procede a su validación. Los resultados de la simulación del modelo computacional han de reproducir el comportamiento del sistema real y su evolución en diferentes escenarios de trabajo. Por tanto, es necesario recoger datos correspondientes a una experiencia real de parque eco-industrial.

La validación del modelo se efectúa con los datos de la experiencia de simbiosis industrial de Kalundborg (Dinamarca), la cual será asignada como escenario *Base*. Conocida la red de intercambio y la evolución del sistema, se carga en el modelo computacional toda la información precisa para comprobar la reproducibilidad del

caso real. Se valora su robustez de la herramienta a la hora de detectar la red de intercambios materiales; así como la adaptabilidad de la misma ante diferentes escenarios de trabajo en los que intervenga la influencia del perfil social de la población del sistema y la influencia de su entorno. La obtención de unos resultados de simulación coherentes con la realidad implica la validez y aptitud del modelo computacional.

Después de la validación del modelo computacional, se plantea una aplicación del mismo para valorar la transformación de un área industrial tradicional en un área eco-industrial a partir de la información cualitativa.

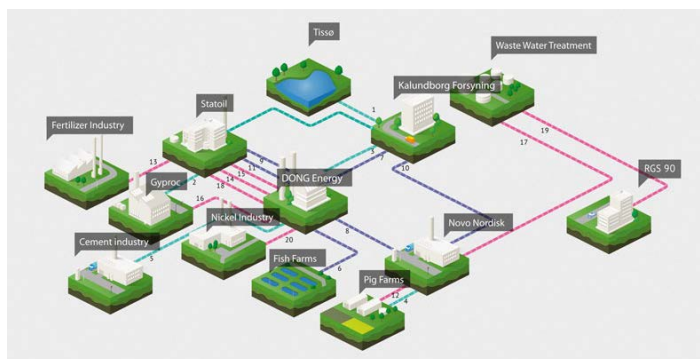
### **(I) Escenario Base**

El caso empleado para la validación del modelo de simulación es la experiencia de simbiosis industrial de Kalundborg (Dinamarca). Como se planteaba en el **Capítulo 2. Estado del arte**, se trata de la experiencia más conocida de simbiosis industrial a nivel mundial que lleva operativa desde los años 70. La red de cooperación creada para mejorar la situación ambiental y económica en la zona incluye el intercambio de diferentes flujos de materiales y agua, así como energéticos, vapor, agua caliente y calor residual. Los agentes que intervienen actualmente en la red de cooperación ascienden a cerca de 20 empresas, grandes industrias y Pymes, incluyendo la participación del núcleo urbano que aprovecha los flujos residuales de calor (Jacobsen 2006).

Sin embargo, los datos empleados para la validación del modelo computacional se limitan a nueve de las empresas pertenecientes a dicha red, coincidentes con la estructura operativa durante los años 1990s (Figura 37). La limitada disponibilidad de datos actuales de la experiencia justifica que en la validación se tenga que recurrir a una topología antigua de la red. Aunque los resultados de la cooperación, en cuanto a



beneficios económicos y mejoras ambientales están publicados, no ocurre lo mismo con la información cualitativa y cuantitativa de las empresas, lo cual es esencial para ejecutar el modelo computacional. Por tanto, se recurre a la única información publicada sobre los datos cuantitativos de las empresas más grandes del complejo (Asnaes Power Plant, Statoil Refinery, Novo Group y Gyproc), relativa al año 2002 (Jacobsen 2006). Los datos de las otras empresas que completan el sistema se deducen a partir de la información disponible de los intercambios de materia y vapor. La información económica se ha obtenido de diversas fuentes oficiales, mediante la revisión de precios históricos representativos de las materias primas (datos de mercado y estadísticos), así como de las tarifas de gestión de residuos nacionales (Danish Environmental Protection Agency 1999).



**Figura 37. Red de Kalundborg entre 1990-1999 (Symbiosis 2014).**

En cuanto a la asignación de las propiedades sociales, ésta ha sido establecida de forma subjetiva según el tipo de empresa y su patrón de operación. Los valores específicos de las propiedades sociales de cada agente se han asignado mediante un proceso iterativo de calibración (Tabla 13). La población resultante del escenario *Base*, está formada por un 67% de *Agentes Tradicionales* y un 33% de *Agentes Ecológicos*.

**Tabla 13. Población de agentes del escenario Base.**

Agente	$Tr_{Ai}$	$Ef_{Ai}$	$In_{Ai}$	Categoría	Patrón de operación
Asnaes PowerPlant	0,9	1,2	0,3	<i>Ecológico</i>	Empresas intensivas en el consumo de recursos y generación de residuos, pero medioambientalmente concienciadas.
Novo Group	0,9	1,5	0,5	<i>Ecológico</i>	
Statoil Refinery	0,8	1,4	0,9	<i>Ecológico</i>	
Gyproc Plasterboards	1,4	0,6	0,2	<i>Tradicional</i>	Pequeñas y medianas empresas cuyo principal role es la recepción de flujos residuales favoreciendo la actuación económica y mejora ambiental global.
Kara Noverem	1,2	0,5	0,2	<i>Tradicional</i>	
Cement company	1,4	0,3	0,2	<i>Tradicional</i>	
Fertilizer company	1,8	0,6	0,2	<i>Tradicional</i>	
Nickel company	1,2	0,4	0,2	<i>Tradicional</i>	
Pig farms	1,5	0,6	0,2	<i>Tradicional</i>	

\*Se han mantenido los nombres en inglés para una identificación inequívoca con las referencias bibliográficas.

La inicialización del modelo computacional con los datos del escenario *Base* requiere que el usuario escoja la opción “on” en el selector “*Base\_Scenario?*” (Figura 38). Esta opción carga los datos cualitativos, cuantitativos y económicos del caso de Kalundborg, y las propiedades sociales tal y como se han calibrado en la Tabla 13. Los otros selectores “*Random\_population?*” y “*Surrounding\_influence?*” deben mantenerse en “off”, para que ni las propiedades sociales se vean alteradas, ni se evalúe la influencia del entorno sobre el sistema. En este primer ensayo del escenario *Base*, únicamente se quiere comprobar si el modelo computacional es apto para la detección de la red y la predicción de su evolución. Una vez seleccionadas las opciones anteriores, se pulsa el botón “*Setup*” del interfaz para que inicie la simulación.



**Figura 38. Interfaz del modelo computacional cargados los datos del escenario Base.**

Para que se empiecen a ejecutar los procedimientos computacionales se selecciona el botón “Go”. El monitor central trazará progresivamente el desarrollo de los intercambios entre las empresas, señalando sobre cada *link* la materia objeto del intercambio. En el monitor “System\_N-L-E” se puede comprobar la evolución del número de agentes del sistema,  $N$ , de relaciones o *links* o relaciones de cooperación,  $L$ , y de intercambios elementales formalizados,  $E$ . El detalle acerca de la evolución de la población del sistema (% relativo a cada categoría de agente) se señala en el monitor “Population”. Los tres monitores restantes se reservan para graficar la evolución de los indicadores de la evolución global del sistema: *IGEP*, *IGEI* e *IGMSP*.

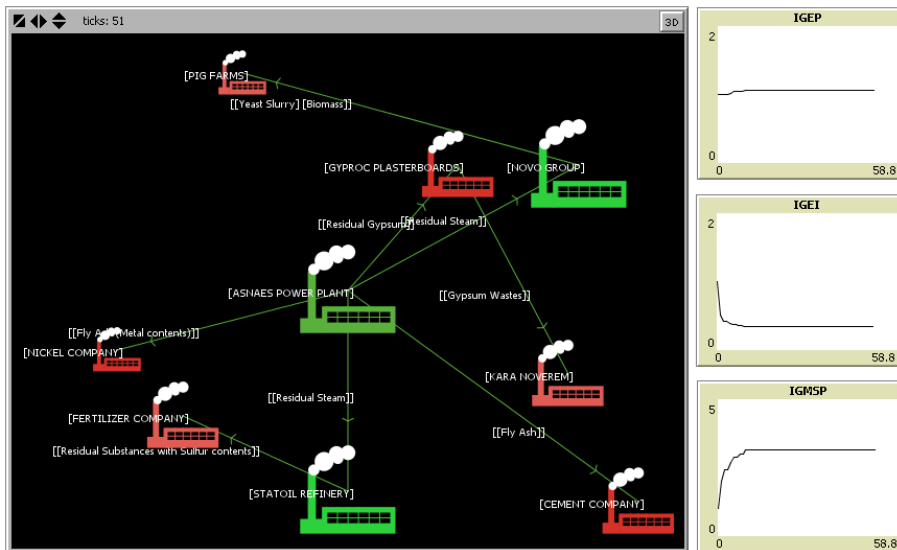
Se comprueba que el modelo es capaz de simular que los agentes intercambian la totalidad de los flujos residuales capaces de sustituir recursos naturales y en las cantidades correspondientes a la red real (Tabla 14). Después de que se completa el último intercambio (iteración 5), la topología de la red (número de empresas y

relaciones formalizadas) se mantiene constante en las sucesivas iteraciones (Figura 39).

**Tabla 14. Relaciones establecidas e intercambios elementales entre los agentes de Kalundborg.**

Relación (N)	Comprador	Vendedor	Residuo	Intercambio (E)
1	Asnaes Power Plant	Cement company	Cenizas volantes	1
2	Asnaes Power Plant	Gyproc Plasterboards	Yeso residual	2
3	Asnaes Power Plant	Nickel company	Cenizas con componentes metálicos	3
4	Asnaes Power Plant	Novo Group	Vapor residual	4
5	Asnaes Power Plant	Statoil Refinery	Vapor residual	5
6	Gyproc Plasterboards	Kara Noverem	Residuos de yeso	6
7	Novo Group	Pig farms	Biomasa Levadura	7 8
8	Statoil Refinery	Fertilizer company	Sustancias residuales con contenido en azufre	9

Además, la evolución de los índices de medida siguen las tendencias previstas en el modelo analítico. El índice de medida del impacto ambiental global total (*IGEI*) tiene una tendencia negativa y menor de la unidad, lo que representa una reducción del impacto ambiental. La tendencia del índice de medida de los beneficios económicos globales (*IGEP*) es creciente y mayor de la unidad, lo que simboliza una mejora económica del sistema mediante la cooperación. Esta situación favorable también se ve reflejada en el índice global de sostenibilidad (*IGMSP*) con tendencia creciente y mayor de la unidad. Estos índices reflejan que el comportamiento del sistema mediante la formalización de la red es más sostenible que en la situación de no cooperación de las empresas.



**Figura 39. Resultados obtenidos al final de las 50 iteraciones.**

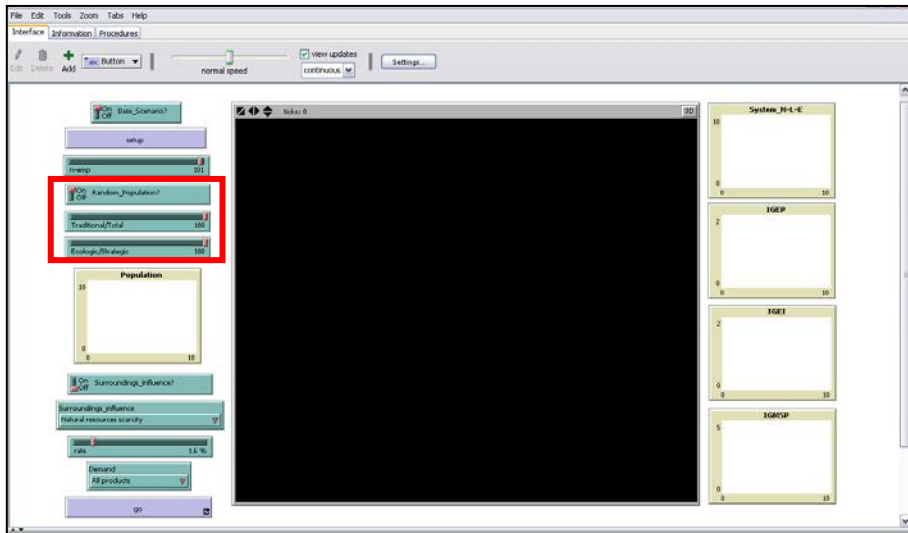
Por tanto, este escenario *Base* demuestra la validez del modelo computacional para la correcta detección de los intercambios materiales que se establecen en el sistema real, a pesar de que en el modelo computacional se efectúe esta detección de forma aleatoria. Además, esta formalización de la red de intercambios a lo largo de sucesivas iteraciones cumple con las premisas del modelo conceptual de parque eco-industrial; es decir, la cooperación entre empresas permite alcanzar mejoras económicas y ambientales dadas por las expresiones objetivo de un área eco-industrial (1) y (2).

En los apartados siguientes se estudia la robustez del modelo al trabajar ante diferentes escenarios de trabajo. Inicialmente, se valora cómo afectan las propiedades asociadas al tipo de empresa en la evolución del sistema, ya que estas propiedades afectan directamente en la toma de decisiones de las empresas. Seguidamente, se estudia el impacto del entorno sobre el sistema según la variación de tres escenarios, planteados en (2) **Adaptación ante los impactos del entorno.**

## **(II) Análisis de la influencia de las propiedades asociadas al tipo de empresa: escenario de Población aleatoria (Soc).**

La influencia de las propiedades sociales sobre la evolución del modelo se evalúa en el escenario de trabajo denominado *Soc*. Sobre este escenario se analizan las variaciones de la red causadas por la asignación aleatoria de las propiedades asociadas al tipo de empresa sobre el caso de validación. Como se planteaba en el modelo analítico, las propiedades asociadas al tipo de empresa afectan a los patrones de comportamiento de los agentes. Así, con este escenario se pretende valorar la influencia que tiene el tipo de población sobre el desarrollo de la red de cooperación.

El escenario *Soc* se aplica cuando el usuario activa “on” el selector “*Random\_population?*” en el interfaz del modelo computacional (Figura 40). La proporción de cada categoría de agentes que forma la población es escogida según los selectores “*Traditional/Total*”, para determinar la proporción de *Agentes Tradicionales* sobre la población total de agentes ( $N$ ) y “*Ecologic/Strategic*”, para indicar la proporción de estas dos categorías de agentes sobre el porcentaje restante de la población. De acuerdo a estas proporciones, las propiedades asociadas al tipo de empresa se asignan de forma aleatoria a los agentes de la población y en su valor numérico.

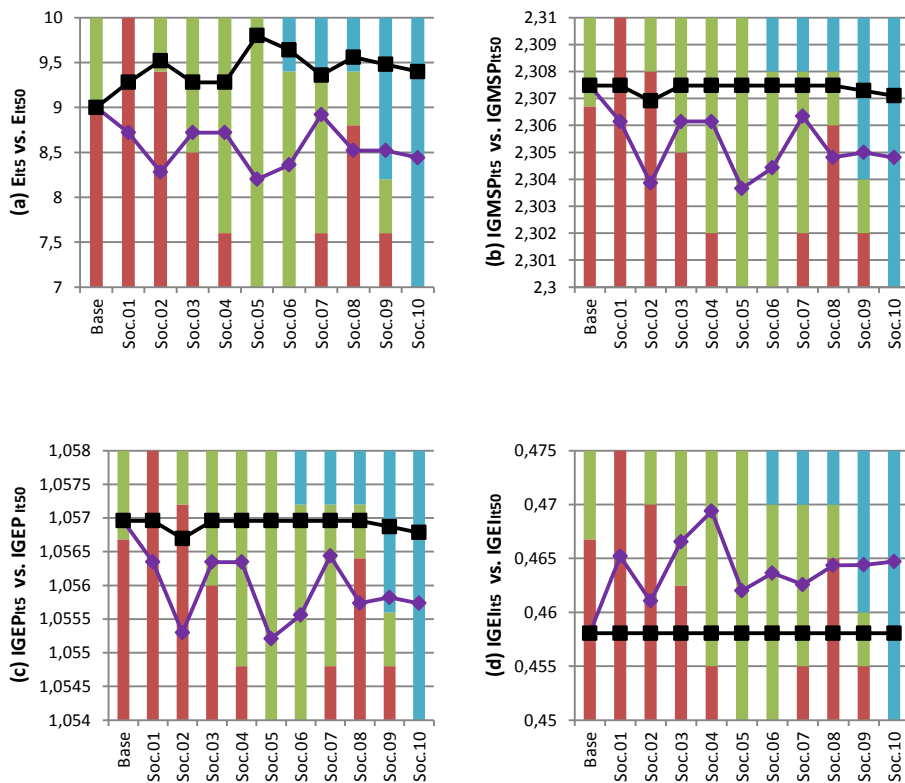


**Figura 40. Interfaz del modelo computacional mostrando las opciones de selección del escenario Soc.**

Sobre este escenario se han efectuado 10 ensayos, cada uno de ellos con diferentes perfiles de población, como muestra la Tabla 15. Asignadas las propiedades asociadas al tipo de empresa de forma aleatoria, sobre cada ensayo se han realizado 25 simulaciones cuyo objetivo es analizar un espectro más amplio de las posibles combinaciones. Sobre estas 25 simulaciones se han calculado los valores medios de los índices de medida  $E$ ,  $IGMSP$ ,  $IGEI$  e  $IGEP$  (Figura 41). El número de intercambios,  $E$ , se valora para observar la rapidez con la que se formaliza la red (valor en la iteración 5) y los resultados al final del periodo completo de simulación (valor en la iteración 50).

Tabla 15. Poblaciones de los ensayos sobre el escenario Soc.

Categoría de agentes	Perfiles de población (% de cada categoría de agente)										
	Base	Soc. 01	Soc. 02	Soc. 03	Soc. 04	Soc. 05	Soc. 06	Soc. 07	Soc. 08	Soc. 09	Soc. 10
Tradicional	67	100	80	50	20	0	0	20	60	20	0
Ecológico	33	0	20	50	80	100	80	60	20	20	0
Estratégico	0	0	0	0	0	0	20	20	20	60	100



Leyenda	Iteración 5 (Diamante Morado)		Iteración 50 (Cuadrado Negro)	
	Categoría de agentes		Categoría de agentes	
	Tradicional(Rojo)		Ecológico (Verde)	
			Estratégico (Azul)	

Figura 41. Gráficas de los índices de medida en el escenario Soc. para las iteraciones 5 y

50. (a)  $E_{I5}$  vs.  $E_{I50}$ ; (b)  $IGMSPI_{I5}$  vs.  $IGMSPI_{I50}$ ; (c)  $IGEP_{I5}$  vs.  $IGEP_{I50}$ ; (d)  $IGEI_{I5}$  vs.

$IGEI_{I50}$



El escenario *Base* se toma como referencia para comparar la influencia de las poblaciones propuestas. Observando la Figura 41, se comprueba que el escenario *Base* se trata de la situación más favorable para una rápida y efectiva formalización de la red. La red se establece en la iteración 5, a través de la formalización de 9 intercambios (Figura 41(a)), coincidentes con los del sistema real, tanto cualitativa como cuantitativamente. Esta estructura de la red se mantiene a lo largo de toda simulación, tal y como muestran los valores constantes de los indicadores de medida, sostenibilidad,  $IGMSP_{It5}=IGMSP_{It50}=2,307$ ; beneficio económico,  $IGEP_{It5}=IGEP_{It50}=1,057$ ; e impacto ambiental,  $IGEI_{It5}=IGEI_{It50}=0,458$  (Figura 41).

Sin embargo, en los ensayos del escenario *Soc*, al cambiar los perfiles sociales de las empresas, ciertas cooperaciones requieren más de una iteración para intercambiar un flujo residual. Por ejemplo, Asnaes Power Plant y Gyproc Group, con los perfiles *Ecológico* y *Tradicional* del escenario *Base*, formalizan el intercambio del 100% del residuo de yeso en una sola iteración, por lo que se contabiliza 1 intercambio ( $E_{Asnaes-Gyproc}=1$ ;  $L_{Asnaes-Gyproc}=1$ ). En cambio, cuando ambas empresas tienen el perfil *Ecológico* (ensayo *Soc.05*), no se llega al mismo acuerdo en una sola iteración. En una primera iteración las empresas acuerdan intercambiar un porcentaje del residuo de yeso y en una posterior la cantidad restante hasta el 100%, por lo que se contabilizan 2 intercambios ( $E_{Asnaes-Gyproc}=2$ ;  $L_{Asnaes-Gyproc}=1$ ).

Al final de las simulaciones, en la iteración 50, los valores de los índices *IGEP*, *IGEI* e *IGMSP* de cualquiera de los ensayos se aproximan al 2,5% de los valores del escenario *Base* (Figura 41). Sin embargo, los valores de estos índices en la iteración 5 muestran una mayor dispersión y permite el análisis de la influencia de los diferentes perfiles de población sobre la evolución del sistema.

En las primeras iteraciones, se comprueba que el comportamiento de las poblaciones puras, *Soc.01*, *Soc.05* y *Soc.10*, emerge de la satisfacción de los objetivos

de sus agentes. El objetivo perseguido por los *Agentes Tradicionales* en la formalización de un intercambio es alcanzar un beneficio económico sustancial. Este objetivo individual condiciona que en una población puramente tradicional (*Soc.01*), las empresas no establezcan un intercambio si resulta poco beneficioso. Así, en el ensayo *Soc.01*, se comprueba que al cabo de la iteración 5 no se ha establecido la red completa, y por tanto, el indicador *IGEP* tiene un valor moderado. El objetivo prioritario de los *Agentes Ecológicos* es intercambiar la mayor cantidad de residuo posible. En el ensayo *Soc.05*, con una población puramente ecológica, se aprecia que a pesar de que en la iteración 5 el número de intercambios es el menor de todos los ensayos, se alcanza el valor más favorable del índice *IGEI* lo cual emerge de la satisfacción de los objetivos de los agentes individuales. En cambio, el objetivo de los *Agentes Estratégicos* es mejorar la posición social de las empresas mediante el establecimiento de intercambios, sin priorizar beneficios económicos ni ambientales. Así, se comprueba que en la población puramente estratégica (*Soc.10*) los valores de los índices *IGEP* e *IGEI* son más moderados y equilibrados que en ensayos anteriores. No obstante, es necesario destacar que la desviación de los resultados para las 25 simulaciones de este ensayo es sensiblemente mayor que para el resto de casos. Esto es debido a que la elección del grado de conveniencia de la estrategia,  $\delta$ , para los *Agentes Estratégicos* es totalmente aleatoria para cada agente y para cada valoración de intercambio, según se ha planteado en el modelo analítico, generando resultados difícilmente reproducibles.

Seguidamente, se analiza cómo afecta una población más diversa al comportamiento del sistema. La combinación de *Agentes Tradicionales* y *Agentes Estratégicos* en porcentajes entre el 20-50% con *Agentes Ecológicos* (*Soc.03*, *Soc.04* y *Soc.07*), agiliza la formalización de intercambios con respecto a la población puramente ecológica (Figura 41(a)); es decir, en la iteración 5 se han formalizado un mayor número de intercambios. La presencia de estos agentes favorece la

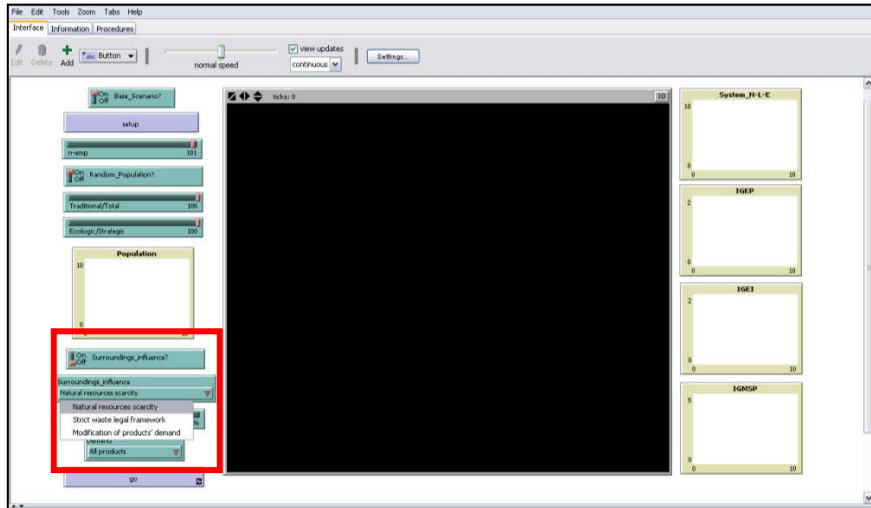
formalización de intercambios económicamente beneficiosos y el equilibrio de los objetivos del sistema, lo cual se refleja en que el indicador *IGMSP* sea más próximo al del caso *Base*. Si bien, los valores de los índices de medida en la iteración 5 más próximos a los del escenario *Base* se alcanzan en el ensayo *Soc.07* (20% *Tradicionales*, 60% *Ecológicos*, 20% *Estratégicos*). La combinación de agentes de las tres categorías permite alcanzarlos objetivos globales del sistema equilibradamente. La elevada proporción de *Agentes Ecológicos* junto con la presencia de una proporción de *Agentes Estratégicos*, favorecen un temprano desarrollo de los intercambios y evolución de redes de cooperación, mientras que el porcentaje de *Agentes Tradicionales* equilibra la priorización de los objetivos económicos y ambientales de la población, alcanzando el  $IGMSP_{I5}=2,306$ , más próximo al del escenario *Base*.

### **(III) Análisis de la influencia del entorno.**

Los siguientes escenarios evalúan la influencia del entorno sobre la evolución del sistema. Según lo planteado en el modelo analítico la influencia del entorno se simplifica a tres situaciones de acuerdo a los impactos del entorno natural, social y económico. Esto lleva al planteamiento de tres escenarios (Figura 42).

La influencia de los cambios del entorno se valoran en caso de que el usuario seleccione “on” en el selector del interfaz “*Surroundings\_influence?*”, el cual activa la ejecución del procedimiento computacional **(2) Adaptación a los impactos del entorno**. En este apartado se valorará la sensibilidad del modelo ante variaciones en los precios de compra de recursos  $[Rc]_{Ai}$ , en los costes de gestión de residuos  $[Wc]_{Ai}$ , o en el aumento en la demanda de productos  $[Pq]_{Ai}$ , correspondientes con la elección de los escenarios **(III.I) Escasez de recursos naturales** (escenario *Res*), **(III.II) Marco legal de residuos estricto** (escenario *Was*), y **(III.III) Modificación en la demanda de productos** (escenario *Dem*). Todos ellos se evaluarán sobre la población

establecida del escenario *Base* y se tomarán los resultados de éste mismo como referencia para comparar los efectos del entorno sobre la evolución del sistema.



**Figura 42. Interfaz del modelo computacional mostrando las opciones de selección de los escenarios *Res*, *Was* y *Dem*.**

### (III.I) Análisis de la influencia del entorno natural: escenario Escasez de recursos naturales (*Res*).

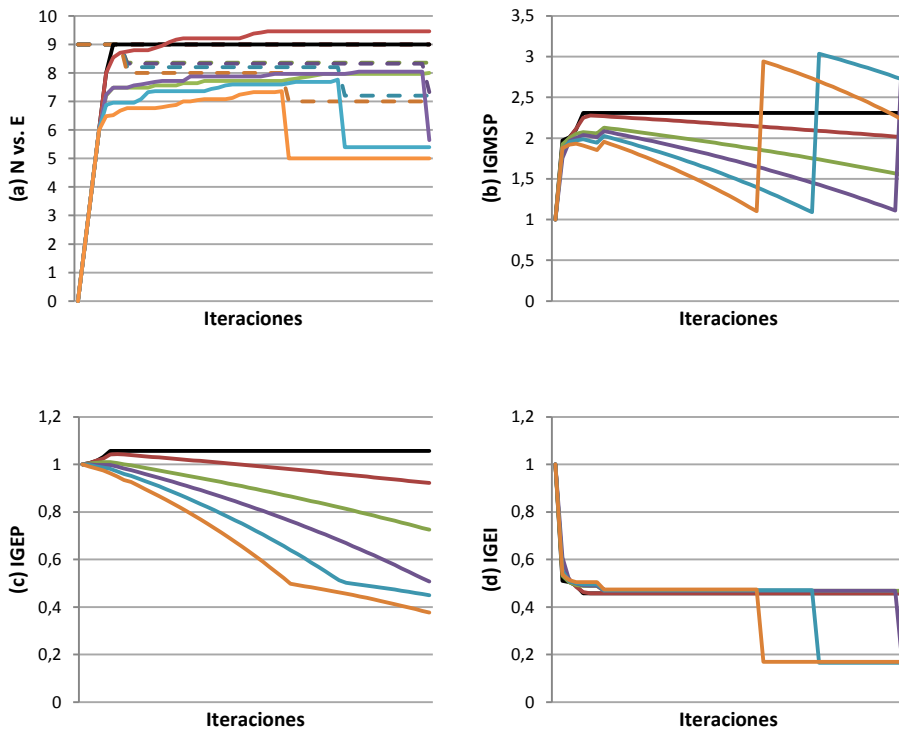
Este escenario pretende representar el efecto que tiene sobre el sistema un entorno de recursos escasos. Este impacto se representa en el modelo como un incremento en el precio de compra de las materias primas  $[Rc]_{Ar}$ . El interfaz está previsto para que el usuario escoja un incremento de este precio hasta del 2,5% por ciclo. En la Figura 43 se muestran los índices de medida del modelo para los 5 ensayos: *Res.01*, ratio de 0,5%; *Res.02*, ratio de 1%; *Res.03*, ratio de 1,5%; *Res.04*, ratio de 2,0%; y *Res.05*, ratio de 2,5%. El planteamiento de este escenario pretende comprobar si el aumento del coste del recurso, que refleja su escasez en el entorno natural, es un catalizador para que las empresas busquen materias alternativas a los

recursos naturales, como puede ser el uso de residuos sustitutos. En el modelo computacional este impacto se debe reflejar mediante una formalización más rápida de la red de intercambios.

No obstante, las simulaciones producen diferentes resultados, como la Figura 43 indica. En el ensayo *Res.01* la red cooperativa se llega a completar pero debido al incremento del precio de los recursos, lo hace más lentamente que en el escenario *Base*, prácticamente en la iteración 28 (Figura 43(a)). Cabe anotar que el índice global de beneficio económico, *IGEP*, presenta una tendencia negativa, la cual se ve incrementada a medida que el ratio de influencia aumenta (Figura 43(c)). Esto se debe a que el ratio aumenta el coste de los recursos en mayor proporción que los ingresos obtenidos tanto por la venta de sus productos como por el intercambio de los residuos. Esta alteración de los índices muestra la elevada sensibilidad del modelo en este escenario, causando la desaparición de empresas que entran en pérdidas económicas; una en el ensayo *Res.02*, y dos en los ensayos *Res.03*, *Res.04* y *Res.05* (Figura 43(a)). Esta desaparición de empresas provoca una reducción del número de intercambios formalizados en la red, *E*, y cambios bruscos en los valores de los índices ambientales, *IGEI*, y de sostenibilidad, *IGMSP*. Cuando una empresa desaparece de la red, sus flujos dejan de computar en el cálculo del *IGEI*, y por tanto su valor será menor, pero no debido a que se hayan establecido más intercambios (Figura 43(d)). Adicionalmente, el indicador *IGSMP* muestra que en un escenario crítico en el que desaparecen empresas, como puede ser el ensayo *Res.04*, un sistema de menos empresas es más sostenible comparativamente con el escenario *Base* (Figura 43(b)).

A la vista de los resultados, se comprueba que el aumento del coste de los recursos puede ser efectivo hasta un cierto rango, como el incremento del 1% en *Res.02*, en el que la red se formaliza antes que en el escenario *Base*, y se alcanzan valores de los indicadores de medida *IGEP* e *IGEI* próximos al escenario *Base*. Sin

embargo, aplicando ratios mayores, se obtienen resultados contrarios a lo deseado debido a la elevada sensibilidad del modelo ante el coste de los recursos. En conclusión, el modelo es muy sensible a un escenario de escasez de recursos naturales. Solo aplicando pequeños ratios de influencia se podrán conseguir efectos próximos a los buscados.



Leyenda	Base (Negro)	Res.01 (Rojo)	Res.02 (Verde)	Res.03 (Morado)	Res.04 (Azul)	Res.05 (Naranja)
Ratio de influencia	0%	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%

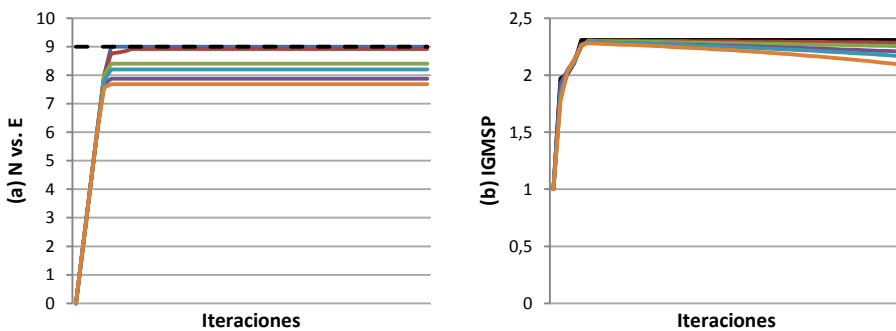
Figura 43. Gráficas de los índices de medida en el escenario Res. durante 50 iteraciones comparados con el escenario Base: (a) N (punteado) vs. E (continuo); (b) IGMSP; (c) IGEP; (d) IGEL.

### **(III.II) Análisis de la influencia del entorno social: escenario Marco legal de residuos estricto (Was).**

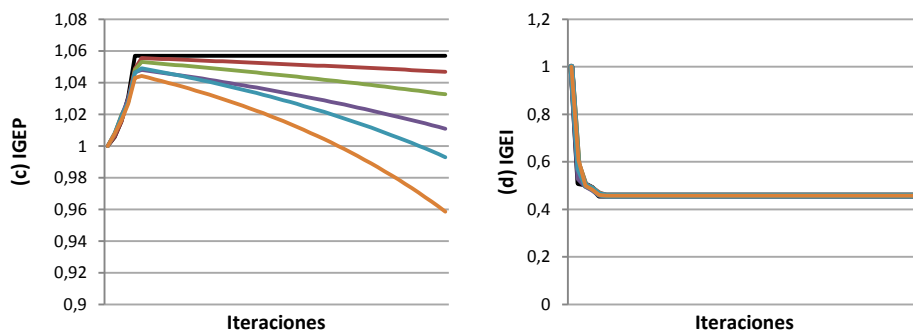
Este segundo escenario pretende representar el efecto que tiene sobre el sistema un marco legal o normativo severo ante los generadores de residuos. Este impacto se representa como un incremento del coste de gestión de los residuos generados  $[Wc]_{Ai}$ . El interfaz está previsto para que el usuario escoja un incremento del coste de hasta 2,5% por ciclo, al igual que en el caso anterior. En la Figura 44 se muestran los indicadores de medida del modelo para los 5 ensayos: *Was.01*, ratio de 0,5%; *Was.02*, ratio de 1%; *Was.03*, ratio de 1,5%; *Was.04*, ratio de 2,0%; y *Was.05*, ratio de 2,5%. La finalidad del estudio de este escenario es comprobar que el incremento de la tasa de gestión de residuos motiva a las empresas a buscar alternativas que eviten el pago de mayores tasas de gestión de sus residuos, como puede ser su intercambio con otra empresa.

El modelo es menos sensible ante este escenario, ya que ninguna empresa desaparece del sistema como en el caso anterior. Sin embargo, en el rango de tasas trabajadas, el incremento de los costes de gestión de residuos no consiguen los efectos buscados. Como se comprueba en la Figura 44(a), cuanto mayor es la tasa de residuos, menor es el número de relaciones establecidas. Se debe tener en cuenta que la población está formada por un 67% de *Agentes Tradicionales*, los cuales al formalizar las relaciones de cooperación priorizan el cumplimiento de sus objetivos económicos. Si bien, cuanto mayor es el incremento del coste de gestión por ciclo, menor será la utilidad alcanzada en una cooperación entre los agentes, ya que obtienen un menor beneficio económico (objetivo prioritario de los *Agentes Tradicionales*) y es menos probable la formación de la red. Así, incrementos moderados como en los ensayos *Was.01* y *Was.02* permiten resultados aceptables en los indicadores de beneficio económico global e impacto ambiental global,  $IGEP > 1$

para todas las iteraciones y  $IGEI < 0,4$  desde la iteración 5. Si bien, el beneficio global económico del sistema,  $IGEP$ , se ve afectado negativamente a partir de la iteración 5. En este momento la red se estabiliza para cualquiera de los ratios aplicados y únicamente sufre el efecto de los costes de gestión incrementados a cada iteración (Figura 44(c)). Cuanto mayor es el incremento de costes de gestión, más rápido decrece el indicador de beneficios económicos globales, así  $IGEP_{Was.05} < IGEP_{Was.04} < IGEP_{Was.03}$ . El indicador de impacto ambiental,  $IGEI$ , es dependiente de la formalización de la red, así su valor será menor cuanto más se disminuyan los flujos residuales, lo cual es favorecido por la formalización de más relaciones, así  $IGEI_{Was.01} > IGEI_{Was.02} > IGEI_{Was.03}$ . El indicador  $IGEI$  se mantiene constante a partir de la iteración 5 para todos los ensayos (Figura 44(d)). Consecuentemente, el indicador de sostenibilidad del sistema refleja el efecto dominante del indicador del beneficio económico global (Figura 44(b)). Así, su valor decrece más notablemente a partir de la iteración 5 para mayores incrementos del coste de gestión como sucedía en el indicador  $IGEP$ . En conclusión, la combinación de los efectos económicos y ambientales, es más favorable para la formalización de la red y su mantenimiento en el tiempo para los ensayos de tasas moderadas  $Was.01$  y  $Was.02$ .







Leyenda	Base (Negro)	Was.01 (Rojo)	Was.02 (Verde)	Was.03 (Morado)	Was.04 (Azul)	Was.05 (Naranja)
Ratio de influencia	0%	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%

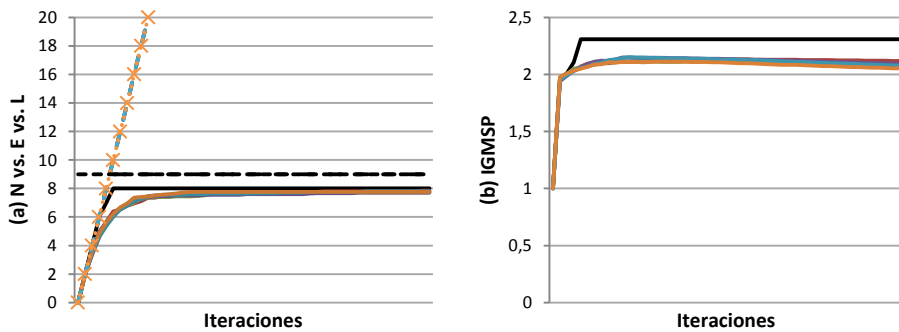
Figura 44. Gráficas de los índices de medida en el escenario Was. durante 50 iteraciones.

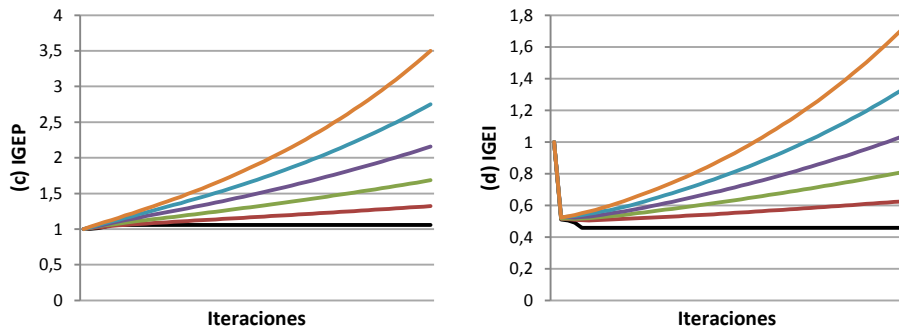
(a) N (punteado) vs. E (continuo); (b) IGMSP; (c) IGEP; (d) IGEL.

### (III.III) Análisis de la influencia del entorno económico: escenario Modificación en la demanda de productos (Dem).

El tercer escenario pretende completar la validación acerca de la coherencia y robustez del modelo computacional. Los escenarios de modificación de la demanda, alteran la cantidad de productos fabricados dentro del sistema  $[Pq]_{Ai}$ , y consecuentemente, afectan a los consumos de recursos y generación de residuos. Por tanto, en cada iteración las relaciones de intercambio también se actualizan. La cantidad de residuo intercambiado se adapta a las nuevas condiciones de la red. En este escenario se estudia un incremento de la demanda constante para todos los flujos de productos, empleando el mismo rango de ratios incrementales que en los casos anteriores, se plantean 5 ensayos: *Dem.01*, ratio 0,5%; *Dem.02*, ratio 1,0%; *Dem.03*, ratio 1,5%; *Dem.04*, ratio 2,0%; *Dem.05*, ratio 2,5%.

La formalización de la red sigue patrones poco predecibles según el valor de la tasa (Figura 45(a)). Si bien la medida de la sostenibilidad del sistema se mantiene en valores en torno al 2,2, ya que los indicadores *IGEP* e *IGEI* se ven incrementados proporcionalmente (Figura 45(b)). Sin embargo, un análisis de los indicadores individuales muestran otras conclusiones. El indicador *IGEP* es resultado del aumento de los beneficios proporcionales al incremento en la demanda, sin aportar información adicional (Figura 45(c)). Atendiendo al *IGEI*, se comprueba que al aumentar la demanda las empresas receptoras del sistema no tienen la capacidad suficiente como para absorber los residuos generados por el incremento de demanda, y por tanto a medida que se incrementa el ratio, mayores son los impactos ambientales globales (Figura 45(d)). Esto se debe a que seis de las ocho empresas receptoras de residuos, se tratan de medianas empresas, cuya infraestructura no puede soportar el incremento de los flujos de las empresas intensivas.





Leyenda	Base (Negro)	Dem.01 (Rojo)	Dem.02 (Verde)	Dem.03 (Morado)	Dem.04 (Azul)	Dem.05 (Naranja)
Ratio de influencia	0%	0.5%	1.0%	1.5%	2.0%	2.5%

Figura 45. Gráficas de los índices de medida en el escenario Dem. durante 50 iteraciones.

(a) N (punteado) vs. L (cruces) vs. E (continuo); (b) IGMSP; (c) IGEP; (d) IGEL.

Resumiendo, estos escenarios demuestran la adaptabilidad del modelo para actualizar los flujos cuantitativos demandados por las empresas, a pesar de su limitada representatividad. Para que estos escenarios se asemejaran a unos impactos más reales se deberían centrar en un bien concreto; por ejemplo, escasez de combustibles, incremento en costes de gestión de residuos peligrosos, aumento en la demanda de un producto nuevo en el mercado. Además de presentarse de forma combinada. Por tanto, un análisis más exhaustivo del modelo computacional requiere el refinamiento de los escenarios, así como del enfoque combinado de los mismos.

*¿Es aplicable la herramienta computacional para transformar áreas industriales tradicionales hacia formas más sostenibles de operación?*

## **4.2. Aplicación a un caso real**

Una vez simulado el modelo con el caso de validación y comprobado que el comportamiento del mismo es apto para la detección de sinergias y simulación de la evolución del sistema bajo diferentes escenarios, se aplica en un proyecto de investigación para el desarrollo de una red de simbiosis industrial entre las Pymes de tres municipios de la Comunidad Autónoma de Cantabria, Torrelavega, Cartes y Polanco (INGEPRO 2012) (Figura 46). Las empresas han participado en el estudio son 104 Pymes, distribuidas en 11 zonas industriales (Tabla 16).



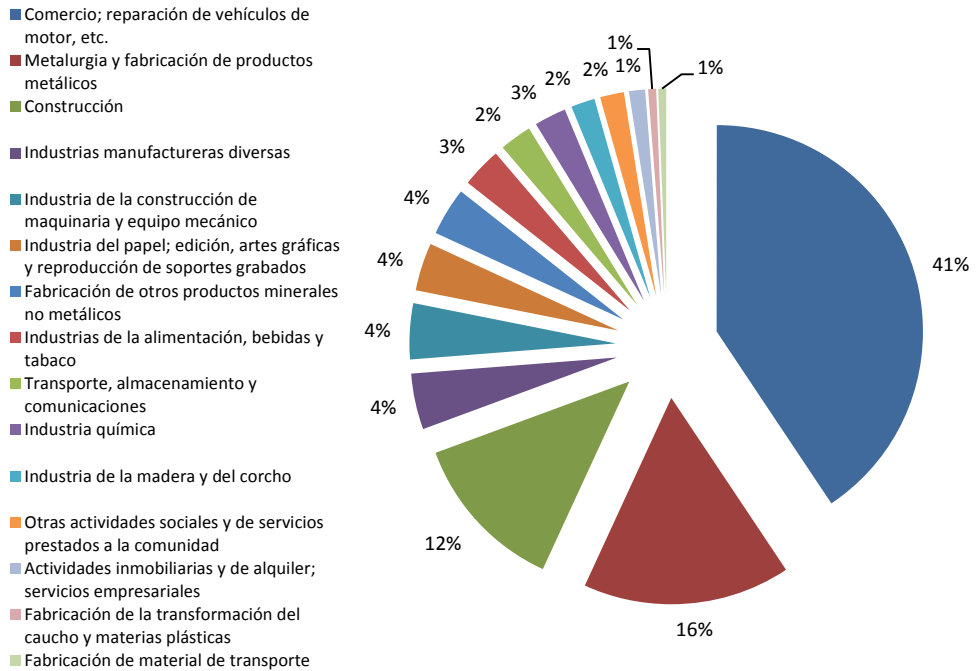
**Figura 46. Ortofoto de la zona de estudio (Pymes de Torrelavega, Cartes y Polanco).**

**Tabla 16. Distribución de empresas en las 11 zonas de estudio (INGEPRO 2012)**

Número de empresas	Zonas industriales	Municipios
7	Barreda	Torrelavega
10	Cerezo-Niño	
15	Campuzano	
8	Sierrapando	
8	Tanos-Viernoles	Cartes
25	Mies de Molladar	
8	Santiago de Cartes	Polanco
9	La Mies	
6	Mar	
3	Polimbesa	
5	Requejada	

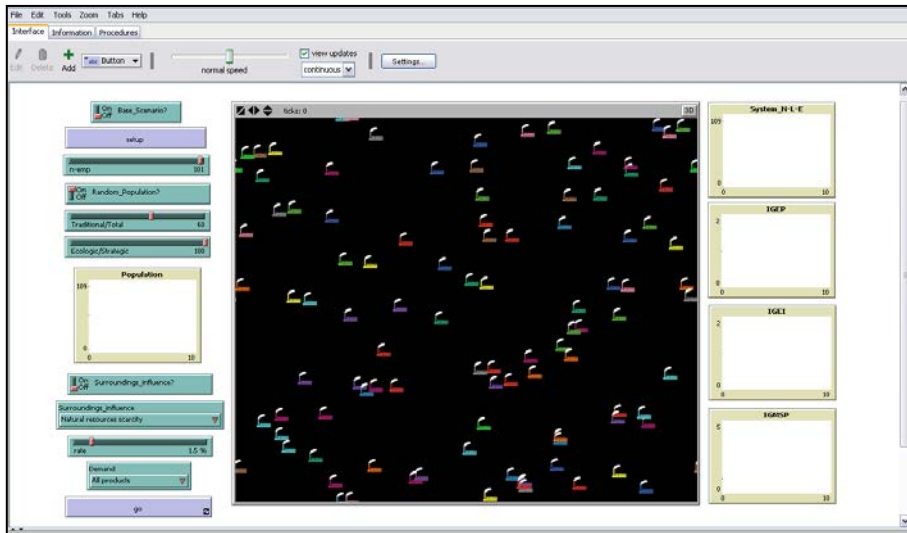
Los principales sectores de actividad involucrados en el análisis son Comercio, reparación de vehículos de motor, motocicletas y ciclomotores, y artículos personales y de uso doméstico (41%); Metalurgia y fabricación de productos metálicos (16%); Construcción (12%); e Industrias manufactureras diversas (4%), como muestra la Figura 47.

Sobre esta población de estudio el proyecto de análisis planteó el análisis de diferentes oportunidades de sinergia, tanto de las posibilidades de establecer relaciones de intercambio de subproductos, como el uso compartido de servicios e infraestructuras de diversos flujos consumidos en las zonas industriales. Para ello, en la ejecución del proyecto se recogió información cualitativa sobre los flujos consumidos y generados (materias primas, residuos, productos, servicios, etc.).



**Figura 47. Distribución porcentual de sectores de actividades de la zona de estudio (INGEPRO 2012).**

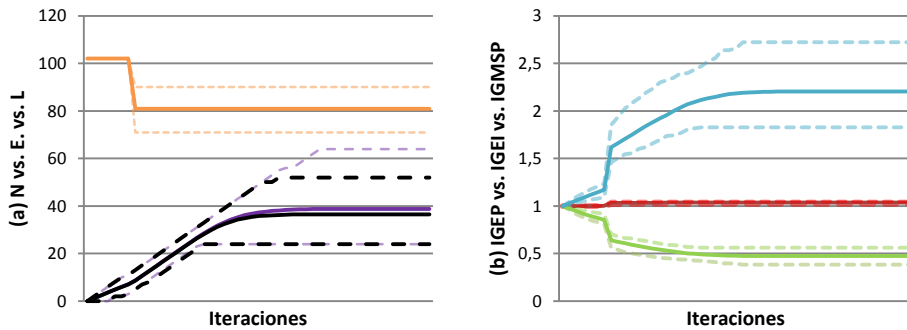
En el análisis preliminar sobre las posibilidades de intercambio materiales se detectaron 30 principales sinergias de sustitución que involucran a parejas de una *Compradora* y una *Vendedora* de las empresas próximas pertenecientes a una misma zona industrial. Si bien, este análisis precisa una revisión inter-zonas que amplíe los límites del sistema y el espectro de posibilidades de intercambio en la región. Para ello, se procede a la implementación de los datos del estudio en el modelo computacional desarrollado (Figura 48).



**Figura 48. Interfaz del modelo computacional con el caso de estudio.**

La inicialización del modelo computacional con los datos de estudio precisa que el selector “*Base\_Scenario?*” esté en “*off*”. De este modo, se solicitará al usuario la ubicación de los ficheros externos en donde se encuentre la información, al menos cualitativa, de la zona de estudio. En este caso, por no disponer de información cuantitativa, las propiedades de los agentes asociadas a las cantidades y costes de los flujos materiales se asignan aleatoriamente de acuerdo a unos rangos correspondientes al tamaño de las empresas. Las propiedades asociadas al tipo de empresa también se asignarán aleatoriamente a los agentes, indicando “*on*” en el selector “*Random\_population?*” del interfaz. La población está formada por un porcentaje 60% *Agentes Tradicionales* y 40% *Agentes Ecológicos*, de acuerdo al perfil más favorable del caso de validación. La influencia del entorno no será considerada en esta valoración inicial, puesto que el propósito es corroborar los resultados analíticos de las posibilidades de cooperación, o en el mejor de los casos ampliarlo con la perspectiva inter-zona que ofrece el modelo computacional.

Para valorar los resultados de este ensayo se han efectuado 100 simulaciones, con la finalidad de amortiguar los efectos de la aleatoriedad introducida por los datos de inicialización. Los resultados mostrados acerca del comportamiento del modelo se corresponden con los valores medios, así como rango de máximos y mínimos de los índices de medida (Figura 49).



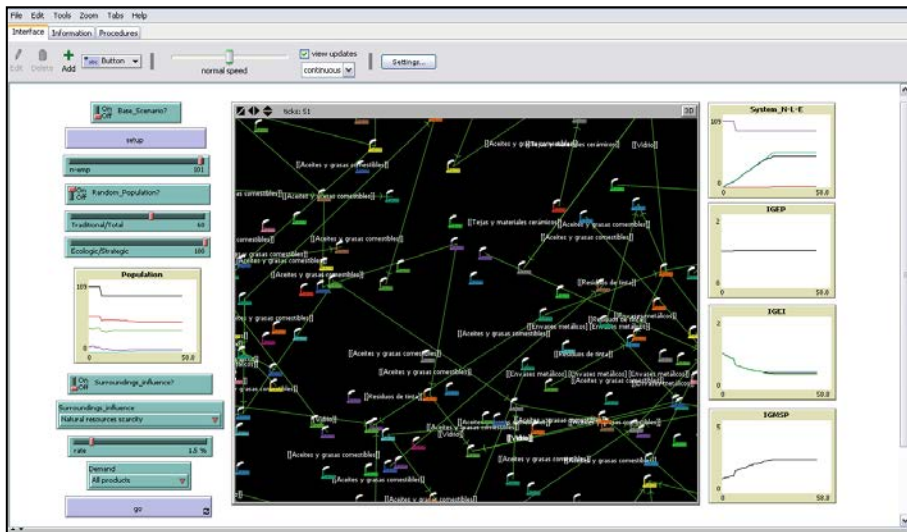
Leyenda	(a) N vs. E vs. L			(b) IGEP vs. IGEE vs. IGMSP		
	N (Naranja)	E (Morado)	L (Negro)	IGEP (Rojo)	IGEE (Verde)	IGMSP (Azul)
Max. <sub>1150</sub>	90	64	52	1,0476	0,5619	2,7224
Media <sub>1150</sub>	81	39	37	1,0358	0,4727	2,2055
Min. <sub>1150</sub>	71	24	24	1,0238	0,3847	1,8269

**Figura 49. Índices de medida para el caso práctico.**

De acuerdo a los resultados, se puede comprobar que el empleo de datos cuantitativos aleatorios provoca una emigración de empresas del sistema, cercana al 20%, después de la iteración programada en la que se permite esta desaparición (iteración 7, establecida como medida de control) (Figura 49(a)). La frecuencia de evaluación  $f$  (26), está restringida por el menor flujo de residuos del sistema, en este caso 2. Si bien, la formalización de la red de intercambios sigue una progresión prácticamente lineal hasta la iteración 26, a partir de la cual, el número de intercambios ( $E$ ) se mantiene constante. La red está formada por una media de 39 relaciones, aunque se puede observar un valor máximo de 52 (Figura 49(a)), valor algo mayor que las oportunidades detectadas analíticamente en el estudio previo



(INGEPRO 2012). Atendiendo a los indicadores de medida, a pesar de emplear valores cuantitativos aleatorios, se comprueba que el establecimiento de intercambios materiales generaría beneficios económicos globales ( $IGEP > 1$ ), y una mejora del comportamiento ambiental gracias al desarrollo de la red (desde la iteración 20  $IGEI < 0,5$ ) (Figura 49(b)).



**Figura 50. Captura de pantalla de una simulación del caso de estudio**

Aunque los resultados de estos ensayos no sean concluyentes, con respecto al estudio analítico previo (INGEPRO 2012) se detecta que un enfoque de la población de estudio global, entre zonas industriales, arroja la existencia de más posibilidades de sinergias de sustitución material que de otra forma quedarían ocultas (Figura 50). Si bien, un análisis más exhaustivo empleando los datos cuantitativos asociados a los flujos y acerca del tipo de empresas según sus patrones de comportamiento, permitirá una predicción más consistente con la realidad. Además de poder simular su comportamiento en diferentes escenarios que consideren perturbaciones del entorno.

*¿Cómo se puede mejorar el  
modelo computacional?*

### **4.3. Evolución y mejoras a implementar en el modelo**

El modelo computacional descrito pretende ayudar en el proceso de transformación de áreas industriales tradicionales a eco-industriales. Este modelo ofrece soporte a la detección de posibles cooperaciones entre empresas para favorecer la creación de una red de intercambios de materia y subproductos, así como estudiar la evolución de dicha red ante diferentes circunstancias de operación. El análisis de este modelo computacional completa el proceso de modelado de sistemas complejos que comenzó con la definición del modelo conceptual de trabajo y se concretó en el modelo analítico.

La implementación computacional con el caso de validación de Kalundborg arroja la validez y aptitud del modelo para su propósito de detección de la red de intercambios, así como el estudio de su evolución ante cambios internos y externos. En cuanto a la valoración de los diferentes ensayos indican su adaptabilidad a los escenarios de trabajo, se deduce que poblaciones mixtas con baja proporción de agentes *Ecológicos* y *Estratégicos*, favorecen la estabilidad de la red. Adicionalmente, la incorporación de tasas económicas moderadas para regular los impactos del entorno natural (reducir el consumo de recursos naturales y el depósito de residuos) son suficientes para provocar que el sistema reaccione de forma favorable, tratando de

reducir sus impactos medio ambientales y manteniendo la estabilidad de las empresas en el mercado. Complementariamente, la aplicación del modelo al caso de estudio, demuestra la validez del mismo para la detección de sustituciones materiales y simulación de la evolución de nuevas redes.

No obstante, a partir de este momento se pueden plantear retos muy ambiciosos en la evolución del modelo, como el diseño y modelado de un macro-sistema para integrar el sistema urbano al industrial. Si bien, la evolución del modelo se pueden organizar en horizontes de corto, medio y largo plazo (Tabla 17). Las modificaciones previstas a corto plazo, se corresponden con aspectos relacionados con la definición de nuevos agentes del modelo. Así por ejemplo, la definición de agentes urbanos, lo cual permita integrar núcleos urbanos como nuevos eslabones de la red de intercambios, o de agentes políticos, como gobierno local o asociaciones, que repercuten en la evolución del modelo. La integración de nuevas tipologías de agente requerirá un estudio teórico y analítico que podría afectar a diversos módulos de la programación básica del modelo, como ya se exploraba en contribuciones propuestas en congresos internacionales (Ruiz y Romero 2014, Ruiz *et al.* 2010). La evolución en un horizonte a medio plazo se centra en modificaciones de procedimientos analíticos concretos. Por ejemplo, la evaluación de otras formas de cooperación basadas en la simbiosis industrial, como el uso compartido de infraestructuras o de servicios comunes de abastecimiento; o la introducción de un nuevo módulo para la evolución del comportamiento de los agentes en función de sus decisiones de cooperación. Finalmente, en un horizonte a largo plazo se propone incluir nuevos procedimientos computacionales en el modelo. Entre ellas se observa la modificación de escenarios de trabajo para estudiar los efectos aislados de la influencia del entorno sobre flujos elementales; así como la modificación del procedimiento de evaluación de intercambio de flujos, incluyendo parámetros adicionales en la negociación, como el precio de venta del residuo o distancia entre las empresas.

**Tabla 17. Evolución del modelo en el horizonte temporal.**

<b>Horizonte de evolución</b>	<b>Inversión temporal</b>	<b>Etapas de modelado afectada</b>
Evolución a corto plazo	Elevada	Modelo conceptual
Evolución a medio plazo	Moderada	Modelo analítico
Evolución a largo plazo	Escasa	Modelo computacional

# **CAPÍTULO 5.**

## **CONCLUSIONES**

---



## 5.1. Conclusiones

Respecto a la hipótesis que originaba la presente investigación:

*“Demostrar que en las áreas industriales existe y es posible una forma de operación más sostenible que la actual”.*

En la presente Tesis Doctoral se demuestra la existencia de un modelo de áreas industriales más sostenible, viable para guiar la conversión de la forma de operación tradicional. Las aptitudes del modelo de referencia, parque eco-industrial, se demuestran mediante el desarrollo e implementación de una herramienta computacional, la cual detecta las oportunidades de colaboración basadas en las prácticas de la ecología industrial y simula la evolución del comportamiento cooperativo del área.

El modelo computacional resulta del proceso de modelado de sistemas complejos partiendo de la abstracción de las propiedades del sistema real de referencia, el parque eco-industrial. Tratando de mantener la máxima fidelidad posible, este proceso de abstracción ha considerado las líneas teóricas más actuales del campo de la ecología

industrial, orientadas al estudio de la complejidad (Dijkema y Basson 2009, Ehrenfeld 2009); así como las particularidades operativas identificadas en las experiencias prácticas de parques eco-industriales, según las categorías de parque eco-industrial planificado, PEIP, y simbiosis auto-organizada, SOS (Chertow y Ehrenfeld 2012). Estas premisas de partida se han respetado en las etapas siguientes del proceso de modelado eligiendo la técnica de modelado basado en agentes, para la formalización analítica del marco conceptual y para su posterior implementación computacional. Este paradigma de modelado se ha elegido frente a la dinámica de sistemas y los modelos híbridos por ser la técnica más adecuada para representar las propiedades del modelo conceptual. Especialmente, por permitir la detección de las sustituciones materiales de recursos por residuos o subproductos y la representación el comportamiento social complejo de las empresas. Finalmente, los enunciados analíticos se implementan en un modelo computacional basado en agentes, viable para la detección de los posibles intercambios materiales en un sistema industrial, así como para reproducir el comportamiento social y su evolución en el tiempo. Esta capacidad se valida mediante la implementación del caso de simbiosis industrial de Kalundborg (Dinamarca). Un análisis posterior del modelo sometido a diferentes escenarios de trabajo arroja la aplicabilidad y flexibilidad del mismo. Después de su validación, el modelo computacional basado en agentes se aplica a un caso de estudio en el Norte de España y queda comprobada y demostrada la aptitud de la herramienta computacional para fomentar y motivar la puesta en práctica de estas estrategias de cooperación en las áreas tradicionales.

Como conclusiones elementales resultantes de las etapas de la investigación se señalan las siguientes:



- *Las experiencias prácticas de parques eco-industriales demuestran un modo de operación sostenible que se puede adoptar en la conversión de las áreas industriales tradicionales.*
- *La complejidad inherente a la naturaleza socio-técnica de un parque eco-industrial, provoca que su estudio y simulación se deba enfocar desde el prisma de los sistemas adaptativos complejos.*
- *El modelo conceptual sienta las bases para el desarrollo de la herramienta computacional y supone una contribución notable en el área de conocimiento de la ecología industrial, dada la escasez de propuestas documentadas en este ámbito. Además, en esta Tesis Doctoral se abordan todas las etapas del modelado de forma íntegra.*
- *El paradigma de modelado basado en agentes representa la totalidad de las proposiciones planteadas en el modelo conceptual, captando las singularidades asociadas a las cooperaciones creadas en los parques eco-industriales.*
- *La herramienta resultante o modelo computacional consigue reproducir el comportamiento y la evolución real de experiencias prácticas de parques eco-industriales, demostrando ser un soporte apto para apoyar el proceso de transformación de las áreas industriales tradicionales hacia formas de operación más sostenibles.*
- *El modelo desarrollado supone una aportación original y única para la detección de sustituciones materiales y representación del comportamiento de negocio empresarial, en comparación con el escaso material accesible a*

*los investigadores en el momento actual y el estado embrionario en el que se encuentran las aportaciones halladas.*

## 5.2. Líneas futuras de investigación

El trabajo presentado en esta Tesis Doctoral responde a las preguntas de investigación planteadas inicialmente, pero a su vez abre nuevas líneas de trabajo que motivan futuras investigaciones.

Las líneas de trabajo propuestas a continuación, se orientan tanto a la mejora de la herramienta computacional, como hacia el desarrollo de nuevas sub-líneas de investigación del grupo:

- **Evolución y refino del modelo computacional** mediante la puesta en práctica de las mejoras del modelo en el horizonte del corto, medio y largo plazo. Estas mejoras fueron sugeridas en el apartado **4.3. Evolución y mejoras a implementar en el modelo**, proponiendo el modelado de nuevos agentes, la consideración de escenarios de trabajo más realistas, o la integración de mecanismos de aprendizaje en los modos de comportamiento de los agentes, entre otras. Adicionalmente, el refino del modelo incluye:

- **Actualización y mejora de la base de conocimiento** que soporta la detección de sinergias u oportunidades de colaboración mediante la alimentación de más casos prácticos. El desarrollo tecnológico y el origen de nuevos parques eco-industriales están en constante crecimiento, pudiéndose identificar y poner en práctica nuevas formas de cooperación. Para asegurar la eficaz detección de oportunidades con la herramienta computacional, la base de conocimiento debe ser progresivamente actualizada. Esta información adicional, no sólo se refiere a datos sobre intercambios de residuos y subproductos, sino también sobre las infraestructuras y servicios comunes de las áreas industriales para su uso compartido.
- **Combinación del modelo computacional con otras herramientas o plataformas de análisis** que permitan la integración de variables adicionales para la evaluación de las posibilidades de cooperación en el sistema. Por ejemplo, con plataformas computacionales que permitan la representación de un modelo híbrido, lo cual enriquece el proceso analítico y de evaluación de políticas e instrumentos normativos sobre la evolución del sistema; o con sistemas de información geográfica (SIG) y herramientas de análisis de ciclo de vida (ACV), los cuales aportan la evaluación de la componente espacial y la perspectiva de impacto en el ciclo de vida en las negociaciones de las relaciones de cooperación, así como enfocar el estudio de las cooperaciones a diversas escalas espaciales.

- **Diseño y modelado de metabolismo industrial y metabolismo urbano**, lo que requiere un ejercicio reflexivo de replanteo del modelo conceptual con un enfoque macro-sistémico. La propuesta formal de un modelo macro-sistémico que valore la participación de los núcleos urbanos próximos en las redes de cooperación. El trabajo avanzado hasta la fecha en esta materia se ha centrado en una definición preliminar tanto del macro-modelo conceptual como el analítico (Ruiz 2014, Ruiz y Romero 2014, Ruiz *et al.* 2010). Esto destaca el potencial para que se le pueda dar continuidad en el corto plazo.

### 5.3. Contribuciones resultantes de la Tesis Doctoral

Como principales resultados de la presente Tesis Doctoral se destacan los dos artículos de investigación publicados en revistas indexadas en el *Journal of Citation Reports-ScienceEdition* (JCR-SCE). Estos artículos se adjuntan en el **Anexo I. Publicaciones** del presente documento.

El primer artículo se titula “*Framework for Applying a Complex Adaptive System Approach to Model the Operation of Eco-Industrial Parks*” y ha sido publicado en el *Journal of Industrial Ecology* (JCR-2012: 2.276). Este artículo presenta el marco conceptual para el modelado de parques eco-industriales que soportará la transformación de los modelos de operación actuales. En este artículo se sintetizan las propiedades del modelo a partir de un análisis de experiencias prácticas y de las particularidades de los sistemas adaptativos complejos. En esencia, este artículo publica los resultados planteados en el apartado **3.2. Desarrollo del modelo conceptual de parque eco-industrial**, del presente documento.

El segundo artículo se titula “*Proposal of an Agent-Based Analytical Model to Convert Industrial Areas in Industrial Eco-Systems*” y ha sido publicado en *Science of the Total Environment* (JCR-2012: 3.258). Este segundo artículo se ocupa del

planteamiento del modelo analítico. Inicialmente se plantea una revisión de las técnicas existentes para el modelado de sistemas complejos, sintetizando sus respectivas aptitudes y limitaciones. De acuerdo a las propiedades del modelo conceptual se elige el paradigma de modelado más adecuado para su formalización analítica. Finalmente, en este artículo se plantean los bloques del modelo analítico basado en agentes. El trabajo presentado en este artículo se corresponde con el apartado **3.3. Desarrollo del modelo analítico de parque eco-industrial**, de esta Tesis Doctoral.

De forma paralela a la redacción de la presente Tesis Doctoral se ha preparado un tercer artículo, con título propuesto “*Analysis and Validation of a Computational Agent-Based Model to Convert Industrial Areas in Eco-Industrial Systems*”, el cual actualmente se encuentra en proceso de revisión en el Journal of Cleaner Production (JCR-2012: 3.398). Este artículo completa el proceso de modelado de sistemas complejos centrado en la implementación computacional, validación y simulación del modelo. Esta contribución en revisión se adjunta en el **Anexo II. Artículo en Revisión**.

Adicionalmente, durante el periodo de investigación se han presentado diversas contribuciones a congresos de ámbito nacional e internacional, relacionadas con la temática de la Tesis Doctoral.

- Ruiz, M.C., **Romero, E.**, 2014. Integración sostenible de áreas industriales y urbanas mediante modelado basado en agentes. Congreso Latinoamericano REHABEND 2014. Santander, España, 1-4 Abril.
- **Romero, E.**, Ruiz, M.C., Álvarez, R., Bayona, E., 2013. Eco-industrial areas modeling proposal. International Conference on Resource Efficiency in Interorganizational Networks - Reseff 2013. Göttingen, Germany, 13-14 November.

- Boons, F., Spekknik, W., Jiao, W., Isenmann, R., Baas, L., Eklund, M., Baumann, H., Brullot, S., Deutz, P., Gibbs, D., Massard, G., **Romero, E.**, Ruiz, M.C., Verguts, V., Davis, C., Korevaar, G., Brings, N., Costa, I., 2013. Mapping the diversity of industrial symbiosis: comparative analysis of European public and private efforts to develop symbiotic networks. International Conference on Industrial Ecology. ISIE 2013. Ulsan, South Korean, 25-28 June.
- **Romero, E.**, Ruiz, M.C., Diez, A., 2012. Modelado de aspectos influyentes sobre el desarrollo de estrategias sostenibles en áreas industriales. 16th International Congress on Project Engineering. AEIPRO. Valencia, España, 11-12 July.
- **Romero, E.**, Ruiz, M.C., Ortiz, D., Diez, A., 2011. Indicators identification and assessment for industrial areas renewal supporting on industrial ecology. 25<sup>th</sup> International Conference Environmental Informatics. Innovation in Sharing Environmental Observations and Information. EnviroInfo. Ispra, Italy, 5-7 October.
- Spekknik, W., Boons, F., Baas, L., Baumann, H., Brullot, S., Deutz, P., Davis, C., Eklund, M., Gibbs, D., Hatefipour, S., Isenmann, R., Koorevaar, G., Massard, G., **Romero, E.**, Sakr, D., Verguts, V., 2011. Industrial Symbiosis in Europe. 6<sup>th</sup> International Conference on Industrial Ecology. Berkeley, California, 7-10 June.
- Ruiz, M.C., **Romero, E.**, Fernández, J.R., 2010. Urban and industrial metabolism: Towards sustainable planning. XXXVII World Congress on Housing. IAHS. Santander, Spain, 26-29, October.
- Ruiz, M.C., **Romero, E.**, Fernández, I., 2009. Eco-industrial parks' operation design: influential factors. II International Conference on Sustainability Measurement and Modelling. ICSMM 09. Barcelona, España, 5-6 November.



Entre las contribuciones listadas, se destacan las comunicaciones desarrolladas en colaboración con grupos de investigación europeos, que fueron presentadas en conferencias específicas del campo de la ecología industrial (Boons *et al.* 2013, Spekknik *et al.* 2011).

Además, también es necesario remarcar las contribuciones planteadas sobre el modelo integrador de áreas industriales con áreas urbanas, Ruiz y Romero (2014) y Ruiz *et al.* (2012). En estas contribuciones se presenta una de las nuevas líneas de investigación que sugiere la presente Tesis Doctoral, tal y como se recoge en el apartado anterior **5.2 Líneas futuras de investigación** del presente capítulo.

En el ámbito académico, el trabajo desarrollado por la presente Tesis Doctoral ofreció el contexto para la elaboración del Proyecto Fin de Carrera de Máster de Ingeniería Industrial “Diseño de áreas industriales sostenibles mediante modelos basados en agentes” elaborado por el alumno Alejandro Torre Herrería y evaluado en Octubre de 2013 con calificación de 9,00 (sobresaliente). Y pretende ser el origen de futuras propuestas de proyectos de investigación en la titulación de Máster de Investigación en Ingeniería Industrial.



# **CHAPTER 5.**

# **CONCLUSIONS**

---



## 5.1. Conclusions

According to the hypothesis that originates the current investigation:

*“Demonstrate that in the industrial areas exist and is possible  
a more sustainable operation than the current situation”.*

This Dissertation demonstrates the existence of a more sustainable model of industrial areas, viable to guide the conversion of the traditional form of operation. The aptitudes of the reference model are demonstrated through the development and implementation of a computational tool, which detects the cooperative opportunities, based on the practices of Industrial Ecology, and simulates the evolution of the cooperative behavior of the area.

The computational model results from the process of complex systems modeling starting from the abstraction of the properties of the real reference system, the eco-industrial park. In order to conserve the maximum accuracy, the abstraction has considered the more recent theoretical lines in the field of industrial ecology, geared to the study of complexity (Dijkema y Basson 2009, Ehrenfeld 2009); and the operative particularities identified in the practical experiences of eco-industrial parks, based the models of planned eco-industrial parks, PEIP, and self-organizing

symbiosis, SOS (Chertow y Ehrenfeld 2012). These premises have been maintained in the next stages of the modeling process choosing the agent-based modeling technique, for the analytical formalization of the conceptual model and for its following computational implementation. Instead of system dynamics and hybrid models, this modeling paradigm has been chosen due to the adequacy to represent the properties of the conceptual model. Specifically, because this paradigm enables the detection of material substitutions of resources by wastes or byproducts, and the representation of the complex social behavior of the companies. Finally, the analytical statements are implemented in a computational agent-based model, viable to detect the possible material exchanges in an industrial area, and to reproduce the social behavior and its evolution on time. This ability is validated through the implementation of the industrial symbiosis case of Kalundborg (Denmark). The subsequent analysis of the model in different working scenarios shows the applicability and flexibility of the model. After the validation, the computational agent-based model is applied to a real case of Northern Spain, which demonstrates the aptitude of the computational tool to promote and motivate the practical implementation of this cooperative practices in the traditional industrial areas.

The elementary conclusions obtained from the subsequent stages of the research are summed as follows:

- *The practical experiences of eco-industrial parks demonstrate a sustainable mode of operation that could be adopted in the conversion of the traditional industrial areas.*
- *The inherent complexity of the socio-technical nature of the eco-industrial park causes that its study and simulation should be achieved from the complex adaptive system approach.*

- *The conceptual model sets the basis for the development of the computational tool and results a notable contribution in the knowledge area, due to the lack of documented proposals in this field. In addition, this Dissertation integrates all the stages of the modeling process.*
- *The agent-based modeling paradigm completely represents the proposed insights of the conceptual model and captures the singularities of the cooperative relationships established on the eco-industrial parks.*
- *The final tool, or computational model, reproduces the behavior and the real evolution of practical experiences of eco-industrial parks. This demonstrates the aptitude to support the transformation process of traditional industrial areas towards more sustainable modes of operation.*
- *The developed model is an original and unique contribution for the detection of materials' substitutions and the social behavior of companies, in comparison with the limited accessible material to the authors which is currently in an embryonic state.*

## 5.2. Future lines of research

The work presented in this Dissertation answers the research questions initially proposed, but at the same time it opens new lines of work that motivate future investigations.

The proposed lines of work are geared to the improvement of the computational model, as well as to the development of new sub-lines of research:

- **Evolution and refinement of the computational model** through the practical implementation of the model's evolution horizon in short, medium and long term. These improvements were suggested in the section **4.3. Evolution and improvements to implement in the model**, proposing the modeling of new types of agents, the consideration of more realistic working scenarios, or the integration of learning mechanisms on agents' behavioral rules, among others. Additionally, the refinement of the model includes:
  - **Update and improve the knowledge database** that supports the detection of the synergies or collaboration opportunities



including the information of more practical cases. The technological development and new experiences of eco-industrial parks are in constant growth, being able to identify and implement new cooperative practices. In order to an effectively detection of opportunities, the computational knowledge database should be progressively updated. This additional information also includes the infrastructures and common services of the industrial areas for their shared use.

- **Combination of the computational model with other tools of analytical software** that enable the integration of additional variables for the evaluation of the cooperative relationships. For example, the combination with computational software that represents hybrid models, which enriches the analytical process and the evaluation of policies and normative instruments over the system evolution; or the combination with geographical information systems (GIS) and tools for life cycle assessment (LCA), which contributes with the evaluation of the spatial component and with the perspective of the life cycle on the negotiations of the cooperative relationships, and to approach the study by different spatial scales.
- **Design and modeling of industrial metabolism and urban metabolism**, which requires a reflexive process to reconsider the conceptual model with a macro-systemic approach. The formal proposal of a macro-systemic model assesses the participation of near urban areas in the cooperative networks. The work currently developed in this line is focused on a preliminary definition of the conceptual and the analytical

macro-model (Ruiz 2014, Ruiz y Romero 2014, Ruiz *et al.* 2010). This denotes the great potential to develop this line in depth in short term.

### 5.3. Main contributions of the Dissertation

As main results of the Dissertation, it should be noted the two research papers published in journals indexed to the *Journal of Citation Reports-Science Edition* (JCR-SCE). These papers are included in the **Appendix I. Published Papers** of this document.

The first paper is titled “*Framework for Applying a Complex Adaptive System Approach to Model the Operation of Eco-Industrial Parks*” and has been published in the *Journal of Industrial Ecology* (JCR-2012: 2.276). This paper presents the conceptual framework for modeling eco-industrial parks that supports the transformation of current operative models. This paper synthesizes the model’s properties based on the analysis of practical experiences and on the characteristics of complex adaptive systems. In essence, this paper published the results exposed on the section **3.2. Development of a conceptual model of eco-industrial park**, of this Dissertation.

The second paper is titled “*Proposal of an Agent-Based Analytical Model to Convert Industrial Areas in Industrial Eco-Systems*” and has been published in *Science of the Total Environment* (JCR-2012: 3.258). This second paper is focused on

the proposal of the analytical model. It begins with a review of the paradigms that represent the complex systems, summarizing their aptitudes and limitations. According to the conceptual model's properties, the more suitable paradigm is chosen for its analytical formalization. Finally, this paper proposes the building blocks of the agent-based analytical model. Therefore, this paper corresponds with the section **3.3. Development of the analytical model of eco-industrial park**, of this Dissertation.

At the same time of the elaboration of this document a third paper titled "*Analysis and Validation of a Computational Agent-Based Model to Convert Industrial Areas in Eco-Industrial Systems*" has been submitted to the *Journal of Cleaner Production* (JCR-2012: 3.398), and it is currently in the reviewing process. This paper completes the modeling process of complex systems focusing on the computational implementation, validation and simulation of the model. This contribution is included in the **Appendix II. Article in Review**.

Additionally, during the research period several contributions related to the Dissertation have been presented to National and International Congresses.

- Ruiz, M.C., **Romero, E.**, 2014. Integración sostenible de áreas industriales y urbanas mediante modelado basado en agentes. [*Sustainable integration of industrial and urban areas through agent-based modeling*] Congreso Latinoamericano REHABEND 2014. Santander, España, 1-4 Abril.
- **Romero, E.**, Ruiz, M.C., Álvarez, R., Bayona, E., 2013. Eco-industrial areas modeling proposal. International Conference on Resource Efficiency in Interorganizational Networks - Reseff 2013. Göttingen, Germany, 13-14 November.
- Boons, F., Spekkink, W., Jiao, W., Isenmann, R., Baas, L., Eklund, M., Baumann, H., Brullot, S., Deutz, P., Gibbs, D., Massard, G., **Romero, E.**, Ruiz, M.C., Verguts, V., Davis, C., Korevaar, G., Brings, N., Costa, I., 2013.

Mapping the diversity of industrial symbiosis: comparative analysis of European public and private efforts to develop symbiotic networks. International Conference on Industrial Ecology. ISIE 2013. Ulsan, South Korean, 25-28 June.

- **Romero, E.**, Ruiz, M.C., Diez, A., 2012. Modelado de aspectos influyentes sobre el desarrollo de estrategias sostenibles en áreas industriales. [*Modeling the influential aspects over the development of sustainable strategies in industrial areas*] 16th International Congress on Project Engineering. AEIPRO. Valencia, España, 11-12 July.
- **Romero, E.**, Ruiz, M.C., Ortiz, D., Diez, A., 2011. Indicators identification and assessment for industrial areas renewal supporting on industrial ecology. 25<sup>th</sup> International Conference Environmental Informatics. Innovation in Sharing Environmental Observations and Information. EnviroInfo. Ispra, Italy, 5-7 October.
- Spekknik, W., Boons, F., Baas, L., Baumann, H., Brullot, S., Deutz, P., Davis, C., Eklund, M., Gibbs, D., Hatefipour, S., Isenmann, R., Koorevaar, G., Massard, G., **Romero, E.**, Sakr, D., Verguts, V., 2011. Industrial Symbiosis in Europe. 6<sup>th</sup> International Conference on Industrial Ecology. Berkeley, California, 7-10 June.
- Ruiz, M.C., **Romero, E.**, Fernández, J.R., 2010. Urban and industrial metabolism: Towards sustainable planning. XXXVII World Congress on Housing. IAHS. Santander, Spain, 26-29, October.
- Ruiz, M.C., **Romero, E.**, Fernández, I., 2009. Eco-industrial parks' operation design: influential factors. II International Conference on Sustainability Measurement and Modelling. ICSMM 09. Barcelona, España, 5-6 November.

Among the commented contributions, two articles (Boons *et al.* 2013; Spekknik *et al.* 2011) were elaborated in collaboration with European Research Groups and presented in specific Conferences of the field of Industrial Ecology.

In addition, the work developed about the integrative model of industrial areas and urban areas should be also pointed out, Ruiz y Romero (2014) and Ruiz *et al.* (2012). These contributions gathers the preliminary work developed about one of the sub-lines of research proposed in this Dissertation, as it was noted in the section **5.2.**

### **Future lines of research.**

In the academic context, the work developed in this Dissertation set out the framework for the elaboration of the Project of Master's Degree in Industrial Engineering "Design of sustainable industrial areas through agent based models" by the student Alejandro Torre Herrería and graded with 9,00 (excellent). Therefore, this PhD. Thesis aims to propose additional research projects on the Master's Degree in Industrial Engineering Research.

# **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

---





## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ashton, W.S., 2009. The structure, function and evolution of a regional industrial ecosystem. *Journal of Industrial Ecology*, 13 (2), pp. 228-246.
- Ayres, R.U., Ayres, L.W., 1996. *Industrial ecology. Towards closing the materials cycle*. Cheltenham, UK: Edward Elgar.
- Bakshi, B.R., Fiksel, J., 2003. The quest for sustainability: Challenges for process systems engineering. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 49 (6), pp. 1350-1358.
- Barbati, M., Bruno, G., Genovese, A., 2012. Applications of agent-based models for optimization problems: A literature review. *Expert Systems Applications*, 39, pp. 6020-6028.
- Başar, T., Olsder, G.J., 1999. *Dynamic Noncooperative Game Theory*. Second Edition. New York, USA: Siam.
- Bichraoui, N., Guillaume, B., Halog, A., 2013. Agent-based modelling simulation for the development of an industrial symbiosis -Preliminary results-. *Procedia Environmental Sciences*, 17, pp. 195-204.
- Boccarda, N., 2004. *Modeling complex systems*. New York, USA: Springer-Verlag.
- Boons, F.A., 2008. Self-organization and sustainability: The emergence of a regional industrial ecology. *Emergence: Complexity and Organization*, 10 (2), pp. 41-52.
- Boons F.A., Baas L.W., 1997. Types of industrial ecology: The importance of coordination. *Journal of Cleaner Production*, 5 (1-2), pp. 79-86.

- Boons F., Berends, M., 2001. Stretching the boundary: The possibilities of flexibility as an organizational capability in industrial ecology. *Business Strategy and the Environment*, 10, pp. 115-124.
- Borshchev, A., Filippov, A., 2004. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. *Proceedings of the 22<sup>nd</sup> International Conference of the System Dynamics Society*. Oxford, England, July 25 to 29.
- Cámaras de Comercio, 2014. Bolsa Industrial de Subproductos. [www.camaras.org/publicado/mambiente/bolsa\\_774.html](http://www.camaras.org/publicado/mambiente/bolsa_774.html) [Último acceso: Marzo 2014]
- Cao, K., Feng, X., Wan, H., 2009. Applying agent-based modeling to the evolution of eco-industrial systems. *Ecological Economics*, 68, pp. 2868-2876.
- Centre of Excellence in Cleaner Production, 2007. Regional resource synergies for sustainable development in heavy industrial areas: an overview of opportunities and experiences. Curtin University of Technology, Perth.
- CEOE, 2014. <http://www.ceoe.es> [Último acceso: Marzo 2014]
- CEPE, 2014a. <http://www.poligonoscepe.org/proyectos-detalle.asp?id=5> [Último acceso: Marzo 2014]
- CEPE, 2014b. <http://www.sueloindustrial.net/default.aspx> [Último acceso: Marzo 2014]
- Chertow, M.R., 2000. Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, pp.313-337.

- Chertow, M.R., 2007. "Uncovering" industrial symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 11 (1), pp. 11-30.
- Chertow, M.R., 2009. Dynamics of geographically based industrial ecosystems. In: M. Ruth, B. Davidsdottir (eds.) *Dynamics of regions and networks in industrial ecosystems*. Cheltenham, UK: Edward Elgar. pp 6-27.
- Chertow, M., Ehrenfeld, J., 2012. Organizing self-organizing systems: Toward a theory of industrial symbiosis, *Journal of Industrial Ecology*, 16, pp. 13-27.
- Chew, I.M.L., Tan, R.R., Foo, D.C.Y., Chiu, A.S.F., 2009. Game theory to the analysis of inter-plant integration in an eco-industrial park. *Journal of Cleaner Production*, 17, pp. 1611-1619.
- Cohen-Rosenthal, E., 2003. What is eco-industrial development? In E. Cohen-Rosenthal y J. Musnikow (eds.): *Eco-industrial Strategies. Unleashing synergy between economic development and the environment*. Cornell University, USA: Greenleaf Publishing.
- Côte, R., Cohen-Rosenthal, E., 1998. Designing eco-industrial parks: a synthesis of some experiences. *Journal of Cleaner Production*, 6, pp. 181-188.
- Côte, R., Crawford, P., 2003. A case study in eco-industrial development: The transformation of Burnside Industrial Park. In E. Cohen-Rosenthal y J. Musnikow (eds.): *Eco-industrial Strategies. Unleashing synergy between economic development and the environment*. Cornell University, USA: Greenleaf Publishing.
- Côte, R., Hall, J., 1995. Industrial parks as ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, 3 (1-2), pp. 41-46.

- Côte, R., Smolenaars, T., 1997. Supporting pillars for industrial ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, 5 (1-2), pp. 67-74.
- Danish Environmental Protection Agency, 1999. Waste in Denmark. Published by Ministry of Environment and Energy, Denmark.
- Dijkema, G.P.J., Basson, L., 2009. Complexity and industrial ecology: Foundations for a transformation from analysis to action. *Journal of Industrial Ecology*, 13 (2), pp. 157-164.
- Dixit, A., Skeath, S., 1999. *Games of strategy*. New York, USA: WW Norton and Company.
- Eckelman, M.J., Chertow, M.C., 2009. Quantifying life cycle environmental benefits from the reuse of industrial materials in Pennsylvania. *Environmental Science and Technology*, 43, pp. 2550-2556.
- Ehrenfeld, J., 2004. Industrial ecology: a new field or only a metaphor? *Journal of Cleaner Production*, 12, pp 825-831.
- Ehrenfeld, J., 2009. Understanding of complexity expands the reach of industrial ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 12 (2), pp. 165-167.
- Ehrenfeld, E., Getler, N., 1997. Industrial Ecology in Practice. The evolution of interdependence at Kalundborg. *Journal of Industrial Ecology*, 1 (1), pp. 67-79.
- Fernández, I. 2009. Desarrollo de un modelo de localización y contribución al diseño de la operación de áreas industriales sostenibles. Tesis Doctoral, University of Cantabria, Cantabria, Spain.

- Fernández, I., Ruiz, M.C., 2009. Descriptive model and evaluation system to locate sustainable industrial areas. *Journal of Cleaner Production*, 17(1), pp. 87–100.
- Fiksel, J., 2003. Designing resilient, sustainable systems. *Environmental Science and Technology*, 37 (23), pp. 5330-5339.
- Fiksel, J., Bakshi, B.R., Baral, A., Guerra, E., Dequervain, B., 2011. Comparative life cycle assessment of beneficial applications for scrap tires. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 13 (1), pp. 19-35.
- Francois, D., Julien, A., Kerzreho, J.P., Chateau, L., 2009. Full-scale experimentations on alternative materials in roads: Analysis of study practices. *Waste Management*, 29 (3), pp. 1076-1083.
- Gibbs, D., Deutz, P., 2005. Implementing industrial ecology? Planning for eco-industrial parks in the USA. *Geoforum*, 36 (4), pp. 452-464.
- Gibbs, D., Deutz, P., 2007. Reflections on implementing industrial ecology through eco-industrial park development. *Journal of Cleaner Production*, 15, pp. 1683-1695.
- Graedel, T.E., Allenby B.R., 2003. *Industrial ecology*. 2ª Ed., Upper Sadle River, NJ, USA: Pearson Education.
- Grimes-Casey, H.G., Seager, T.P., Theis, T.L., Powers, S.E., 2007. A game theory framework for cooperative management of refillable and disposable bottle lifecycles. *Journal of Cleaner Production*, 15, pp. 1618-1627.
- Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., Goss-Custard, J., Grand, T., Heinz, S.K., Huse, G., Huth, A., Jepsen, J.U., Jørgensen,

- C., Mooij, W.M., Müller, B., Pe'er, G., Piou, C., Railsback, S.F., Robbins, A.M., Robbins, M.M., Rossmanith, E., Rüger, N., Strand, E., Souiss, S., Stillman, R.A., Vabø, R., Visser, U., DeAngelis, D.L., 2006. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling*, 198, pp. 115-126.
- Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D.L., Polhill, J.G., Giske, J., Railsback, S.F., 2010. The ODD protocol: A review and first update. *Ecological Modelling*, 221, pp. 2760-2768.
- Größler, A., Stotz, M., Schieritz, N., 2003. A software interface between system dynamics and agent-based simulations – Linking Vensim® and RePast®. Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on System Dynamics Society 2003, New York City, USA, July 20-24.
- Haskins, C., 2006. Multidisciplinary investigation of eco-industrial parks. *Systems Engineering*, 9 (4), pp. 313-329.
- Haskins, C., 2008. Systems engineering analyzed, synthesized, and applied to sustainable industrial park development. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.
- Holland, J.H., 2006. Studying complex adaptive systems. *Journal of Systems Science and Complexity*, 19(1), pp. 1-8.
- Holland, J.H., Miller, J.H., 1991. Artificial adaptive agents in economic theory. *American Economic Review*, 81 (2), pp. 365-370.
- Holling, C.S., 2001 Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems. *Ecosystems*, 4, pp. 390-405.

- INGEPRO (Grupo de investigación en Ingeniería y Gestión de Proyectos), 2012. Bases para el desarrollo de proyectos de simbiosis industrial en el municipio de Torrelavega. Universidad de Cantabria en colaboración con la Agencia de Desarrollo Local de Torrelavega.
- Isenmann, R., 2009. Bringing together environmental informatics and industrial ecology – The role of ICT in industrial symbiosis projects. Proceedings of Environmental Informatics and Industrial Environmental Protection: Concepts, Methods and Tools, EnviroInfo 2009. Berlin, Germany, September 9 to 11.
- ISO, 1997. ISO 14040: Gestión medioambiental, ACV, Principios y estructura.
- Izquierdo, L.R., Galán, J.M., Santos, J.I., del Olmo, R., 2008. Modelado de sistemas complejos mediante la simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. [Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales, 16 (jul-dec), pp. 85-112.
- Jacobsen, N.B., 2006. Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark. A quantitative assessment of economic and environmental aspects. *Journal of Industrial Ecology*, 10 (1-2), pp.239-254.
- Kay, J.J., 2002. On complexity theory, exergy and industrial ecology: Some implications for construction ecology. In: C.J. Kibert, J. Sendzimir, G.B. Guy (eds.) *Construction ecology: Nature as the basis for green buildings*. London, UK: Spon Press.
- Korhonen, J., 2001. Four ecosystem principles for an industrial ecosystem. *Journal of Cleaner Production*, 9, pp. 253-259.

- Korhonen, J., Wihersaari, M., Savolainen, I., 1999. Industrial ecology of a regional energy supply system: The case of Jyväskylä region. *Journal of Greener Management International*, 26, pp. 57-67.
- Kuo, N.W., Hsiao, T.Y., 2008. An exploratory research of the application of natural capitalism to sustainable tourism management in Taiwan. *Journal of Cleaner Production*, 16 (1), pp. 116-124.
- Lambert, A.J.D., Boons, F.A., 2002. Eco-industrial parks: stimulating sustainable development in mixed industrial parks. *Technovation*, 22, pp. 471-484.
- Lättilä, L., Hilletoft, P., Lin, B., 2010. Hybrid simulation models – when, why, how? *Expert Systems and Applications*, 37, pp. 7969-7975.
- Li, J., Wei, Z., 2009. The MAS-based information model of eco-industrial system. *Proceedings of IEEE 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management 2009*. Beijing, China, October 21-23.
- Lifset, R., 2009. Industrial ecology in the age of input-output. In S. Suh (eds.) *Handbook on input-output economics for industrial ecology*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- Liwarska-Bizukojc, E., Bizukojc, M., Marcinkowski, A., Doniec, A., 2009. The conceptual model of an eco-industrial park based upon ecological relationships. *Journal of Cleaner Production*, 17, pp. 732-741.
- Lombardi, D.R., Lyons, D., Shi, H., Agarwal, A., 2012. Industrial symbiosis: Testing the boundaries and advancing knowledge. *Journal of Industrial Ecology*, 16 (1), pp. 2-7.



- López, F., 2011. La regeneración de áreas industriales. Madrid, España: Sepes Entidad Estatal del Suelo.
- Lorenz, T., Jost, A., 2006. Towards an orientation framework in multi-paradigm modeling. Proceedings of the 24<sup>th</sup> International Conference of the System Dynamics Society 2006. Nijmegen, The Netherlands, July 23-27.
- Lou, H.H., Kulkarni, M.A., Singh, A., Huang, Y.L., 2004. A game theory based approach for emergy analysis of industrial ecosystem under uncertainty. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 6 (3), pp. 156-161.
- Lovins, L.H., Lovins, A.B., 2001. Natural capitalism: Path to sustainability? *Corporate Environmental Strategy*, 8 (2), pp. 99-108.
- Lowe, E.A., 1997. Creating by-product resource exchanges: strategies for eco-industrial parks. *Journal of Cleaner Production*, 5 (1-2), pp. 57-65.
- Lowe, E.A., Evans, L.K., 1995. Industrial ecology and industrial ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, 3 (1-2), pp. 47-53.
- Massard, G., Jacquat, O., Zürcher, D., 2014. International survey on eco-innovation parks. Learning from experiences on the spatial dimension of eco-innovation. Berna, Suiza: FOEN (Federal Office for Environment)
- Mathews, J.A., Tan, H., 2011. Progress toward a circular economy in China. *Journal of Industrial Ecology*, 15, pp. 435-457.
- Matutinović, I., 2001. The aspects and the role of diversity in socioeconomic systems: an evolutionary perspective. *Ecological Economics*, 39, pp. 239-256.

- Mikulecky, D.C., 2001. The emergence of complexity: science coming of age or science growing old? *Computers and Chemistry*, 25, pp. 341-348.
- Mirata, M., 2004. Experiences from early stages of a national industrial symbiosis programme in the UK: Determinants and coordination challenged. *Journal of Cleaner Production*, 12, pp. 967-983.
- Mirata, M., Emtairah, T., 2005. Industrial symbiosis networks and the contribution to environmental innovation: The case of the Landskrona industrial symbiosis programme. *Journal of Cleaner Production*, 13, pp. 993-1002.
- Myerson, R.B., 1991. *Game theory: analysis of conflict*. Cambridge, MA. USA: Harvard University Press.
- Munier, N., 1995. *Introduction to sustainability. Road to a better future*. Dordrecht, The Netherlands: Springer.
- NISP, 2014. [www.nisp.org](http://www.nisp.org) [Último acceso: Marzo 2014]
- Nikolic, I., Dijkema, G.P.J., van Dam, K.H., 2009. Understanding and shaping the evolution of sustainable large-scale socio-technical systems. In: M. Ruth, B. Davidsdottir (eds.) *Dynamics of regions and networks in industrial ecosystems*. Cheltenham, UK: Edward Elgar. pp. 156-178.
- O'Sullivan, A., 2003. *Urban economics*. Boston, USA: McGraw-Hill/Irwin.
- Paquin, R.L., Howard-Greenville, J., 2009. Facilitating regional industrial symbiosis: Network growth in the UK's National Industrial Symbiosis Programme. In F.A. Boons and J. Howard-Greenville (eds.) *The social embeddedness of industrial ecology*. London, UK: Edward Elgar.

- Paquin, R.L., Howard-Greenville, J., 2012. The evolution of facilitated industrial symbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 16 (1), pp. 83-93.
- Park, H.S., Won, J.Y., 2007. Ulsan eco-industrial park: Challenges and opportunities. *Journal of Industrial Ecology*, 11, pp. 11-13.
- Potgieter, A.E.G., April, K., Bishop, J., 2005. Complex adaptive enterprises. In M. Khosrow-Pour (eds.) *Encyclopedia of information service and technology*. Hersey, PA, USA: Idea Group Publishing.
- Potts, A.J., 1998. Choctaw eco-industrial park: An ecological approach to industrial land-use planning and design. *Landscape and Urban Planning*, 42, pp. 239-257.
- Qu, Q., Qianand, X., Wang, J., 2010. A system dynamics model for the environment management of eco-industrial park. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering 2010*, Chengdu, China, June 18-20.
- Railsback, S.F., 2001. Concepts from complex adaptive systems as a framework for individual-based modelling. *Ecological Modelling*, 139, pp. 47-62.
- Railsback, S.F., Lytinen, S.L., Jackson, S.K., 2006. Agent-based simulation platforms: Review and development recommendations. *Simulation*, 82 (9), pp. 609-623.
- Rammel, C., Dtagl, S., April, K., Bishop, J., 2007. Managing complex adaptive systems – A co-evolutionary perspective on natural resource management. *Ecological Economics*, 63 (1), pp. 9-21.

- Richards, D.J., Frosch, R.A., 1997. The Industrial Green Game: Overview and Perspectives. In: D. J. Richards (eds.) *The Industrial Green Game: Implications for Environmental Design and Management*. Washington, D.C.: National Academies Press.
- Roberts, B.H., 2004. The application of industrial ecology principles and planning guidelines for the development of eco-industrial parks: An Australian case study. *Journal of Cleaner Production*, 12, pp. 997-1010.
- Romero, E., Ruiz, M.C., 2013. Framework for applying a complex adaptive system approach to model the operation of eco-industrial parks. *Journal of Industrial Ecology*, 17 (5), pp. 731-741.
- Romero, E., Ruiz, M.C., 2014. Proposal of an agent-based analytical model to convert industrial areas in industrial eco-systems. *Science of the Total Environment*, 468-469, pp. 394-405.
- Ruiz, M.C., 2014. Planning for Urban Growth and Sustainable Industrial Development. In K. M. Reynolds *et al.* (eds.) *Making Transparent Environmental Management Decisions, Environmental Science and Engineering*. Berlin, Germany: Springer-Verlag, pp. 253-276. DOI: 10.1007/978-3-642-32000-2\_11
- Ruiz, M.C., 2011. Industrial ecology in the planning and management of industrial parks, In: R.D. Newton (eds.) *Environmental Planning*. New York: Nova Science Publishers, pp. 203-220.
- Salmi, O., 2007. Eco-efficiency and industrial symbiosis – A counterfactual analysis of a mining community. *Journal of Cleaner Production*, 15, pp. 1696-1705.

- Sargent, R.G., 2003. Verification and validation of simulation models. Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, New Jersey, USA, December 7-10.
- Schieritz, N., 2002. Integrating system dynamics and agent-based modeling. Proceedings of the 20<sup>th</sup> International Conference on System Dynamics Society, Palermo 2002, Italy, July 28 - August 1.
- Schieritz, N., Größler, A., 2003. Emergent structures in supply chains: A study integrating agent-based and system dynamics modeling. Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on System Dynamics Society 2003, New York City, USA, July 20-24.
- Schieritz, N., Milling, P.M., 2003. Modeling the forest and modeling the trees. A comparison of system dynamics and agent-based simulation. Proceedings of the 21<sup>st</sup> International Conference on System Dynamics Society 2003, New York City, USA, July 20-24.
- Schlarb, M., 2001. Eco-industrial development. A strategy for building sustainable communities. Cornell University.
- Scholl, H.J., 2001. Agent based and system dynamics modeling: A call for cross study and joint research. Proceedings of the 34<sup>th</sup> Annual Hawaii International Conference on System Sciences 2001, Maui, Hawaii, January 3-6.
- Schuster, H.G., 2001. Complex adaptive systems. An introduction. Saarbrücken, Germany: Scator Verlag.
- Schwarz, E.J., Steininger, K.W., 1997. Implementing nature's lesson: the industrial recycling network enhancing regional development. Journal of Cleaner Production, 5 (1-2), pp. 47-56.

Solsbach, A., Marx Gómez, J., Isenmann, R., 2009. Sustainability reporting in networks. Proceedings of Environmental Informatics and Industrial Environmental Protection: Concepts, Methods and Tools, EnviroInfo 2009. Berlin, Germany, September 9 to 11.

Spiegelman, J., 2003. Beyond the food web: Connections to a deeper industrial ecology. *Journal of Industrial Ecology*, 7 (1), pp. 12-23.

Sterman, J.D., 2000. *Business Dynamics. Systems thinking and modeling for a complex world*. Boston, USA: Irwin McGraw Hill.

Sterr, T., Ott, T., 2004. The industrial region as a promising unit for eco-industrial development – Reflections, practical experience and establishment of innovative instruments to support industrial ecology. *Journal of Cleaner Production*, 12 (8-10), pp. 947-965.

Swinerd, C., McNaught, K.R., 2012. Design classes for hybrid simulation involving agent-based and system dynamics models. *Simulation Modelling and Practice Theory*, 25, pp. 118-133.

Symbiosis, 2014. [www.symbiosis.dk](http://www.symbiosis.dk) [Último acceso: Marzo 2014]

Tudor, T., Adam, E., Bates, M., 2007. Drivers and limitations for the successful development and functioning of EIPs (eco-industrial parks): A literature review. *Ecological Economics*, 61, pp. 199-207.

Van Berkel, R., 2007. Drivers and limitations for the successful development and functioning of EIPs (eco-industrial parks): A literature review. *Ecological Economics*, 61 (2-3), pp. 199-207.

- Walcott, S.M., 2009. Industrial parks. *International Encyclopedia of Human Geography*, pp. 408-412.
- Wilensky, U., 1999. Center for Connected Learning and Computer-Based modeling. Northwestern University, Evanston, IL. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> [Último acceso: Marzo 2014].
- Wooldridge, M., 2002. *An introduction to multiagent systems*. Chichester, England: John Wiley & Sons LTD.
- Wooldridge, M., Jennings, N.R., 1995. Intelligent agents: Theory and practice. *Knowledge Engineering Review*, 10, pp. 115-152.
- Yang, S., Feng, N., 2008. A case study of industrial symbiosis: Nanning Sugar Co., Ltd. in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 52 (5), pp. 813-820.
- Zhao, Y., Shang, J., Chen, C., Wu, H., 2008. Simulation and evaluation on the eco-industrial system of Changchun economic and technological development zone, China. *Environmental Monitoring Assessment*, 139, pp. 339-349.
- Zhu, Q., Côte, R.P., 2004. Integrating green supply chain management into an embryonic eco-industrial development: A case study of the Guitang Group. *Journal of Cleaner Production*, 12, pp. 1025-1035.
- Zhu, J., Ruth, M., 2013. Exploring the resilience of industrial ecosystems. *Journal Environmental Management*, 122, pp. 65-75.

## FUENTES WEB DE IMÁGENES

[1] <http://www.pbase.com/bmcmorrow/image/56429816>

[2] <http://www.nordregio.se/Metameny/About-Nordregio/Journal-of-Nordregio/Journal-of-Nordregio-no-1-2011/Industrial-symbiosis-in-Kalundborg/>

[3] <http://www.dac.dk/en/dac-cities/sustainable-cities/all-cases/waste/kalundborg-industrial-symbiosis---waste-makes-resource/>



**ANEXO I.**  
**PUBLICACIONES**

---



## I.1. Framework for applying a complex adaptive system approach to model the operation of eco-industrial parks



<b>Título</b>	<b>Framework for Applying a Complex Adaptive System Approach to Model the Operation of Eco-Industrial Parks</b>
<b>Autores</b>	Elena Romero, M. Carmen Ruiz
<b>Revista</b>	Journal of Industrial Ecology
<b>Volumen 17, Issue 5</b>	Pág. 731-741
<b>Fecha de aceptación</b>	10 SEPTIEMBRE 2012
<b>DOI</b>	10.1111/jiec.12032
<b>Índice de Impacto (JCR 2012)</b>	2.276
<b>Nombre del Área</b>	ENVIRONMENTAL SCIENCES
<b>Lugar que ocupa en el Área</b>	Q2 (76/210)

RESEARCH AND ANALYSIS

## Framework for Applying a Complex Adaptive System Approach to Model the Operation of Eco-Industrial Parks

Elena Romero and M. Carmen Ruiz

### Keywords:

complexity  
industrial ecology  
influential factors  
nested systems  
planned eco-industrial parks (PEIPs)  
self-organizing symbiosis (SOS)

### Summary

Models of eco-industrial parks (EIPs) might help us transform our production systems by fostering the emergence of sustainable EIPs since such models have the potential to support the decision-making processes of cooperative companies that participate and to decrease operational uncertainties. In this article, a conceptual framework for modeling the operation of EIPs is presented. The framework is underpinned by complex adaptive systems theory, industrial ecology, and an analysis of the experiences of existing EIPs. The proposed framework draws on the observed strengths of two types of industrial symbiosis models—planned eco-industrial parks (PEIPs) and EIPs that developed through self-organizing symbiosis (SOS)—as well as their observed weaknesses and the features of complex adaptive systems. From this analysis, five key properties to be modeled are deduced: functionality, reliability, life span, theoretical knowledge, and adaptability. It is proposed that the properties of functionality and theoretical knowledge are determined by the goals of the EIP and its member companies, while the property of adaptability is determined by the understanding that the companies in an EIP have of the environment surrounding the EIP, while the properties of reliability and life span are determined by the internal and external relationships of the companies that make up an EIP.

### Introduction

Colocating activities in industrial areas concentrates the environmental impact caused by companies. The concepts of industrial ecology support the understanding and development of eco-industrial parks (EIPs) where collocation of facilities results in environmental benefits and economic profits in each phase of the EIP's life cycle: planning, design, building, operation, and deconstruction. This study builds on the descriptions of the planning and locating phases of EIPs from previous studies (Fernández and Ruiz 2009) by applying the previous frameworks in order to simulate the operational phase of EIPs.

EIPs aim to achieve overall environmental benefits and increase economic profits through collaboration between com-

panies rather than by improving each company's performance individually. To achieve these goals, different strategies are implemented during the operation of an EIP, including cooperation between businesses, the use of the most efficient technologies and techniques in order to reduce consumption, and the introduction of activities such as exchange networks, whose aim is to close loops of linear production chains by recovering material and energy (Chertow 2004; Graedel and Allenby 2003; Korhonen 2007; Seiffert and Loch 2005). These strategies increase the number of interactions between companies in an EIP and strengthen their relationships. Because of this, these strategies should be considered when modeling and attempting to understand the evolution of an EIP's behavior, and a conceptual basis for determining the best type of approach to

**Address correspondence to:** Elena Romero, INGEPRO Research Group, Transport and Projects Technology and Processes Department, School of Industrial and Telecommunications Engineers, University of Cantabria, Av. Los Castros s/n 39005 Santander, Cantabria, Spain. Email: elena.romero@unican.es

© 2013 by Yale University  
DOI: 10.1111/jjie.12032

Volume 17, Number 5

[www.wileyonlinelibrary.com/journal/jjie](http://www.wileyonlinelibrary.com/journal/jjie)

*Journal of Industrial Ecology* 731

## RESEARCH AND ANALYSIS

take when modeling the system's behavior is needed. The next section briefly reviews complex adaptive system (CAS) theory, which turns out to be a suitable choice for modeling the special characteristics of EIP operation.

### Choosing a Framework for Modeling

#### *The Theoretical Framework of Complex Adaptive Systems*

As Dijkema and Basson (2009, 158) have stated, "industrial ecology is a multidisciplinary system-oriented concept which suggests that industrial design and manufacturing processes are not performed in isolation from their surroundings but rather are influenced by them and, in turn, have influence on them."<sup>1</sup> Several authors, including Fiksel (2003) and Haskins (2007), support this statement and base their studies around the development of sustainable industrial areas as systems. System is defined as "a structured assemblage of elements and subsystems that interact through interfaces and between the system and its environment" as is cited in Dijkema and Basson (2009, 158).<sup>2</sup> The systems approach analyzes the system and its environment, widening the scope of the study beyond the facility's physical boundaries, and consequently supports the decision-making process (Lifset 2009). Thus a systems approach is generally useful, but because the evolution of EIPs shows features such as uncertainty and complex behavior, a more specific theoretical framework is needed for understanding their behavior.

The complex system approach has its origin in von Bertalanffy's General System Theory. A complex system consists of large populations of interacting agents that form a dynamic network. Their collective behavior emerges from the actions of the parts rather than being imposed by a central controller (Schuster 2001). Specifically, this emergent behavior arises from the competition and cooperation among the elements, which act in parallel, but which can be described without a detailed knowledge of individual behaviors (Holland 2006). The behavior of a complex system differs from the behavior of its isolated elements; rather, it emerges from the behavior of and interactions between its isolated elements (Boccaro 2004). The dynamics of the isolated elements are functions of positive and negative feedback loops. Uncertainty and limited predictability are inherent consequences of these types of systems (Kay 2002). Systems that not only interact with the environment but also learn autonomously from their experience and modify their behaviors to adapt to external changes are called complex adaptive systems (CAS) (Potgieter et al. 2005; Rammel et al. 2007). The agents in such systems are called adaptive if the consequences of their actions can be assigned to a specific value (performance, utility, payoff, fitness, or the like), and their behavior is geared to increase this value over a period of time (Holland and Miller 1991).

Researchers such as Kay (2002) and Nikolic and colleagues (2009) have developed models of ecological and sociotechnical systems based on complex systems behavior. Kay developed the self-organizing hierarchical open (SOHO) systems model,

which offers a conceptual basis to describe human sustainability and ecological integrity. The model is characterized as a complex, adaptive, hierarchical and dissipative system and applies thermodynamic principles (Kay 2002). Dijkema and Basson (2009) introduced the use of sociotechnical systems models that were developed by Nikolic and colleagues (2009) in their study of large-scale sociotechnical systems, or  $\lambda$ -systems. These systems are defined as large interconnected social and technical networks that are set in an ecological context. The  $\lambda$ -system's behavior emerges from its agents' behaviors when there is enough energy, knowledge, or economic potential. These aspects suggest that agent-based model (ABM) methods can be used to predict the behavior of  $\lambda$ -systems.

This article proposes a framework based on the work of Kay (2002), Dijkema and Basson (2009), and Nikolic and colleagues (2009) that enables modeling of the operation of EIPs. The first part of our analysis for modeling the operation of EIPs involves identifying conceptual aspects of EIPs with CAS properties. The second part, described in the section called "Identifying the Key Operational Properties to be Modeled," consists of analysis of particular features extracted from the experiences of existing EIPs.

The process of modeling is iterative and nonlinear. Once a preliminary conceptual model has been created, it needs to be implemented computationally in order to check the veracity of the hypothesis formulated in the model and also so that it can be adjusted or improved and validated by comparing modeled results with behavior at existing EIPs.

#### *Identifying Complex Adaptive System Properties that Apply to the Operation of Eco-Industrial Parks*

Based on these reflections and on Haskins (2006), the main properties of complex adaptive systems that relate to the operation of EIPs were identified. These properties are listed in Table 1.

Based on the assumption that "every system is a component of another system and is itself made up of systems" (Kay 2002), an EIP might be defined as a system. These industrial systems are made up of individual companies that are complex systems themselves, each working autonomously within their own hierarchical organization. These companies usually carry out their operations according to market rules and their own strategies for increasing profits. In addition to this individual behavior, being part of an EIP implies establishing collaborative relationships with other businesses in the EIP to improve combined operations, with the goal of achieving better environmental performance and higher profits. The collaboration between companies increases the strength of the system's network, making it more flexible and adaptable to changes in its surroundings. This business cooperation is promoted by factors such as trust and agreement, but these factors do not follow linear patterns and they generate unpredictable behaviors, adding complexity to the interactions between companies in an EIP. Complex behaviors like trust and agreement do not emerge until an EIP is operating, thus an EIP is a complex adaptive system.

**Table 1** Complex adaptive system properties that apply to the operation of eco-industrial parks

Complex adaptive system property	Description
Open system	The system makes an infinite exchange of material, energy, and information with its environment.
Nonlinear relationships	The behavior of the elements does not obey linear or predictive laws, therefore the behavior of the system is nonintuitive.
Emergence	The behavior of the system emerges from individual behavioral patterns and the interactions between their elements.
Adaptability	The system adapts to changes in the surrounding environment distortions and to changes in its internal structure such as flow changes.
Self-organization	A dynamic and adaptive process where systems acquire and maintain structure themselves, without external control (De Wolf and Holvoet [2004] cited in Boons 2008).
Uncertainty	This arises from nonlinear relationships, system self-organization, and the individual actions of elements to achieve their own goals.
Environment hierarchy	The system is developed in a setting that has a hierarchical order. This setting conditions the operation and relationships.

As cited in Chertow and Ehrenfeld (2012, 15), “it was explicitly observed that industrial ecosystems, with their dependence on market forces, are subject to rapid, nonlinear, and discontinuous changes in direction and thus it was suggested that they too share characteristics of complex adaptive systems (Chertow 2009; Spiegelman 2003).”

### Identifying the Key Operational Properties to be Modeled

Chertow and Ehrenfeld (2012) compare five mechanisms, or models, of industrial symbiosis characterized in the literature in their comprehensive contribution about self-organizing symbiosis. The five mechanisms they compare are (1) build and recruit, (2) planned eco-industrial park (PEIP), (3) self-organizing symbiosis (SOS), (4) the retrofit industrial park, and (5) circular economy EIP. Build-and-recruit EIPs differ from PEIPs in that the developers of the EIP are more focused on enrolling compatible companies so as to promote economic development without emphasizing the environmental considerations (Chertow and Ehrenfeld 2012). A circular economy EIP is a type of EIP emerging in Asia that is related to the implementation of the

Circular Economy Promotion Law of 2009, which aims to grow the economy while reducing environmental impacts (Yuan et al. [2006] cited in Chertow and Ehrenfeld 2012). Our research focuses on two types of EIPs: PEIPs and EIPs that were created via SOS. Chertow (2009) classified experiences at existing EIPs based on the mechanism by which the EIPs were implemented. This classification aims to identify the main aspects influencing the evolution of existing EIPs. The PEIP mechanism of creation “includes a conscious effort to identify companies from different industries and locate them together so that they can share resources across and among them” (Chertow 2007, 21). This mechanism uses a reflective and planned process to identify suitable companies that can participate in a collaborative network (Chertow and Ehrenfeld 2012).

On the other hand, at an EIP that is created through SOS, “an industrial ecosystem emerges from decisions by private agents motivated to exchange resources to meet goals such as cost reduction, revenue enhancement, or business expansion” (Chertow 2007, 21). Although the objective of SOS is not the creation of an industrial ecosystem, once companies agree on material and energy exchanges to improve their operations, an EIP is formed. The SOS mechanism closely follows dynamic and nonlinear patterns that are more resilient to internal perturbations of the system, such as structural distortions (e.g., companies leaving the EIP), material resource variations, or organizational changes within each company. The best-known example of an EIP created via SOS is the industrial symbiosis network of Kalundborg, Denmark, which resulted from a gradual development of cooperation instead of a careful environmental planning process (Desroches 2001). Table 2 summarizes some EIPs that may be classified as PEIPs and some examples of EIPs that were developed via SOS.

The analysis presented in this article contrasts PEIPs and EIPs that were created via SOS, identifying the strengths and weaknesses of these two types of EIPs based on the experiences of success or failure at actual EIPs, as table 3 depicts. The first consideration is the existence of a methodological implementation of strategies for achieving the EIP’s goals. This characteristic facilitates the effective implementation of sustainable strategies. An identifying characteristic of PEIPs is that early in their development they pursue strategies that favor the recruitment of suitable companies that can enhance resource exchanges. For instance, industrial ecology-based strategies guided the transition of Nanning Sugar Co. Ltd. to a circular economy that achieved considerable increases in economic profit as well as a substantial decrease of environmental impacts from 1997 to 2004 (Yang and Feng 2008). At EIPs created via SOS, there is a lack of such strategies in the early stages. Instead, at EIPs created via SOS, once symbiosis begins, strategies that foster further symbiosis are put in place, enhancing the development of new and more complex exchanges between companies, as in the case of Kalundborg (Jacobsen [2005] cited in Chertow 2007).

A second strength of PEIPs is that they present a safe and reliable setting to develop collaborative relationships. This type of setting is created by the entities promoting the implementation of the planned EIPs, such as the United States

RESEARCH AND ANALYSIS

**Table 2** Examples of eco-industrial parks classified as either planned eco-industrial parks (PEIPs) or developed via self-organizing symbiosis (SOS)

Typology	Park	Origin	Benefit
PEIP	Verdal (Norway)	Avoiding the closure of the company due to the economic crisis	Integral incubator park for new companies and job creation (Haskins 2008)
	Devens Planned Community (United States)	Developing an industrial sustainable area in a deserted military area	Job creation and new enterprises recruitment (Gibbs and Deutz 2005)
	Nanning Sugar Co. Ltd. (China)	Evolving from traditional companies to more sustainable ones	The maximization of companies' production and the minimization of their consumption and pollution (Yang and Feng 2008)
SOS*	Styria (Austria)	Recycling network	Improving the operation of the park through the expansion of the recycling network to exchange between processes of different companies (Schwarz and Steininger 1997)
	Burnside Industrial Park (Canada)	Local development planning	Soil use planning recognizing environmental function (Côté and Smolenaars 1997)
	Kwinana (Australia)	Energy and water flows exchanges	Improvement of the operation of the park and energy saving through water and condensation recovery and equipment innovation (Van Berkel 2007)

\*These examples were identified as SOS EIPs in Chertow (2009).

**Table 3** Characteristics of planned eco-industrial parks (PEIPs) and eco-industrial parks created via self-organizing symbiosis (SOS) that have an influence on the operational properties of EIPs

Characteristics that predict properties of EIPs	Presence in PEIPs	Presence in EIPs created via SOS	Properties to Be modeled
Methodological implementation of the EIP's strategies	Common	Common	Functionality, or the ability to effectively put strategies into practice
External support for EIP from governmental and nongovernmental entities	Common	Rare	Reliable development of cooperation between companies
The strength of agreements between companies and trust in relationships	Common	Common	Life span
Identification of industrial ecology principles in the EIP's member companies	Rare	Rare	Theoretical knowledge, which facilitates the development of exchange networks
Robust consideration of the EIP's surroundings	Rare	Rare	Adaptability

Note: EIP = eco-industrial park.

President's Council on Sustainable Development, which is working to establish EIPs in the United States (Gibbs and Deutz 2005). Business participation in PEIPs is encouraged and even funded by entities involved in the creation of the PEIP, whereas a lack of external support is a common feature in the early stages of EIPs created via SOS.

The experience of Burnside Industrial Park (Halifax, Nova Scotia, Canada) demonstrates the relevance of external support. The small- and medium-size enterprises that make up this park can participate in a voluntary program to improve their performance through good environmental practices. Assistance for this initiative is supported by Dalhousie University's Eco-

Efficiency Centre (Halifax, Nova Scotia, Canada), which is led by a team of public and private agents and funded in part by the government. The program has a successful participation rate and has resulted in great progress in the development of cooperative relationships for waste exchange among the companies (Côté and Crawford 2003).

The National Industrial Symbiosis Programme (NISP), an organization that has been operating within the United Kingdom for 8 years, has also been shown to be effective in increasing the number of active industrial symbiosis exchanges and the number of companies who participated in the program from 2005 to 2009. Paquin and Howard-Grenville (2012)

classified NISP actions into three categories (conversation, connection, and cocreation) that show the evolution of the symbiotic relationship from the discovery of information about business opportunities to the consolidation and growth of symbiotic relationships.

These two examples show the relevance of external support for EIPs. However, there is currently a debate about the influence of these social aspects on the different models of industrial symbiosis, as noted by Lombardi and colleagues (2012).

The third characteristic observed at both PEIPs and EIPs developed via SOS is that mutual trust among companies is also essential to develop and maintain coordinated actions and for extending the life span of EIPs (Sterr and Ott 2004). Life span, therefore, is a property that can be modeled based on the strength of the agreements between companies and the trust inherent in their relationships.

Therefore the first three modeled EIP properties of our conceptual model (table 3) are based on three characteristics commonly found at both PEIPs and EIPs created via SOS (the existence of a methodological implementation of the EIP's strategy, external support for the EIP, and the strength of agreements between companies and trust in relationships). The first characteristic of the conceptual model is based on the existence or nonexistence of a methodological implementation of the EIPs sustainable strategies, which predicts functionality (the effective implementation of the EIP's strategies). Next, the support of external partners predicts reliability because it affects the likelihood of a setting that is conducive for developing or enhancing a cooperative network among the companies at the EIP. The third EIP characteristic, the strength of agreements between companies and trust in relationships, predicts the life span of the network.

This article describes an integrated conceptual model of EIPs that includes not only characteristics commonly observed at PEIPs and EIPs created via SOS, but also considers characteristics that are not usually observed. The observation of weaknesses in both types of EIP suggested to us two other characteristics important in predicting the operational behavior of EIPs.

First, the lack of theoretical knowledge about EIPs at a company level hinders the development and enhancement of exchange networks between companies. This issue is discussed by Haskins (2006), who states that theoretical knowledge about EIP concepts is one of the critical factors of success that emerge from the case study literature. This consideration is represented in the model as the property of theoretical knowledge. An elementary formation of a theoretical strategy and goals, as well as dissemination of known examples of the success of other EIPs, might increase industry expectations about EIPs and result in more new EIPs around the world.

The second characteristic that is rarely seen at EIPs is a robust consideration of the overall setting of the EIP. This is related to the previous CAS properties identified in the section titled "Choosing a Framework for Modeling." EIPs are nested within a broader context in which the companies of the park interact among themselves and with other entities in the surrounding community (Schlarb 2001). The broader and more detailed the

**Table 4** Modeling considerations for each of the five key modeled properties. The system is the eco-industrial park (EIP) and the elements are companies within the EIP

Modeled properties	Modeling considerations
Functionality	The objectives of the system and of its elements
Theoretical knowledge	The objectives of the system and of its elements
Adaptability	Understanding of the relationship between the environment surrounding the system
Reliability	System relationships: environment-to-element interactions (external); System relationships: element-to-element interactions (internal)
Life span	System relationships: environment-to-element interactions (external); System relationships: element-to-element interactions (internal)

understanding of the eco-park's surroundings, the more adaptive the system is to changes, such as changes in the availability of materials and changes in the demand for products. Thus the last modeled property of EIPs listed in table 3 is adaptability. The conceptual model should allow representing the EIP as a system that adapts to its environment.

### The Preliminary Conceptual Model

Based on the previous analysis, the five properties of EIPs to be predicted by the conceptual model are functionality, reliability, life span, theoretical knowledge, and adaptability. These five properties were deduced from an analysis of observed strengths and weaknesses at PEIPs and EIPs created via SOS, along with the identification of CAS properties in an EIP system. This section elaborates on these five key modeled properties, as summarized in table 4.

#### Understanding the Objectives of the Eco-Industrial Park and its Member Companies in Order to Model Functionality and Theoretical Knowledge

The *Fieldbook for the Development of Eco-Industrial Parks* (Lowe 1997) states that the two operational targets for measuring the maximum potential overall EIP performance (economic profits and environmental benefits due to business collaboration) are greater than the sum of the individual companies' economic profits and environmental benefits that can be gained by optimizing individual companies, as equations (1) and (2) express:

$$\max(\text{EconomicProfit}_{\text{EIP}}) > \sum_{i=\text{company}_j}^{\text{company}_n} \max(\text{EconomicProfit}_{\text{company}_j}) \quad (1)$$



RESEARCH AND ANALYSIS

$$\min (\text{EnvironmentalImpact}_{\text{EIP}}) < \sum_{i=\text{company}_1}^{\text{company}_n} \min (\text{EnvironmentalImpact}_{\text{company}i}E)_i \quad (2)$$

As Ehrenfeld (2009, 166) states, "the desired outputs from complex systems frequently are emergent properties of those systems." In other words, improvements in an EIP's performance, such as increased conservation of resources or the minimization of environmental impacts, emerge from specific practices that were originally carried out in order to meet other performance goals, such as an exchange of by-products or the shared use of infrastructure. Both environmental and economic operational goals should be considered and understood by companies when developing their overall strategy. As Ehrenfeld (2009, 166) also states, "sustainability is not that property, per se, but rather, it is a metaquality that can be described as the possibility that the system will deliver the desired outputs over long periods of time." It is important to remember that while the EIP structure enhances business cooperation, the companies within an EIP develop their operation within an economic competition framework.

Before discussing economic and environmental goals, it is important to understand the characteristics of the individual companies within an EIP. These companies are themselves real, complex, and dynamic systems, as described in the section "Choosing a Framework for Modeling." They have specific economic goals related to their production and they have environmental limitations stipulated by norms or laws. The general objective of business is to maximize its economic benefit, which can be accomplished by introducing strategies at a company level, such as manufacturing optimization, water cascading, and energy efficiency improvement.

When a company collaborates in an EIP network, the possibilities for economic improvement are increased and cooperative companies can enjoy profits in addition to the benefits achieved when they work individually. Tangible economic and environmental benefits result from cooperative material exchanges, such as new sales of by-products, deduction of tax payments, or a decrease of resource purchases. Intangible economic benefits may also result from being in an EIP, such as improvement of a company's environmental image in the eyes of the public. The number of companies in an EIP increases network diversity and the number of possible combinations of cooperative relationships. As Metcalfe's law suggests, the more nodes taking part in a collaborative network, the greater the network's value.

In future studies we will examine the implementation of a "park manager," who guides business relationships inside the cooperative network and adds effectiveness to the processing of information in order to strengthen the EIP. Such a park manager could improve system adaptability and speed up the formation of relationships between companies through activities such as analyzing data about flows and extracting the most relevant information in order to advise companies about possible new

collaborations. The companies themselves would decide how to manage their flows and relationships, but they would have the support of the park manager when making decisions.

**Understanding the Relationship Between the Eco-Industrial Park and its Surroundings in Order to Model Adaptability**

As described previously, the relationship an EIP has with the surrounding environment is a factor in understanding the EIP's adaptability to change. A description of the EIP's system boundaries, as depicted in figure 1, provides a practical starting point for determining where the EIP ends and the environment begins. The EIP system develops internal networks for the exchange of material and energy, and these networks decrease inputs from the environment and decrease undesirable outputs to the environment. The EIP system boundary is limited to the companies that actively participate in this collaborative network.

This boundary is influenced by the physical distance between companies, as discussed by Chertow (2000) and Fernández (2009). Increasing distance encourages the diversification of companies and promotes the variety of flows. However, increasing distance also makes some exchanges infeasible due to increased distribution costs and the decrease in the quality of some flows, such as energy or steam. A suitable spatial limit for the EIP system boundary aims to address the trade-offs between business diversity and the economic feasibility for exchanges.

EIPs are embedded in variable and imperfect surroundings. Understanding the surroundings and the relational mechanisms between the EIP and its surroundings is necessary in order to predict the adaptability of the EIP operation. In the scientific literature, the environment has already been the subject of study and modeling from different scales. In his study about the management of a supply chain, Fiksel (2006) considers an environment composed of independent systems (ecological, social, and industrial) that are related through material flows. In his previous works about sustainable business systems (Bakshi and Fiksel 2003; Fiksel 2003), the environment is instead represented as a hierarchical nested system (figure 2a), where a system is embedded or contained in a larger system and where the system itself contains smaller systems. Other studies apply a different framework, such as the SOHO systems model described by Kay (2002) (discussed in the section titled "Choosing a Framework for Modeling"), which considers the partial relationships between natural and social scopes, as well the nested structure of higher levels of the systems (figure 2b).

This article adopts a nested system framework for describing the EIP's environment, an approach intermediate to that of Fiksel (2003) and Kay (2002). This framework is able to represent the natural hierarchy of the setting for the EIP, but it differs from the hierarchical nested system described by Fiksel (2003) in that Fiksel's study is focused on process design, so it is set at the smallest level of the nested system, and this analysis is expanded to the rest of the nested systems according to the

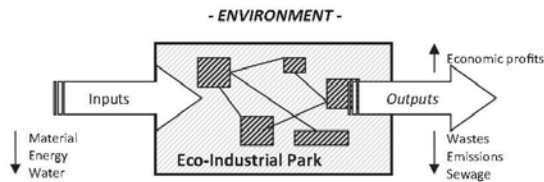


Figure 1 System boundaries of a generic eco-industrial park (EIP).

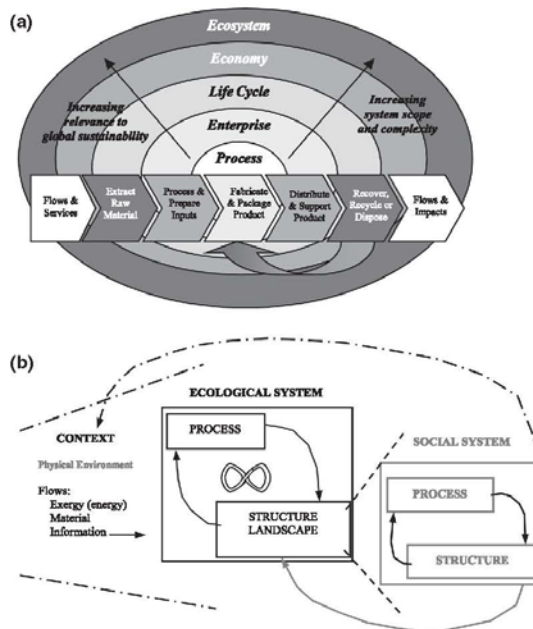


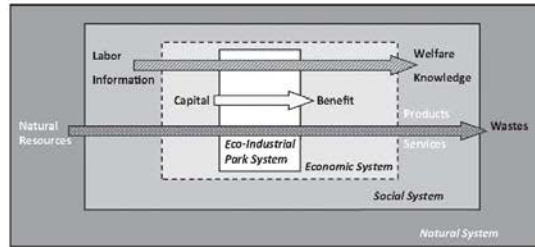
Figure 2 Two frameworks for depicting the relationship between the environment and industrial systems. (a) A hierarchical nested system. Source: Fiksel (2003) and Bakshii and Fiksel (2003). Used with permission. (b) Self-organizing hierarchical open system. Source: Kay (2002).

process's life cycle assessment. The nested system framework we propose is based on the observation that the EIP develops its functions, takes part in, and is ruled by three kinds of systems: social, economic, and environmental (see figure 3).

The environmental or natural system, which surrounds the nested systems, produces the natural resources and offers physical support, although its dynamics can disturb them too. The social system is viewed as a system developed inside the natural one. Human beings are organized by subsystems with hierarchical structures to develop different activities and achieve social and economic objectives. The evolution of these social subsys-

tems is determined by each cultural and organizational context and by the economic framework. The economic framework not only sets the rules for the development of social organizations, markets, and industries, but it is also a product of the social system. Therefore the social and economic boundaries are considered intertwined, as figure 3 illustrates by a dashed line separating them. The EIP is considered to be a sort of subsystem geared to specific industrial activities. It is located in the smallest of the nested levels, where it is influenced by the remainder of the entire nested system, and thus the EIP must adapt to alterations in its surroundings.

RESEARCH AND ANALYSIS



**Figure 3** A nested system environment—the framework for depicting the relationship between the environment and industrial systems that is applied in this study.

**Understanding the Eco-Industrial Park's External and Internal Relationships in Order to Model Reliability and Life Span**

The last two modeled properties of EIPs that are listed in table 4, reliability and life span, are linked to the relationships between the companies in the EIP (internal relationships) and to the relationships between the companies and the environment (external relationships). These internal and external relationships, which include competition, cooperation, and trade, are the result of stakeholders' decisions. They cause changes in the flows between the companies in an EIP and between the EIP and the nested environment (figure 3). These changes result in evolution of the EIP. An understanding of the factors that influence the fluctuations in flows can be used to reveal what the result of decisions by companies within an EIP will be.

Several authors have tried to place factors that influence flow rates into categories such as environmental, economic, social, spatial, cultural, geographic, political, and so on (Frosch 1999; Seiffert and Loch 2005; Tudor et al. 2007), but there is a lack of agreement about the categorization of these factors. Table 5 summarizes the classification scheme proposed in this article, which is based on these previous efforts and on the premises of natural capitalism (Kuo and Hsiao 2008; Lovins and Lovins 2001). Natural capitalism is a proposal for socioeconomic development that recognizes the interdependence of the global economy on natural resources and proposes the means to rationally use the natural capital, such as by reinvesting a part of the economic profits in natural resources conservation.

Broad aspects that aid in understanding the evolution and current performance of the environment surrounding an EIP, such as culture, demography, or topography, are called context factors. These aspects influence the social, economic, and environmental nested systems that form the EIP setting, so they are not categorized separately from these systems. These aspects are features of the EIP that, over time, have been inherited from its surrounding nested systems.

Specific aspects of the EIP, in contrast, are divided into four main categories of influential factors: environmental, social, economic, and technical. Based on the flows between the elements of the nested system of figure 3, four types of capital

and material flows were used to determine which category an influential factor belongs to. The first type of material flow, flows of natural resources and other flows into and out of the natural environment, defines the environmental category of influential factors. This category includes production-related inputs and outputs of the EIP and the capacity of the natural environment to support these flows. The second type of capital flow is social: the flow of human capital, including labor and knowledge. The social category of influential factors includes behavioral and relational patterns that are created spontaneously or by norms. The third type of capital flow deals with monetary and financial capital, which are related to economic profits. Therefore the economic category of influential factors includes the financial and material exchanges between companies within the EIP and the financial and material exchanges between the companies in the EIP and the external market. The fourth type of flow in table 5 is related to the technical category, whose flow is manufactured capital and the means by which manufactured capital is modified. Influential factors in the technical category include the factors related to the flows of products and services and the factors that support the implementation of sustainable strategies. These categories are quite broad and the identification of the agents' decisions is also needed.

The classification of the influential factors is completed by dividing the categories of factors into subcategories based on the agent responsible for affecting a change in the flows for each category. In all, 11 subcategories result. Table 5 provides a brief description of the subcategories for each category of influential factor.

To sum up, the subcategories of factors that influence an EIP's life span and reliability are classified according to the flow that they modify and the agent that causes a modification in the flow. These subcategories include different sorts of stakeholder relationships and support the correlation between influential factors and the changes in flows that they cause. The evolution of an EIP's properties might show the dynamic effects of influential factors and how the agents react to them. Complex properties of EIPs, such as reliability and life span, can be improved by combining internal and external factors of economic, natural, social, and technical categories.

**Table 5** Summary of four categories of factors that influence an eco-industrial park's (EIP's) reliability and life span

Influential factor category (flow)	Subcategory description	
Environmental (natural resources, industrial wastes)	Natural environment	Capacity of the natural environment to absorb the impacts generated by the EIP
	Resources	The inputs from the natural environment to the EIP
	Waste stream	The outputs from the EIP to the natural environment
Social (human capital)	Legislative and political	Legal or political initiatives from the society to promote specific behaviors within the EIP
	Organizational	Behavioral and relational patterns that are supported by the EIP's norms
	Formative	Operational patterns that are the result of lessons learned either through experience or otherwise
Economic (monetary and financial capital)	Market	Factors that condition the development of the productive activities of companies within the EIP according to the economic profit and market demand
	Innovation and competitiveness	Business practices geared to improve the performance of companies within the EIP in order to achieve economic profits
Technical (manufactured capital)	Infrastructural	Infrastructures and services geared toward the implementation of more sustainable systems
	Technological	Means of more efficient production that take part in the operation of the activities
	Procedural	Work methods or practices that result in activity that is more sustainable

### Conclusions and Further Work

Today, the redesign of dilapidated industrial areas as well as the design of new ones often aims to improve their operation both environmentally and economically. The present work looks at EIPs, whose goal is to obtain a better overall performance through strategies such as creating a network of material exchanges between companies. A methodological approach to the implementation of EIPs would result in EIPs being a long-term rather than a short-term solution.

As stated in an editorial in a special issue on complexity and industrial ecology in the *Journal of Industrial Ecology* (Dijkema and Basson 2009), a complex approach is even less often applied to the field of industrial ecology, where instead the focus tends to be on single-layer static technical systems. Nevertheless, characteristics such as emergent behavior, adaptability, and dynamics are inherent in the types of sociotechnical systems that are studied in industrial ecology (Dijkema and Basson 2009). Theoretical approaches for understanding complex adaptive systems focus on the properties of these systems and might support a functional study and add depth to the field of industrial ecology, as Spiegelman (2003) suggested.

In this article, a preliminary conceptual framework for modeling the operation of EIPs is proposed. The proposed framework recognizes the following five key properties to be modeled: functionality, theoretical knowledge, adaptability, reliability, and life span. The properties of functionality and life span were identified based on the strengths of PEIPs and EIPs created via SOS, as defined by Chertow (2009). The property of reliability was identified based on a strength that PEIPs have but that EIPs created via SOS do not commonly have. The properties of the-

oretical knowledge and adaptability were determined based on perceived weaknesses in both PEIPs and EIPs created via SOS.

Once it was determined that these are the five properties that should be modeled, three modeling considerations were deduced. First, EIP goals and how these are included in the objectives of the companies that make up an EIP are related to the properties of functionality and theoretical knowledge. The more internalized the overall objectives are, the more coordinated and functional the EIP is. Second, an EIP's understanding of its relationship with the environment surrounding an EIP is related to the adaptability of the EIP. In order to obtain more adaptable operation, the EIP should be understood in the context of its surroundings. Finally, the properties of reliability and life span are related to the relationships developed among external and internal stakeholders. Relationships based on trust between the companies at an EIP and on trust between external agents and the companies of an EIP result in a suitable and reliable framework in which to develop cooperation among companies. The life span of the system increases when collaborative and diverse internal networking occurs.

EIPs are dynamic and their operation can be disturbed by changes in material flows and changes in the agents' decisions. An understanding of the factors that influence the relationships and decisions of the stakeholders would allow us to predict the evolution of these properties of EIPs.

The preliminary foundations described in this article form the basis for the future development of a mathematical model of EIPs. A further analysis of the three considerations to model (objectives of EIPs and of companies within an EIP, the environment surrounding the EIP, and the relationships among the EIP stakeholders) might form the three submodels in an

RESEARCH AND ANALYSIS

overall EIP model. An in-depth analysis of the mathematical expressions of the objectives of EIPs and of companies within an EIP, as well as the definition of the behavioral rules that describe stakeholders decisions, are the next stages for the development of mathematical submodels and their computational implementation. This future simulation of possible interactions among stakeholders might identify different behavioral patterns and show how specific alterations in current conditions might affect the evolution of an EIP. The ability to predict the outcome of these future considerations might support and speed up implementation of the cooperative strategies and help achieve the goals of EIPs. Therefore the current work, as well as future suggested work, are geared toward the development of a preliminary methodology for modeling EIPs that will support the decision-making processes of cooperative companies that participate in EIPs and decrease the operational uncertainty of EIPs.

Notes

1. This Dijkema and Basson definition draws on text from Graedel and colleagues (1993).
2. This Dijkema and Basson definition draws on text from Asbjørnsen (1992).

References

Asbjørnsen, O. 1992. *Systems engineering principles and practice*. Arnold, MD: Skarpodd.

Bakshi, B. R. and J. Fiksel. 2003. The quest for sustainability: Challenges for process systems engineering. *American Institute of Chemical Engineers Journal* 49(6): 1350-1358.

Boccaro, N. 2004. *Modeling complex systems*. New York, NY, USA: Springer-Verlag.

Boons, F. 2008. Self-organization and sustainability: The emergence of a regional industrial ecology. *Emergence: Complexity and Organization* 10(2): 41-52.

Chertow, M. R. 2000. Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment* 25: 313-337.

Chertow, M. R. 2004. Industrial symbiosis. *Encyclopedia of Energy* 3: 407-415.

Chertow, M. R. 2007. "Uncovering" industrial symbiosis. *Journal of Industrial Ecology* 11(1): 11-30.

Chertow, M. R. 2009. Dynamics of geographically based industrial ecosystems. In *The dynamics of regions and networks in industrial ecosystems*, edited by M. Ruth and B. Davidsdottir. Cheltenham, UK: Edward Elgar.

Chertow, M. R. and J. Ehrenfeld. 2012. Organizing self-organizing systems: Towards a theory of industrial symbiosis. *Journal of Industrial Ecology* 16(1): 13-27.

Côté, R. P. and P. Crawford. 2003. A case study in eco-industrial development: The transformation of Burnside Industrial Park. In *Eco-industrial strategies: Unleashing synergy between development and the environment*, edited by E. Cohen-Rosenthal and J. Musnikow. Sheffield, UK: Greenleaf Publishing.

Côté, R. P. and T. Smolenaars. 1997. Supporting pillars for industrial ecosystems. *Journal of Cleaner Production* 5(1-2): 67-74.

Desrochers, P. 2001. Cities and industrial symbiosis: Some historical perspectives and policy implications. *Journal of Industrial Ecology* 5(4): 29-44.

Dijkema, G. P. J. and L. Basson. 2009. Complexity and industrial ecology: Foundations for a transformation from analysis to action. *Journal of Industrial Ecology* 13(2): 157-164.

Ehrenfeld, J. R. 2009. Understanding of complexity expands the reach of industrial ecology. *Journal of Industrial Ecology* 13(2): 165-167.

Fernández, I. 2009. Desarrollo de un modelo de localización y contribución al diseño de la operación de áreas industriales sostenibles. [Development of a location model and contribution to operation design of sustainable industrial areas.] Ph.D. thesis, University of Cantabria, Cantabria, Spain.

Fernández, I. and M. C. Ruiz. 2009. Descriptive model and evaluation system to locate sustainable industrial areas. *Journal of Cleaner Production* 17(1): 87-100.

Fiksel, J. 2003. Designing resilient, sustainable systems. *Environmental Science and Technology* 37(23): 5330-5339.

Fiksel, J. 2006. A framework for sustainable materials management. *Journal of Materials* 58(8): 15-22.

Frosch, R. A. 1999. Sustainability engineering. *The Bridge* 29(1): 2-3.

Gibbs, D. and P. Deutz. 2005. Implementing industrial ecology? Planning for eco-industrial parks in the USA. *Geoforum* 36(4): 452-464.

Graedel, T. E. and B. R. Allenby. 2003. *Industrial ecology*. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson Education.

Graedel, T., B. R. Allenby, and P. B. Linhart. 1993. Implementing industrial ecology. *IEEE Technology and Society Magazine* 12(1): 18-26.

Haskins, C. 2006. Multidisciplinary investigation of eco-industrial parks. *Systems Engineering* 9(4): 313-330.

Haskins, C. 2007. A systems engineering framework for eco-industrial park formation. *Systems Engineering* 10(1): 83-97.

Haskins, C. 2008. Systems engineering analyzed, synthesized, and applied to sustainable industrial park development. Ph.D. thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway.

Holland, J. H. 2006. Studying complex adaptive systems. *Journal of Systems Science and Complexity* 19(1): 1-8.

Holland, J. H. and J. H. Miller. 1991. Artificial adaptive agents in economic theory. *American Economic Review* 81(2): 365-370.

Kay, J. J. 2002. On complexity theory, exergy and industrial ecology: Some implications for construction ecology. In *Construction ecology: Nature as the basis for green buildings*, edited by C. J. Kibert, J. Sendzimir, and G. B. Guy. London, UK: Spon Press.

Korhonen, J. 2007. Industrial ecology in the strategic sustainable development model: Strategic applications of industrial ecology. *Journal of Cleaner Production* 12(8-10): 809-823.

Kuo, N. W. and T. Y. Hsiao. 2008. An exploratory research of the application of natural capitalism to sustainable tourism management in Taiwan. *Journal of Cleaner Production* 16(1): 116-124.

Lifset, R. 2009. Industrial ecology in the age of input-output. In *Handbook on input-output economics for industrial ecology*, edited by S. Suh. Dordrecht, the Netherlands: Springer.

Lombardi D. R., D. Lyons, H. Shi, and A. Agarwal. 2012. Industrial symbiosis: Testing the boundaries and advancing knowledge. *Journal of Industrial Ecology* 16(1): 2-7.

Lovins, L. H. and A. B. Lovins. 2001. Natural capitalism: Path to sustainability? *Corporate Environmental Strategy* 8(2): 99-108.

- Lowe, E. A. 1997. Creating by-product resource exchanges: Strategies for eco-industrial parks. *Journal of Cleaner Production* 5(1–2): 57–65.
- Nikolic, I., G. P. J. Dijkema, and K. H. van Dam. 2009. Understanding and shaping the evolution of sustainable large-scale socio-technical systems. In *Dynamics of regions and networks in industrial ecosystems*, edited by M. Ruth and B. Davidsdottir. Cheltenham, UK: Edward Elgar.
- Paquin, R. L. and J. Howard-Grenville. 2012. The evolution of facilitated industrial symbiosis. *Journal of Industrial Ecology* 16(1): 83–93.
- Potgieter, A. E. G., K. April, and J. Bishop. 2005. Complex adaptive enterprises. In *Encyclopedia of information science and technology*, edited by M. Khosrow-Pour. Hershey, PA, USA: Idea Group Publishing.
- Rammel, C., S. Stagl, and H. Wilfing. 2007. Managing complex adaptive systems—A co-evolutionary perspective on natural resource management. *Ecological Economics* 63(1): 9–21.
- Schlarb, M. 2001. *Eco-industrial development: A strategy for building sustainable communities*. Ithaca, NY, USA: Cornell University.
- Schuster, H. G. 2001. *Complex adaptive systems. An introduction*. Saarbrücken, Germany: Scator Verlag.
- Schwarz, E. J. and K. W. Steininger. 1997. Implementing nature's lesson: The industrial recycling network enhancing regional development. *Journal of Cleaner Production* 5(1–2): 47–56.
- Seiffert, M. E. B. and C. Loch. 2005. Systemic thinking in environmental management: Support for sustainable development. *Journal of Cleaner Production* 13(12): 1197–1202.
- Spiegelman, J. 2003. Beyond the food web: Connections to a deeper industrial ecology. *Journal of Industrial Ecology* 7(1): 17–23.
- Sterr, T. and T. Ott. 2004. The industrial region as a promising unit for eco-industrial development—Reflections, practical experience and establishment of innovative instruments to support industrial ecology. *Journal of Cleaner Production* 12 (8–10): 947–965.
- Tudor, T., E. Adam, and M. Bates. 2007. Drivers and limitations for the successful development and functioning of EIPs (eco-industrial parks): A literature review. *Ecological Economics* 61 (2–3): 199–207.
- Van Berkel, R. 2007. Cleaner production and eco-efficiency initiatives in Western Australia 1996–2004. *Journal of Cleaner Production* 15(8–9): 741–755.
- Yang, S. and N. Feng. 2008. A case study of industrial symbiosis: Nanning Sugar Co., Ltd. in China. *Resources, Conservation and Recycling* 52(5): 813–820.

#### About the Authors

Elena Romero is a doctoral candidate. M. Carmen Ruiz is a professor, both at the Transport and Projects Technology and Processes Department, University of Cantabria, Santander, Cantabria, Spain.

## I.2. Proposal of an agent-based analytical model to convert industrial areas in industrial eco-systems



---

<b>Título</b>	<b>Proposal of an Agent-Based Analytical Model to Convert Industrial Areas in Industrial Eco-Systems</b>
<b>Autores</b>	Elena Romero, M. Carmen Ruiz
<b>Revista</b>	Science of the Total Environment
<b>Volumen 468-469</b>	Pág. 394-405
<b>Fecha de aceptación</b>	17 AGOSTO 2013
<b>DOI</b>	10.1016/j.scitotenv.2013.08.049
<b>Índice de Impacto (JCR 2012)</b>	3.258
<b>Nombre del Área</b>	ENVIRONMENTAL SCIENCES
<b>Lugar que ocupa en el Área</b>	Q1 (31/210)

---



Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/scitotenv](http://www.elsevier.com/locate/scitotenv)



## Proposal of an agent-based analytical model to convert industrial areas in industrial eco-systems



Elena Romero<sup>\*</sup>, M. Carmen Ruiz

INGEPRO Research Group, Transport and Projects Technology and Processes Department, School of Industrial and Telecommunications Engineers, University of Cantabria, Av. Los Castros s/n, 39005 Santander, Cantabria, Spain

### HIGHLIGHTS

- Agent-based analytical model to convert industrial areas to industrial eco-systems
- Knowledge database integration for cooperative opportunities detection
- Cooperative relationships assessment supported on Game Theory

### ARTICLE INFO

#### Article history:

Received 20 March 2013  
Received in revised form 7 August 2013  
Accepted 17 August 2013  
Available online xxxxx

Editor: Simon Pollard

#### Keywords:

Industrial symbiosis  
Eco-industrial parks  
Agent-based modelling  
System dynamics  
Cooperative strategies

### ABSTRACT

The transformation of industrial areas towards greater sustainability results from a strategic objective to address the effects of economic and environmental crisis. Such transformation, however, requires methodologies and tools that support and facilitate the process. This paper proposes an analytical model that favours the redesign of industrial areas based on sustainable strategies for eco-industrial parks. The proposed model is enhanced by the definition of building blocks of an agent-based modelling method. The methodology that was followed favours the detailed description of the objectives of the system, with individual elements and adaptation to the surrounding environment, amongst other features. The proposed model integrates a knowledge database that supports the process of identification of cooperative strategies such as material exchange networks in industrial areas. The underlying theory for the assessment of cooperative interactions is game theory, which supports the resolution of problems with strategic choices. This work covers the stage of analytical model formulation that is essential for advancement towards the inference process based on simulation models.

© 2013 Elsevier B.V. All rights reserved.

### 1. Introduction

Based on the latest European Commission Reports (Rademaekers et al., 2011), industry is enduring a transformation towards more sustainable objectives looking for suitable integration into the natural environment in addition to improvement in competitiveness. An increase in the efficiency of the consumption of resources and the implementation of novel methods for process optimisation are some examples of strategies that have been followed. There is therefore a growing need to favour the transformation towards greater sustainability.

Industrial ecology (IE) is an appropriate framework for the effective implementation of these strategies, as several researchers have noted (Fiksel, 2006; Gibbs and Deutz, 2007; Boons, 2008). This discipline "(IE) intends to transform the industrial system by learning from the functioning of the natural environment" (Lambert and Boons, 2002; Graedel and Allenby, 2003; Korhonen, 2007). In particular, the field of

industrial symbiosis (IS) "engages traditionally separate industries in a collective approach to competitive advantage involving physical exchange of materials, energy, water and by-products" (Chertow, 2000). The development of material exchanges between companies decreases the quantity of resources consumed and wastes released to the environment (Fiksel, 2003). The concept of eco-industrial parks (EIPs) develops these strategies at the level of an industrial area. The objective of EIPs consists of "by working together, the community of businesses seeks a collective benefit that is greater than the sum of the individual benefits each company would realise if it optimised its individual performance only" (Lowe, 1997). Despite the success of several experiences of EIPs (Gibbs and Deutz, 2005; Centre of Excellence in Cleaner Production, 2007; Chertow and Ehrenfeld, 2012), the practical implementation faces some difficulties. Interactions of companies, environmental impacts, and the need to make the implementation gradual are some of these obstacles (Gibbs and Deutz, 2007). These hindrances arise during the operation of the EIPs, so the development of models that attempt to understand the operational stage of EIPs might help to overcome them. This premise gave rise to the previous

<sup>\*</sup> Corresponding author. Tel.: +34 942 20 17 89.  
E-mail address: [elena.romero@unican.es](mailto:elena.romero@unican.es) (E. Romero).



work of Romero and Ruiz (2013), which suggested a conceptual framework to model the operational stage of EIPs.

The contribution of Romero and Ruiz (2013) covers the formulation of the conceptual model, which corresponds to the first stage of the modelling process (Sterman, 2000; Izquierdo et al., 2008). Based on the analysis of strengths and weaknesses at two mechanisms of industrial symbiosis models—planned eco-industrial parks (PEIPs) and EIPs that developed through self-organising symbiosis (SOS)—, and on the inherent characteristics of EIPs as complex adaptive systems (CAS), five key properties to be modelled by the conceptual framework were deduced. These properties are represented by three main considerations of the conceptual model: (1) system and element objectives, which represent the properties of functionality and theoretical knowledge; (2) system surroundings, whose delimitation favours the adaptability of the model; and (3) internal and external relationships of the elements of the system, which represent the properties of reliability and life span. These considerations build the conceptual framework that enables a better understanding of system's operation.

The previous contribution covers the first stage of the modelling process, but also the next stages of modelling process that include the formalisation of the analytical model, the computational implementation, and its verification, validation and testing, should be undertaken. As a result of this modelling process, the computational model will favour the understanding of the operation of EIPs working in different scenarios and then, it can be used as support on the redesign of industrial areas towards EIPs.

This paper aims to contribute to the analytical model formalisation that describes the conceptual framework proposed by Romero and Ruiz (2013). This proposal presents an analytical model that enables the evaluation of potential cooperative relationships amongst companies and the assessment of the overall EIP operation in different scenarios. For this purpose, the paper is structured as follows. Section 2 is focussed on the review of two modelling paradigms that enable the description of the analytical model, systems dynamics (SD) and agent-based modelling (ABM). In Section 3, both modelling paradigms are evaluated according to the considerations of the conceptual framework (Romero and Ruiz, 2013). As a result of this evaluation, the ABM method is selected as the appropriate modelling paradigm. Based on the selected method, Section 4 is focussed on description of the model building blocks. Section 5 presents final remarks and some guidelines for the future stages of the modelling process.

## 2. Modelling paradigms for complex systems

The description of the analytical model needs to be supported on a modelling paradigm that should be consistent with the characteristics of the system to be represented. As discussed in a previous work, an EIP is considered a complex adaptive system according to characteristics as uncertainty, emergence, or adaptability amongst others (Romero and Ruiz, 2013). Therefore, the modelling methods evaluated for this purpose are system dynamics (SD) and agent-based modelling (ABM).

This section analyses both methods from a theoretical perspective, in order to compare the most representative features. Complementarily, a review of the scientific literature shows the suitability of their application to different knowledge areas and, specifically, to modelling of EIPs.

### 2.1. SD versus ABM methodologies

System dynamics (SD) arose in the fifties, developed by the engineer Jay W. Forrester, who defined SD as “the study of information-feedback characteristics of industrial activity to show how organizational structure, amplification (in policies), and time delays (in decisions and actions) interact to influence the enterprise” (Forrester, 1958, 1961; quoted on Borschev and Filippov, 2004). As Sterman (2000) states, this method “can be applied to any dynamic system, with any time and spatial scale”.

The approach of SD is deductive or top-down. This method has a holistic perspective and assumes that the complex behaviour arises from the causal structure and the endogenous properties of the system (Lorenz and Jost, 2006). The causal structure of the system considers feedback loops, time delays, flow diagrams and stock accumulation. The endogenous system properties are represented as observables or level variables in SD models, which express the state of the system. The relationships amongst these variables are nonlinear and are represented by feedback structures with time or space delays. Cause and effect are therefore distant in time and space. These delays may cause instability and increase the oscillation tendency in the dynamic system (Sterman, 2000). The SD models are represented in mathematical language by algebraic equations (differential or integral) for those variables that represent the properties of the system (Izquierdo et al., 2008). Lorenz and Jost (2006) note that SD models have “homogeneous entities, continuous politic pressures and emergent behaviour”.

Agent-based modelling (ABM) arose in the eighties but experienced a rapid growth in the nineties. As noted by Wooldridge (2002), the interest in ABM grew because ABM was “an appropriate software paradigm to exploit the possibilities presented by massive open distributed systems, such as the Internet”. The ABM method is suitable for modelling those systems that operate as an integrated service, although the systems are formed by autonomous components that communicate and coordinate.

The system modelled by the ABM method is formed by autonomous entities or agents that are characterised by certain attributes. These agents are autonomous, independent and heterogeneous with their own objectives and behavioural rules and are able to interact amongst themselves and with their surroundings (Scholl, 2001; Schieritz and Milling, 2003; Borschev and Filippov, 2004; Izquierdo et al., 2008; Barbati et al., 2012). The behavioural rules of agents may consist of simple “if-then” logic sentences or even more complicated learning algorithms. The approach of ABM is therefore inductive or bottom-up. The overall system behaviour emerges during the inference process from the interactions of the agents. Some conditions where the ABM method is recommended are proposed in the work of Bonabeau (2002), “when the interactions between agents are complex, nonlinear, discontinuous or discrete (...); when space is crucial and the agents' position are not fixed (...); when the population is heterogeneous (...); when the topology of the interactions is heterogeneous and complex (...); or when the agents exhibit complex, including learning and adaptation (...)”.

Based on the contribution of Schieritz and Milling (2003), Table 1 compares the main features of both modelling paradigms.

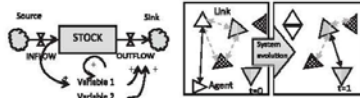
### 2.2. SD versus ABM applications

In addition to the theoretical comparison of modelling methods, a review of the scientific literature supported on the Scopus<sup>®</sup> database (SciVerse<sup>®</sup>, Elsevier B.V.) is presented. A search of general references determines the applicability to different knowledge areas, as well as the versatility and maturity of each modelling method. As Fig. 1 shows, the publishing rate for SD is greater, and SD is thus more mature than the ABM method. However, the application of both methods coincides in knowledge areas related mainly to applied sciences.

The specific search of the field of IE shows more conclusive results. Fig. 2 shows the similar number of contributions that applied the modelling methods to the field of IE, approximately 20 references for each method, which are distributed mainly in the same knowledge areas. However, only eight documents are focussed exclusively on modelling of eco-industrial areas, half to each method. This revision is limited to four of these papers. The analysis of these specific papers shows that both methods are suitable for the evaluation of the sustainability and evolution of eco-industrial systems or EIPs in different scenarios. Nonetheless, the formal description of analytical models by each method depends on the specific purpose of the studies.

**Table 1**  
Comparative modelling paradigms.

Comparative features	SD. System Dynamics	ABM. Agent Based Modelling
Modelling Approach	<b>Deductive</b> (top-down). Inference from the structure to the system behaviour.	<b>Inductive</b> (bottom-up). Inference from the agents' behaviour to the system behaviour.
Unit of analysis	<b>System Structure.</b> The behaviour of the system arises from its structure.	<b>Agents' rules.</b> The behaviour of the system emerges from the agents' behaviour and their interactions.
Building blocks	<b>Feedback loops.</b> Representation of cause and effect relationships.	<b>Agents.</b> Individual entities that form the system.
Handling on time	<b>Continuous.</b> Temporal variable is continuous.	<b>Discrete.</b> Temporal variable is discrete.
Formal expression	<b>Algebraic equations</b> that define variable relationships and feedbacks.	<b>Logic sentences</b> that define behavioural rules of the agents.
Model representation	<b>Causal relationships</b> that nonlinearly link the observed variables, parameters and stock accumulations, considering temporal and spatial delays between cause and effect.	<b>Agent population</b> formed by autonomous, heterogeneous and independent entities with their own objectives, properties, and social ability to interact between them and with their surroundings.
Graphical representation	<b>Causal loop diagrams</b> and stock and flow structures.	<b>Individual representation</b> of agents that form the system.



The contributions supported by SD (Zhao et al., 2008; Qu et al., 2010) study the EIP behaviour from a global perspective. These models are represented by their state variables, which depend on the requirements and objectives of each particular study. The communication of Qu et al. (2010) assesses the effects of the industrial chain on some features such as diversity of companies or degree of association of the network to promote sustainable industrial areas. In this work, the level variables are specific properties of the system related to the purpose of the study, such as industrial added value or technological investment. The work of Zhao et al. (2008), however, is focussed on the evaluation of the environmental impact, so accumulations of the anthropogenic pollutants are set as level variables. In SD models, level variables are expressed by differential equations, and their relationships are expressed through causal feedback, which may be represented by delay or smooth functions. The level variables are used to represent the evolution of the state of the system according to the modification of certain parameters such as degree of association of the network.

The papers supported by the ABM method (Cao et al., 2009; Li and Wei, 2009) study the individual components of the EIPs and their

interactions, from which the system behaviour emerges. Although the basic unit of analysis is the same (agent), the description of the categories of the agents depends on the objectives of each study. The communication of Li and Wei (2009) defines an information model that allows an integrated analysis of the eco-industrial system. These authors establish four categories of agents that belong to the eco-industrial system (*Business Agent, Technical Agent, Community Agent and Labor Agent*) and also describe the reasoning and reacting protocol of the agents. This work does not go into depth on the specifics of EIP. However, the paper of Cao et al. (2009) studies the evolution of an eco-industrial system or EIP. In this work, the authors consider the interactions of the EIP with its surroundings, represented by three agents: *Factory Agent, Environment Agent and Consumer Agent*. These agents are related through material flows and determination of the prices of products. The study of the sustainability of the EIP and its direction of evolution is based on an energy analysis. Cao et al. (2009) illustrate their model in a hypothetical case study where industrial processes and material exchanges are established.

Except for the contribution of Li and Wei (2009), which is focussed on the description of an information model of an EIP, the rest of the analysed paper studies the sustainability of the EIP. These analytical models are verified based on pre-existing exchange networks. However, the approach of our proposal is focussed on the detection of possible material exchanges amongst a group of known companies and, therefore, the definition of the symbiosis network and its evaluation. This proposal aims to contribute to the assessment of cooperative industrial relationships to promote the transformation of traditional industrial areas to EIPs. The modelling method selected in this work should support the process of detection of material exchanges.

### 3. Problem planning and modelling method selection

Based on the previous review, SD and ABM are suitable methods to model EIPs. Both methods are applicable to modelling of complex systems, and previous research papers demonstrate their applicability to modelling of EIPs. The selection of the modelling method is strongly oriented towards the purpose of the study. This section therefore presents the evaluation of SD and ABM modelling methods according to our specific model requirements.

Based on the previous work of the authors Romero and Ruiz (2013), the conceptual model is illustrated in Fig. 3. The object of this study is an industrial system built up by a group of companies with known flows of consumed and generated material. Each company has individual objectives, although the membership in the EIP implies that the overall performance aims towards the environmental and economic improvement of the system. The development of cooperative relationships amongst companies is one of the strategies to achieve the goals of the EIP. The field of IS proposes some examples of these cooperative strategies

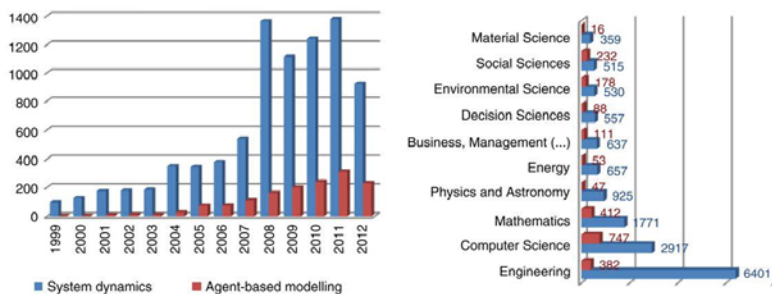


Fig. 1. SD and ABM comparison. Annual publishing rate from 1999 to 2012 (left). Publishing rate by knowledge areas (right).

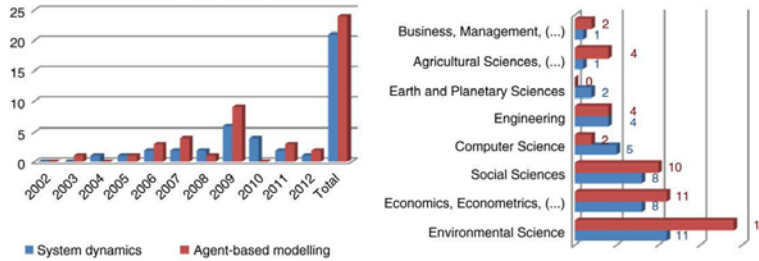


Fig. 2. SD and ABM comparison in the field of industrial ecology. Annual publishing rate from 2002 to 2012 (left). Publishing rate by knowledge areas (right).

such as material, water and energy exchange networks or the shared use of utilities, services or information systems (Chertow, 2004). Nonetheless, the model proposed in this study considers only the development of waste and by-product exchange networks, which are related to the substitution of an input flow of one company for a residual flow of another company. The cooperative network is built after the evaluation of the information available about the flows consumed and generated by companies. Moreover, this system is also influenced by its surrounding environment. The surroundings are defined as a nested system formed by natural, social and economic elements, which impact over the operation of companies through the modification of the circulating flows. The evolution of the system was studied based on the development of the cooperative network as well as on the achievement of the objectives of the EIP. The characteristics of the conceptual model are specified as selective criteria in Table 2 to evaluate the suitability of both modelling paradigms.

Both modelling methods have advantages. However, for the proposed model, the ABM method fulfils more requirements than the SD method. The holistic perspective of SD enables one to define the model from their observable variables, to represent system's objectives and to consider the system surroundings. However, SD fails in the representation of the components' objectives and the internal relationships, and thus, of the respective properties of the conceptual model, "theoretical knowledge" and "life span". As Scholl (2001) stated "individual agents or events do not matter much in SD models, since the dynamics of the underlying structures are seen as dominant". In contrast, "agent-based models force more careful consideration of agents and the specification of their behavioural rules" (Wakeland et al., 2004, quoted in Swinerd and McNaught, 2012). ABM method defines the system from their heterogeneous components, as Section 2.1 denoted. Each component of the system is defined by its individual objectives, properties and behaviours, which enable the interaction amongst components. This supports the representation of respective conceptual model properties.

Nonetheless, ABM does not completely fulfil our specific model requirements. This approach makes possible the representation of system surroundings, but unlike SD the evaluation of the causality from feedback loop structure is not explicitly considered. Consequently, the property "reliability" of the conceptual model is partially represented. This weakness makes us reconsider the implementation of our model through a hybrid approach, which integrates ABM and SD methods. The use of hybrid simulation models is suggested in "situations where either one of the modelling methods has difficulties to coping with" (Lättilä et al., 2010). The realistic simulations achieved by hybrid models are currently causing a growing interest on this multi-paradigm approach (Swinerd and McNaught, 2012). However, the modelling effort is consequently increased. Thus, before attempting into a hybrid approach the level of detail required at this stage of preliminary modelling should be assessed.

Going back to the problem planning, the purpose of the model is the study of cooperative networks developed amongst companies which initially are non-related. The model should firstly detect the possible cooperative relationships based on component's properties and then, formalise the feasible ones. Additionally, the model should be able to adapt to internal changes of the relational network, as well as, to external impacts caused by its surroundings. At this stage of modelling, the components description is essential to achieve these preliminary objectives, whereas the consideration of feedback loops with system's surroundings fades into the background. Although the causality of feedback loops is not explicitly considered, the representation of system-surrounding relationships might be intrinsically codified in the behavioural rules of agents, as in the case study of Cao et al. (2009). At this stage of modelling, this level of detail to symbolise system external relationships is enough to represent the property of the conceptual model "reliability". Therefore, although a hybrid model might be a good choice in future phases of model refinement, at this stage the ABM method is suited for the model purpose. Then, Section 4 presents

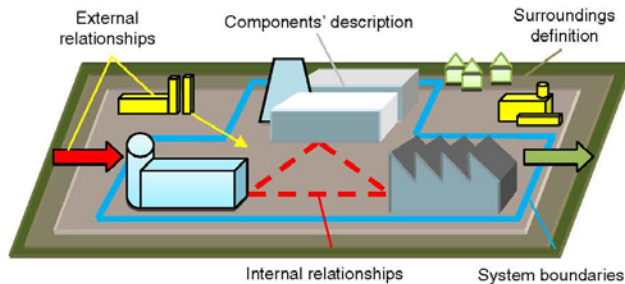


Fig. 3. Representation of the conceptual model.

**Table 2**  
Evaluation of modelling methods based on specific model requirements.

	<b>Specific model requirements</b>	<b>SD</b>	<b>ABM</b>
<i>System objectives</i>	Determination of the economic and environmental objectives of the system. Assessment of the system operation according to different external conditions. Representation of the evolution of system objectives.	✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓
<i>Component objectives</i>	Consideration of heterogeneous components in the system. Representation of the system components according to their specific characteristics and objectives.	✓ ✓	✓ ✓
<i>System surroundings</i>	Description of the system surroundings. Evaluation of the causality from feedback loop structure.	✓ ✓	✓ X
<i>External relationships</i>	Representation of the surroundings and relationships of the system. Evaluation of the influence of the surroundings on the system.	✓ ✓	✓ ✓
<i>Internal relationships</i>	Representation of component relationships. Evaluation of the development of cooperative networks based on industrial symbiosis strategies.	X X	✓ ✓
<i>Technical versatility</i>	Assessment of the evolution of cooperative networks. Flexibility of the method to integrate with other modelling techniques. Application of the method to different knowledge areas. Suitability of the method supported by previous cases of EIP modelling.	X ✓ ✓ ✓	✓ ✓ ✓ ✓

the definition of the descriptive and analytical model based on the ABM modelling paradigm, according to the specific characteristic defined previously.

**4. Model definition based on ABM**

The basic unit of analysis in ABM methodology is the agents. However, the definition of the model requires the consideration of complementary building blocks. As explained in Barbati et al. (2012), who summarise the work of Billari et al. (2006) and Weiss (1999), the building blocks that form an ABM model are: the object of the simulation, the population of agents, adaptive ability and interaction paradigm. Table 3 shows a brief description of each building block and the description of this building block in the proposed model.

**4.1. Object of the simulation**

The object of the simulation consists of determining the evolution of an industrial area where symbiotic industrial strategies are implemented. The development of cooperative relationships amongst companies looks for the improvement of economic and environmental objectives of the overall system, which should be greater than the improvement achieved by the progress of individual companies, as the next equations express (see Glossary in Table A.1).

$$\max(GEP_{EP}) > \sum_{i=1}^N \max(EP)_{A_i} \tag{1}$$

$$\min(GEI_{EP}) < \sum_{i=1}^N \min(EI)_{A_i} \tag{2}$$

This objective implies the evaluation of the overall system based on environmental and economic criteria. According to different scenarios, these conditions are evaluated in each simulation cycle to check the promotion of the economic and environmental goals and the combination of suitable companies to form the exchange network. To measure the improvements introduced by the cooperative network, five indicators are defined.

- *Index of Network Density (IND)*. In a specific scenario, *IND* is the relationship between the number of cooperative relationships and the number of companies that form the system. The greater the index, the greater the number of exchanges.

$$IND = \frac{\text{Number of cooperative relationships}_{EP}}{\text{Number of companies}} \tag{3}$$

- *Index of Global Economic Profit (IGEP)*. In a specific scenario, *IGEP* is the relationship between global economic profit of the EIP, which is obtained in a cooperative situation (*coop.*), and the addition of the individual economic profits of each company, which is obtained in a noncooperative situation (*non-coop.*). This index is dimensionless and greater than 1. An increasing tendency means better economic results.

$$IGEP = \frac{GEP_{EP}}{\sum_{i=1}^N EP_{A_i}|_{non-coop.}} = \frac{\sum_{i=1}^N EP_{A_i}|_{coop.}}{\sum_{i=1}^N EP_{A_i}|_{non-coop.}} \tag{4}$$

**Table 3**  
Summary of building blocks of the proposed EIP model.

<b>Building block</b>	<b>Description in the proposed EIP model</b>
<i>The object of the simulation.</i> Phenomena that are going to be reproduced.	Simulation objective is focussed on the evolution of the EIP based on the development of cooperative networks amongst companies and the maximisation of overall economic and environmental benefits.
<i>Agents.</i> Basic unit of analysis of an agent-based model. The definition of the structure of the agents should be detailed.	The agents that form the EIP are individual companies with their own objectives as the maximisation of their economic benefits. These agents are defined by specific properties that represent the heterogeneity of the population of agents and by behavioural rules that represent the independence of the agents.
<i>Population of agents.</i> Agents can be grouped in different categories with common characteristics.	The population of agents depends on the real system that is represented. The population defined aims to represent the variability and heterogeneity of real world. Based on the strategies of the agents for the decision making process, three categories of agents are specified.
<i>Adaptive ability of agents.</i> The ability of the agents to adapt to changes or modifications.	The adaptive ability of agents is expressed by the means owned by the agent to adapt to changes in surroundings. The agent assimilates the external changes, modifying itself to the new situation.
<i>Interaction paradigm.</i> Each agent can interact with agents from the same or different categories.	The interactions studied in the model are supported by the opportunities for materials exchange amongst companies that favour the formalisation of cooperative networks based on industrial symbiosis strategies.

- *Index of Global Environmental Impact from wastes (IGELw)*. In a specific scenario, *IGELw* is the relationship between the global environmental impact of the EIP, which is considered as the global quantity of wastes generated in a cooperative situation (*coop.*), and the addition of the individual environmental impacts of each company, which is considered as the sum of individual quantities of wastes generated in a noncooperative situation (*non-coop.*). This index is dimensionless and less than 1. A decreasing tendency means better environmental results.

$$IGELw = \frac{GEIw_{EIP}}{\sum_{i=1}^N WQ_{A_i}|_{non-coop.}} = \frac{\sum_{i=1}^N WQ_{A_i}|_{coop.}}{\sum_{i=1}^N WQ_{A_i}|_{non-coop.}} \quad (5)$$

- *Index of Global Environmental Impact (IGEI)*. In a specific scenario, *IGEI* is the relationship between the global environmental impact of the EIP, which is considered as the addition of the global quantities of resources consumed and wastes generated in a cooperative situation (*coop.*), and the addition of the individual environmental impacts of each company, which is considered as the sum of individual quantities of resources consumed and wastes generated in a noncooperative situation (*non-coop.*). This index is dimensionless and less than 1. A decreasing tendency means better environmental results.

$$IGEI = \frac{GEI_{EIP}}{\sum_{i=1}^N WQ_{A_i}|_{non-coop.} + \sum_{i=1}^N RQ_{A_i}|_{non-coop.}} = \frac{\sum_{i=1}^N WQ_{A_i}|_{coop.} + \sum_{i=1}^N RQ_{A_i}|_{coop.}}{\sum_{i=1}^N WQ_{A_i}|_{non-coop.} + \sum_{i=1}^N RQ_{A_i}|_{non-coop.}} \quad (6)$$

- *Index of Global Measurement of Sustainable Performance (IGMSP)*. In a specific scenario, *IGMSP* is the relationship between the Index of Global Economic Profit (*IGEP*) and the Index of Global Environmental Impact (*IGEI*). This index is dimensionless and greater than 1. Since this index combines the measurement of both economic and environmental results, it facilitates the comparison of system

performance on different scenarios. An increasing tendency means both better economic and environmental results.

$$IGMSP = \frac{IGEP}{IGEI} \quad (7)$$

#### 4.2. Definition of structure of agents

According to the definition of **Wooldridge and Jennings (1995)**, an agent is a computational system that interacts with its surroundings and that is able to have autonomy (it acts without external control), social ability (it interacts with other agents via a communication language), reactivity (it responds to changes in its surroundings), and proactiveness (it behaves to achieve its objectives). These characteristics are represented by the properties, objectives and behavioural rules of agents, which provide independence and goal-directed behaviour. Based on these premises, **Fig. 4** shows the agent structure proposed in this work for the representation of the agents.

The properties of the agent govern the operation and relational mechanisms. The properties are defined as vectors that gather the qualitative and quantitative information for each agent. The proposed model distinguishes two types of properties of agents: those associated with the flows that circulate through the company and those associated with the category of the agent.

The first typology is related to the technical and economic properties of the material flows that are consumed and generated by companies: resources (*R*), wastes (*W*), and products (*P*). These properties are directly related to the productive processes of each company. Technical properties show information about the type (*t*) and quantity (*q*) of each material flow. This information is analysed for the evaluation of cooperative opportunities. Economic properties give information about the unit financial value of the material flows (*c*), resource costs, waste management costs and the selling price of products. The economic information modulates the material exchanges between agents. Each property is defined by a list of elements.

Then the flow-related properties of an agent (*A<sub>i</sub>*) are represented by ten row vectors, as **Eq. (8)** and **Table 4** show. The first three vectors (*Rt*, *Rq*, and *Rc*), each of which is formed by *n<sub>R</sub>* elements, are related to the type, quantity and cost properties of the resources, respectively. The next three vectors (*Wt*, *Wq*, and *Wc*), each of which is formed by *n<sub>W</sub>*

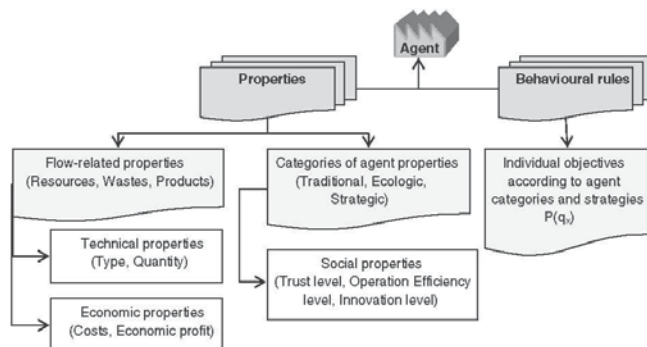


Fig. 4. Structure scheme for the agent.

**Table 4**  
Flow-related properties: Glossary and expressions.

Flow-related properties	Expression
$Rt_M$	Type of raw materials consumed $[Rt]_A = [rt_1, rt_2, \dots, rt_j, \dots, rt_n]_A$ $rt_j = (\text{resource name})$ $j = 1, \dots, n_R$
$Rq_M$	Quantity of raw materials consumed $[Rq]_A = [rq_1, rq_2, \dots, rq_j, \dots, rq_n]_A$ $rq_j \in \mathbb{R}$ $j = 1, \dots, n_R$ $RQ_A = [\sum_{j=1}^{n_R} rq_j]_A$
$Rc_M$	Unit cost of raw materials consumed $[Rc]_A = [rc_1, rc_2, \dots, rc_j, \dots, rc_n]_A$ $rc_j \in \mathbb{R}$ $j = 1, \dots, n_R$
$Wt_M$	Type of waste generated $[Wt]_A = [wt_1, wt_2, \dots, wt_k, \dots, wt_n]_A$ $wt_k = (\text{waste name})$ $k = 1, \dots, n_W$
$Wq_M$	Quantity of waste generated $[Wq]_A = [wq_1, wq_2, \dots, wq_k, \dots, wq_n]_A$ $wq_k \in \mathbb{R}$ $k = 1, \dots, n_W$ $WQ_A = [\sum_{k=1}^{n_W} wq_k]_A$
$Wc_M$	Unit management cost of waste generated $[Wc]_A = [wc_1, wc_2, \dots, wc_k, \dots, wc_n]_A$ $wc_k \in \mathbb{R}$ $k = 1, \dots, n_W$
$Pt_M$	Type of products manufactured $[Pt]_A = [pt_1, pt_2, \dots, pt_m, \dots, pt_n]_A$ $pt_m = (\text{product name})$ $m = 1, \dots, n_P$
$Pq_M$	Quantity of products manufactured $[Pq]_A = [pq_1, pq_2, \dots, pq_m, \dots, pq_n]_A$ $pq_m \in \mathbb{R}$ $m = 1, \dots, n_P$
$Pc_M$	Unit prices of products manufactured $[Pc]_A = [pc_1, pc_2, \dots, pc_m, \dots, pc_n]_A$ $pc_m \in \mathbb{R}$ $m = 1, \dots, n_P$
$Ep_M$	Economic profit from selling $Ep_A = [Pq]_A \cdot [Pc]_A^T - ([Rq]_A \cdot [Rc]_A^T + [Wq]_A \cdot [Wc]_A^T)$

elements, are related to the type, quantity and cost properties of waste flow. The next three vectors ( $Pt$ ,  $Pq$ , and  $Pc$ ), each of which is formed by  $n_P$  elements, are related to the type, quantity and prices of the products sold. The last value ( $Ep$ ) is a scalar that represents the economic profit. This value results from the combination of quantity and cost vectors of the agent properties and shows the economic evolution of the company.

$$\text{properties}_{\text{flow-related}} = \{[Rt], [Rq], [Rc], [Wt], [Wq], [Wc], [Pt], [Pq], [Pc], [Ep]\}_A \quad (8)$$

However, the decision making of agents is based not only on quantitative features such as economic savings or environmental impacts but also considers social aspects related to the appraisal of companies or the business strategy for the long or medium term. Three properties are therefore proposed to represent these social aspects, Eq. (9). These properties are defined as random scalars whose values depend upon the category of each agent, as Table 5 depicts. The first property proposed is trust level ( $Tr$ ), which represents the trust offered by a company to establish commercial agreements. Agents belonging to the *Traditional* category show greater values of the trust level property than other category of agent. The second property, operation efficiency level ( $Ef$ ), represents the image of the environmental company. Agents

belonging to the *Ecologic* category show greater values of operation efficiency level than other categories. The third property, innovation level ( $In$ ), represents the initiative of the company to develop new strategies. *Strategic* agents show greater values of innovation level property than other categories of agent.

$$\text{properties}_{\text{Agent's category}} = \{Tr, Ef, In\}_A \quad (9)$$

In addition to agent properties, the definition of behavioural rules is also needed to complete the structure of the agent. Agents act according to certain objectives and have a goal-directed behaviour. Therefore, the satisfaction level of the objectives is the criterion that conditions their behaviour. In this study, the satisfaction level is represented by the utility function  $P(q_x)$ , which depends on the strategy ( $q_x$ ) chosen by each agent (Table 6). The utility function is expressed as the addition of four indexes that assess the cooperative strategies from different perspectives, Eq. (10). First, the *Economic Profit index* ( $iEP$ ) compares the improvement of economic profit obtained by performing the strategy  $q_x$  in the cooperative situation relative to the economic profit obtained from a noncooperative situation. Second, the *Environmental Impact index* ( $iEI$ ) compares the environmental improvement caused by the resource consumption and waste generation obtained by performing the strategy  $q_x$  in a cooperative situation relative to the environmental impacts caused by a noncooperative situation. Third, the *Social Benefit index* ( $iSB$ ) compares the social improvement obtained by performing the strategy  $q_x$  in the cooperative situation relative to the social benefit obtained in a noncooperative situation. According to the category of the agent, the values of the weighting coefficients ( $\alpha, \beta, \gamma$ ) are assigned to increase the contribution of the main index in the utility function. The last index, which is called *Advantage Strategy degree* ( $\delta$ ), assesses the preference for each strategy according to the category of the agent. The value of this index might be  $[-1, 0, 1]$  if the strategy  $q_x$  is less, normal or more favourable than another possible strategy.

$$P(q_x) = \alpha_A \cdot iEP(q_x)_A + \beta_A \cdot iEI(q_x)_A + \gamma_A \cdot iSB_A + \delta(q_x)_A \quad (10)$$

**Table 5**  
Category properties of agents: Glossary and expressions.

Agent's category properties	Expression
$Tr_M$	Trust level $If A_i \in \text{traditional category} \rightarrow Tr_A \in (1, 2)$ $Tr_A > (Ef_A, In_A)$
$Ef_M$	Operation Efficiency level $If A_i \in \text{ecologic category} \rightarrow Ef_A \in (1, 2)$ $Ef_A > (Tr_A, In_A)$
$In_M$	Innovation level $If A_i \in \text{strategic category} \rightarrow In_A \in (1, 2)$ $In_A > (Tr_A, Ef_A)$

**Table 6**  
Utility function parameters: Glossary and expressions.

Utility function parameters		Expression
$P(q_c)_M$	Payoff of company decision, based on each strategy	$P(q_c)_A = \alpha_A \cdot iEP(q_c)_A + \beta_A \cdot iEI(q_c)_A + \gamma_A \cdot iSB_A + \delta(q_c)_A$
$q_c$	Cooperative strategy	$q_c \in [\min(r \cdot q_A, w \cdot q_A), 0]$
$iEP_M$	Economic Profit index	$iEP(q_c)_A = \frac{P(q_c)_A}{P_{max,comp}}$
$iEI_M$	Environmental Impact index	$iEI(q_c)_A = \frac{WCO(q_c)_A + ECO(q_c)_A}{WCO_{max,comp} + ECO_{max,comp}}$
$iSB_M$	Social Benefit index	$iSB_A = \frac{Tr_A + Ef_A + In_A}{Tr_A + Ef_A + In_A + P_{max,comp}}$
$\alpha_M$	Coefficient of economic profit	$\alpha_A \in (0, 1)$
$\beta_M$	Coefficient of environmental impact	$\beta_A \in (0, 1)$
$\gamma_M$	Coefficient of strategic benefit	$\gamma_A \in (0, 1)$
$\delta_M$	Advantage decision degree	$\delta_A = \delta(q_c, \text{Agent category}) \in [-1, 0, 1]$

4.3. Population and actions of agents

Despite the properties of the agent built up from a heterogeneous population, agents can be grouped into categories based on same characteristics (Table 7). ABM models usually define different categories of agents so as to represent the variety of companies in the real world and favour the analytical process (Albino et al., 2006; Li and Wei, 2009). Based on the different attitudes of firms challenging innovative environmental-related projects, this model proposes three categories of agent, *Traditional Agent*, *Ecologic Agent* and *Strategic Agent*. The characteristics used to establish the category of the agent are: agent category properties, weighting coefficients of the utility function, and index of *Advantage Strategy degree*, which is analysed in Section 4.5.

The *Traditional Agent* category characterises established companies whose participation in environmental-related projects is mainly motivated by economic affairs. Companies which follow traditional end-of-pipe policies to fulfil normative expectations might be used as an example of this agent category. This category groups companies for which trust level (*Tr*) is the most relevant social property. Because *Traditional Agent* looks for an economic reward to establish commercial agreements,  $\alpha$  weighting coefficient of the utility function is greater than the others so as to prioritise the *Economic Profit index (iEP)* in the evaluation of the utility of cooperative interactions. The *Ecologic Agent* category characterises companies environmentally concern. Eco-innovative companies, which integrate the prevention of environmental impacts in each stage of the productive process, may be used as example of *Ecologic Agent*. This category groups companies for which operational efficiency level (*Ef*) is the most relevant social property. Due to environmental protection is decisive to *Ecologic Agent*,  $\beta$  is the greatest weighting coefficient in the utility function so as to prioritise the *Environmental Impact index (iEI)* in the assessment of cooperative interactions. The *Strategic Agent* characterises

companies with proactive attitude to environmental and social affairs. The companies represented by this category usually promote innovative projects and manifest an active participation on them. Companies subscribing to corporate social responsibility, which promote the investment on social and environmental affairs, may represent an example of this last category of agents. This category groups companies for which innovation level (*In*) is the most relevant social property. In the utility function,  $\gamma$  is the greatest weighting coefficient because the *Social Benefit index (iSB)* is decisive to assess the utility of cooperative interactions.

Independent of the category of the agent, every agent can perform four modes of action: production, adaptation, cooperation and disappearance. The first action mode, production, is the routine operation of the company. Each company consumes a certain quantity of resources and generates a certain quantity of wastes to manufacture a specific amount of product. Types, quantities and costs are represented as the flow-related properties of each agent  $A_i$ . The second action mode proposed, which is discussed in Section 4.4, is adaptation, defined as the updating process after a change in the surroundings or in the network, which affects the structure of the agents. Cooperation is the third action mode proposed. An agent cooperates to exchange residual flows with other agents. This action mode implies initiative and interactions amongst agents, so the cooperative mechanism is discussed in Section 4.5. The last action mode, disappearance, means the emigration of the agent from the industrial area. When the operation of the agent is unfeasible in the current scenario, in other words, when its economic profits are null, the agent disappears.

4.4. Surroundings and agent adaptive ability

Agents react not only to agent interactions but also to surrounding events. A detailed description of the surroundings favours a better adaptation of the system to external changes. As previously stated, the surroundings of the model are defined as a nested systems environment through which different flows circulate. Based on these flows, the surrounding environment is defined by three subsystems (natural, social and economic), which affects the system in several ways.

- Natural surroundings. This system generates the resources and absorbs the wastes of other systems. This model represents the abundance or scarcity of resources demanded by agents. Changes in natural surroundings affect the economic properties of resource flow (*Rc*).
- Social surroundings. This system sets the norms and laws that govern the operation of the technological systems. In this model,

**Table 7**  
Agent categories and representative characteristics.

Agent's Categories	Agent's category property	Weighting coefficient of utility function
Traditional	$Tr_A \in [1, 2]$	$\alpha_A \in (0, 1)$
	$Tr_A > (Ef_A, In_A)$	$\alpha_A > (\beta_A, \gamma_A)$
Ecologic	$Ef_A \in [1, 2]$	$\beta_A \in (0, 1)$
	$Ef_A > (Tr_A, In_A)$	$\beta_A > (\alpha_A, \gamma_A)$
Strategic	$In_A \in [1, 2]$	$\gamma_A \in (0, 1)$
	$In_A > (Tr_A, Ef_A)$	$\gamma_A > (\alpha_A, \beta_A)$

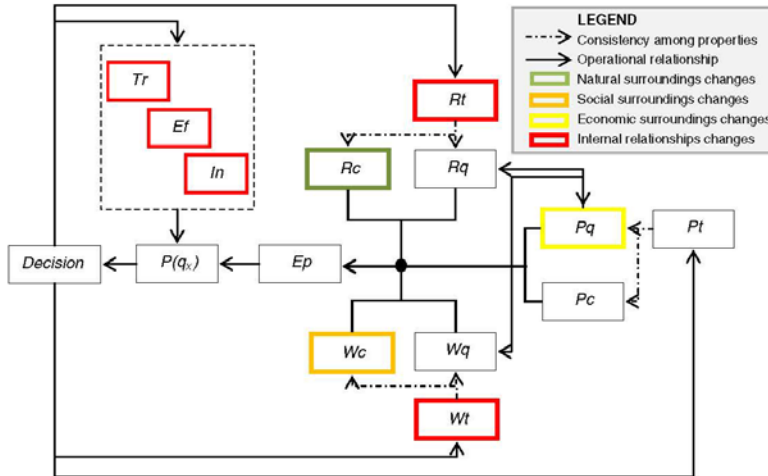


Fig. 5. Consistency relationships amongst agent properties.

the normative scenario is represented through waste management. The more severe the normative scenario, the more expensive waste management taxes. Changes in social surroundings affect the economic properties of waste flow ( $Wc$ ).

- Economic surroundings. This system sets the economic market conditions. In this model, the economic market conditions are represented by the demanded quantity of products ( $Pq$ ). Consequently, changes in product quantities govern the quantities of resources and waste flows.

Modifications of the natural, social or economic surroundings affect  $Rc$ ,  $Wc$  and  $Pq$  agent properties. The structure of the agent should constantly maintain consistency. After a change of one property, the rest of the properties of the agent should be checked and recalculated. The adaptive ability is defined as the internal mechanism of the agent to update its properties. The consistency relations amongst agent properties are shown in Fig. 5. In addition to modifications of the surroundings, the interactions amongst agents also alter the properties of the agent. As the next Section (4.5) shows, properties  $Rt$ ,  $Wt$ ,  $Tr$ ,  $Ep$  and  $In$  are conditioned by the internal relationships.

4.5. Interaction paradigm

Cooperation is the action mode that implies interactions amongst agents based on the development of material exchanges of residual flows. The result of this action mode is the establishment of commercial agreements between agents. Although these interactions are conditioned by the behavioural rules of the agent and the strategies, the first condition to assess cooperative actions is to check the substitutive ability of the flows of each agent. The model integrates a knowledge database that registers several flow substitutions for existing industrial symbiosis experiences. This knowledge database relates replaceable types of resources to the types of wastes able to substitute each of them.

For each agent  $A_i$ , each value of resource type property ( $Rt$ ) is searched in the knowledge database, as Fig. 6 represents. Those resources indexed in the knowledge database are listed as "selected replaceable resources". The wastes and by-products associated with the "selected replaceable resources" are used as "searching parameters" in the knowledge database. Then, for each agent  $A_j$  ( $i \neq j$ ), each value of waste type property ( $Wt$ ) is checked with the "searching parameters" to determine the appropriate agents that generate substitute wastes

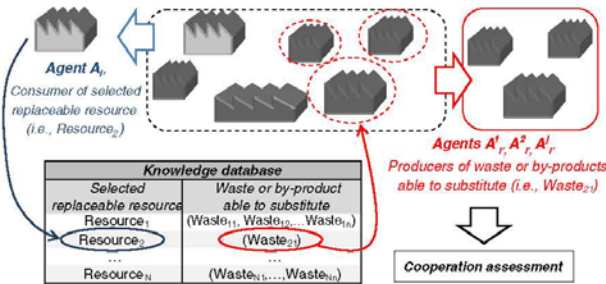


Fig. 6. Knowledge database consulting to define cooperative opportunities.



**Table 8**  
Advantage decision degree by agent category.

Agents' Categories	Advantage decision degree	
	Waste or by-product buyer	Waste or by-product seller
Traditional	$\delta_A(q_x) = \begin{cases} q_x > r q_A \rightarrow \delta = -1 \\ q_x = r q_A \rightarrow \delta = 1 \\ q_x < r q_A \rightarrow \delta = q_x / r q_A \in (0, 1) \\ q_x = 0 \rightarrow \delta = 0 \end{cases}$	$\delta_A(q_x) = \begin{cases} q_x > w q_A \rightarrow \delta = -1 \\ q_x = w q_A \rightarrow \delta = 1 \\ q_x < w q_A \rightarrow \delta = -1 \\ q_x = 0 \rightarrow \delta = 0 \end{cases}$
Ecologic	$\delta_A(q_x) = \begin{cases} q_x > r q_A \rightarrow \delta = -1 \\ q_x = r q_A \rightarrow \delta = 1 \\ q_x < r q_A \rightarrow \delta = -1 \end{cases}$	$\delta_A(q_x) = \begin{cases} q_x > w q_A \rightarrow \delta = -1 \\ q_x = w q_A \rightarrow \delta = 1 \\ q_x < w q_A \rightarrow \delta = 0 \\ q_x = 0 \rightarrow \delta = -1 \end{cases}$
Strategic	$\delta_A(q_x) = \text{random}[-1, 0, 1]$	$\delta_A(q_x) = \text{random}[-1, 0, 1]$

and might establish material exchanges  $\{rt_{ref} = r_{t_i} \in R_{A_i}\} \approx \{wt_{ref} = wt_i \in W_{A_i}\}$ ,  $i \neq l$ . The cooperative opportunity is finally determined if the unit cost of the specific waste of the agent  $A_l$  ( $w_{C_l}$ ) is less than the unit cost of the agent  $A_i$ 's resource ( $r_{C_i}$ ),  $\{w_{C_l} \in W_{C_{A_l}}\} \leq \{r_{C_i} \in R_{C_{A_i}}\}$ . An affirmative situation means the development of a cooperative action. Then, agent  $A_i$ , whose resource is replaceable ( $r_{t_i}$ ) takes the role of "buyer", and the agent  $A_l$  whose residual flow can substitute the resource ( $w_{t_l}$ ) takes the role of "seller". The formalisation of the cooperative action requires an agreement between both agents about the quantity of waste exchanged. The strategies of agents depend on the quantity that each agent has ( $r_{q_i}$ ,  $w_{q_l}$ ). According to the quantity of waste exchanged ( $q_x$ ) and the categories of the agents, the advantage decision degree is calculated as Table 8 shows. The payoff of each strategy is finally determined using the utility function  $P(q_x)$ .

Game theory is the underlying support used for the assessment of cooperative interactions. Game theory is suitable to solve problems in which "multiple strategies that yield 'best' benefits coexist, dependent upon actions of other agents" (Dixit and Skeath, 1999; quoted on Grimes-Casey et al., 2007). Some authors introduce this theory in the assessment of an industrial ecosystem due to "generating the structure for the analysis of problems with strategic choices" (Lou et al., 2004; Chew et al., 2009). A game is any interaction that implies two or more players (Myerson, 1991). The game proposed in this model is noncooperative because the players do not establish previous agreements to coordinate their strategies.

Therefore, the game proposed by the cooperative action mode is defined as  $G = \{A_i, A_l\}$ , where players  $A_i$  and  $A_l$  represents "buyer" and "seller" agents, respectively. Each player proposes four strategies that depend on whether the quantity of waste exchanged ( $q_x$ ) is greater than, equal to or less than the quantity of the corresponding flow or even null, as Eqs. (11) and (12) show. Based on the category of the agent, the utility function for each strategy is evaluated. The maximum value of  $q_x$  is limited by the minimum value between  $r_{q_i}$  and  $w_{q_l}$ , which conditions the utilities for the players. For this type of game, Nash equilibrium is the best solution from which none of the players would deviate to improve their payoff (Myerson, 1991; Basar and Olsder, 1999). Therefore, in the model, the proposed Nash equilibrium depends on the "buyer" and "seller" categories of the agent and the quantity of waste exchanged.

Buyer:

$$q_{A_i} = \{q_{A_i}^1, q_{A_i}^2, q_{A_i}^3, q_{A_i}^4\} = \{q_{A_i}^1 : q_x > r q_i, q_{A_i}^2 : q_x = r q_i, q_{A_i}^3 : q_x < r q_i, q_{A_i}^4 : q_x = 0\} \quad (11)$$

Seller:

$$q_{A_l} = \{q_{A_l}^1, q_{A_l}^2, q_{A_l}^3, q_{A_l}^4\} = \{q_{A_l}^1 : q_x > w q_l, q_{A_l}^2 : q_x = w q_l, q_{A_l}^3 : q_x < w q_l, q_{A_l}^4 : q_x = 0\} \quad (12)$$

An example of cooperative action amongst two agents is proposed: "buyer" agent, who belongs to the *Traditional Agent* category,

demands  $r q_{A_l}$  and "seller" agent, who belongs to *Ecologic Agent* category, offers  $w q_{A_l}$  which is greater than  $r q_{A_l}$ . In this case, the maximum value of  $q_x$  is limited by  $r q_{A_l}$  and thus the strategies of "buyer" and "seller" are  $q_{A_i} = \{q_{A_i}^1, q_{A_i}^2, q_{A_i}^3, q_{A_i}^4\}$  and  $q_{A_l} = \{q_{A_l}^1, q_{A_l}^2, q_{A_l}^3, q_{A_l}^4\}$ , respectively. The order of magnitude of the *iEP*, *iEI* and *iSB* indexes is similar, so the utility function can be simplified based on the greatest weighting coefficient related to each agent category. Then, the expression of utility function for the "Traditional-buyer" results as  $P(q_{A_i}) = iEP(q_{A_i}) + \delta(q_{A_i})$  and for the "Ecologic-seller" results as  $P(q_{A_l}) = iEI(q_{A_l}) + \delta(q_{A_l})$ . Therefore, for the "Traditional-buyer", a greater quantity of waste exchanged ( $q_x$ ) results in a greater economic savings and, hence, a greater value of *iEP*. This rule is also valid for the value of the advantage decision degree due to  $q_x \leq r q_{A_i}$ . Then, for a fixed  $q_{A_i}$ , the "Traditional-buyer" preferences are  $q_{A_i}^1 > q_{A_i}^2 > q_{A_i}^3 > q_{A_i}^4$  (being  $P(q_{A_i}^4) = P(0) = 0$ ). Moreover, for the "Ecologic-seller", the greater the quantity of waste exchanged ( $q_x$ ), the greater the environmental improvement and hence the value of *iEI*. The advantage strategy degree is null for  $q_{A_l}^3$  strategy because  $q_x < w q_{A_l}$ , whilst  $q_{A_l}^4$  strategy takes a negative value. Then, for a fixed  $q_{A_l}$ , the "Ecologic-seller" preferences are  $q_{A_l}^2 > q_{A_l}^1 > q_{A_l}^4$ . Finally, the strategy that obtains a Nash equilibrium is  $q_x = r q_{A_i}$ , which implies the best utility for each agent.

Consequently, based on the characteristics and decisions of the individual agents, the system evolves.

### 5. Conclusions

The development of specific tools that attempt to understand the operation of EIPs may facilitate the transformation of traditional industrial areas towards EIPs. Following the general modelling process (Sterman, 2000; Izquierdo et al., 2008), this paper aims to contribute to the description of an analytical model that might favour the understanding of EIPs' operation.

The analytical model proposed in this paper is built upon the conceptual framework presented on Romero and Ruiz (2013). That previous paper was focussed on the first stage of the modelling process which sets out the conceptualisation of the real system and enunciation of the problem (Romero and Ruiz, 2013). The second stage, which is related to the design and formulation of the analytical model supported on a modelling method, is addressed on this paper. For this purpose two modelling paradigms were studied: SD and ABM. These methods differ strongly on the modelling approaches, units of analysis or formal expression, amongst other features. Nonetheless, both are feasible paradigms for EIP modelling, as the analysed contributions demonstrate (Zhao et al., 2008; Cao et al., 2009; Li and Wei, 2009; Qu et al., 2010). As a conclusion from the contribution analysis, the selection of the modelling method should be in line with the specific purpose of the study and the most relevant characteristics of the modelled system. Therefore, a detailed analysis of our model requirements is undertaken. Based on the conceptual framework, the representation of heterogeneous companies, through their properties and behaviours, becomes essential for the assessment of cooperative relationships. This bottom-up approach suggests the use of ABM method, which also enables the representation of system adaptation to internal and external changes. According to this analysis and based on the level of detail required in this stage of modelling, the ABM method is finally selected, although the use of hybrid models is suggested for future stages of model improvement and refinement. After choosing ABM as modelling paradigm, the formulation of the model is supported on the definition of its building blocks, as suggested by Barbati et al. (2012). These buildings blocks structure the detailed description of the model: (1) object of simulation, which is defined by five indexes to measure the system's evolution; (2) definition of structure of agents, which describes the agent's properties and behaviours; (3) population and actions of agents, that characterise three agent's categories and the action modes; (4) surrounding and adaptive ability, that explain the mechanism to adapt to external changes; and (5) interaction paradigm,

which describes in detail the cooperation action mode. Focussing on the last building block, the proposed model integrates a knowledge database, which is built by known substitutions from industrial symbiosis experiences, in order to identify the substitution opportunities and to evaluate the cooperative relationships. The formalisation of these cooperative relationships is supported by game theory, which favours the consideration of multiple strategies in the decision making process according to the preferences and individual objectives of each agent.

The analytical model developed in this paper is essential for advancement towards the final stages of the modelling process, model simulation, verification, validation and testing (Balci, 1998). These next stages require the selection of an adequate computational support, able to implement and simulate the analytical model that has been formulated. The empirical validation, which is decisive in agent-based modelling process (Windrum et al., 2007), should be supported on a real case of industrial symbiosis, as for example Kalundborg network. As a result, the model should be able to detect and build up the real exchange network, according to different scenarios. After this stage of verification, validation and testing, the computational model would be ready to analyse field data of industrial areas and evaluate their operation as an EIP, proposing the guidelines to support their conversion towards a more sustainable and cooperative industrial areas.

Appendix I

Table A1

Glossary.

Subindex	
$A_i$	Agent "i" of the model
EP	EIP where cooperative relationships are developed.
Coop.	Cooperative scenario
N-coop.	Noncooperative scenario
Properties	
Flow-related	
	First capital letter related to flow property
R	• Resource
W	• Waste
P	• Product
	Second lower case letter related to flow property
t	• Type of each flow
q	• Quantity of each flow
c	• Unit cost of each flow
Q	• Total quantity of a specific flow
	Resultant property
Ep	Economic benefit
Properties	
Agent category	
Tr	Trust level
Ef	Operation efficiency level
In	Innovation level
Coefficients	
$\alpha$ (alpha)	Coefficient of economic profit
$\beta$ (beta)	Coefficient of environmental impact
$\gamma$ (gamma)	Coefficient of strategic benefit
$\delta$ (delta)	Advantage decision degree
Indicators	
	First letter of the indicator
G	• Global, considers every company of the EIP to calculate the indicator
I	• Individual, considers one company of the EIP to calculate the indicator
	Combination of following acronyms of the indicator
EP	Economic profit
EI	Environmental impact
EW	Environmental impact, considering only waste impact
SB	Social benefit
Strategies	
$q_i$	Cooperative strategy
$F(q_i)$	Utility function that calculates the payoff of company decision based on each strategy

References

Albino V, Carbonara N, Gianroccaro I. Innovation in industrial districts: an agent-based simulation model. *Int J Prod Econ* 2006;104:30–45.

Balci O. Verification, validation and testing. In: Banks J, editor. *The handbook of simulation*. New York: John Wiley & Sons; 1998. p. 335–93.

Barbati M, Bruno G, Genovese A. Applications of agent-based models for optimization problems: a literature review. *Expert Syst Appl* 2012;39:6020–8.

Başar T, Olsder GJ. *Dynamic noncooperative game theory*. 2nd ed. New York: Siam; 1999.

Bilhari FG, Fent T, Prskawetz A, Scheffran J, editors. *Agent-based computational modelling: applications in demography, social, economic and environmental sciences (contributions to economics)*. Heidelberg: Physica-Verlag; 2006.

Bonabeau E. Agent-based modelling: methods and techniques for simulating human systems. *PNAS* 2002;99:7280–7.

Boons F. Self-organization and sustainability: the emergence of a regional industrial ecology. *Emergence: Complexity and Organization* 2008:10.

Borschev A, Filippov A. From system dynamics and discrete event to practical agent based modeling: reasons, techniques, tools. *Proceedings of the 22nd International Conference of the System Dynamics Society*; 2004. [Oxford, England July 25 to 29].

Cao K, Feng X, Wan H. Applying agent-based modeling to the evolution of eco-industrial systems. *Ecol Econ* 2009;68:2888–76.

Centre of Excellence in Cleaner Production. *Regional resource synergies for sustainable development in heavy industrial areas: an overview of opportunities and experiences*. Perth: Curtin University of Technology; 2007.

Chertow MR. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annu Rev Energy Environ* 2000;25:13–37.

Chertow MR. Industrial symbiosis. *Encycl Energy* 2004;3:407–15.

Chertow MR, Ehrenfeld J. Organizing self-organizing systems: toward a theory of industrial symbiosis. *J Ind Ecol* 2012;16:13–27.

Chew IML, Tan RR, Foo DCY, Chiu ASF. Game theory approach to the analysis of inter-plant water integration in an eco-industrial park. *J Clean Prod* 2009;17:1611–9.

Dixit A, Skeath S. *Games of strategy*. New York: WW Norton and Company; 1999.

Fiksel J. Designing resilient, sustainable systems. *Environ Sci Technol* 2003;37:5330–9.

Fiksel J. Sustainability and resilience: toward a systems approach. *Sustain Sci Pract Policy* 2006;2:14–21.

Forrester J. Industrial dynamics: a major breakthrough for decision makers. *Harvard Business Review* 1958;36:37–66.

Forrester J. *Industrial dynamics*. Cambridge, MA: MIT Press; 1961.

Gibbs D, Deutz P. Implementing industrial ecology? Planning for eco-industrial parks in the USA. *Geoforum* 2005;36:452–64.

Gibbs D, Deutz P. Reflections on implementing industrial ecology through eco-industrial park development. *J Clean Prod* 2007;15:1683–93.

Graedel TE, Allenby BR. *Industrial ecology*. 2nd ed. New Jersey, USA: AT&T Pearson Education, Inc; 2003.

Grimes Casey HG, Steger TP, Theis TL, Powers SE. A game theory framework for cooperative management of refillable and disposable bottle lifecycles. *J Clean Prod* 2007;15:1618–27.

Izquierdo LR, Galán JM, Santos JL, del Olmo R. Modelado de sistemas complejos mediante la simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. [Complex systems modelling through agent based simulation and systems dynamics]. *Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales* 2008;16:85–112.

Korhonen J. Industrial ecology in the strategic sustainable development model strategic applications of industrial ecology. *J Clean Prod* 2007;12:809–23.

Lambert AJD, Boons FA. Eco-industrial parks: stimulating sustainable development in mixed industrial parks. *Technovation* 2002;22:471–84.

Lättilä I, Hilletoft P, Lin B. Hybrid simulation models—when, why, how? *Expert Syst Appl* 2010;37:7969–75.

Li J, Wei Z. The MAS-based information model of eco-industrial system. *Proceedings of IEEE 16th International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*; 2009. [Beijing, China October 21 to 23].

Lorenz T, Jost A. Towards an orientation framework in multi-paradigm modeling. Aligning purpose, object and methodology in system dynamics, agent-based modeling and discrete-event simulation. *Proceedings of the 24th International Conference of the System Dynamics Society*; 2006. [Nijmegen, The Netherlands July 23 to 27].

Lou HH, Kulkarni MA, Singh A, Huang YL. A game theory based approach for energy analysis of industrial ecosystem under uncertainty. *Clean Techn Environ Policy* 2004;6:156–61.

Lowe EA. Creating by-product resource exchanges: strategies for eco-industrial parks. *J Clean Prod* 1997;5:57–65.

Myerson RB. *Game theory: analysis of conflict*. Cambridge, MA, USA: Harvard University Press; 1991.

Qu Q, Qianand X, Wang J. A system dynamics model for the environment management of eco-industrial park. *Proceedings of the 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*; 2010. [Chengdu, China June 18 to 20].

Rademaekers K, Zaki SS, Smith M. Sustainable industry: going for growth & resource efficiency. european commission, enterprise and industry. ECORYS: The Netherlands; 2011.

Romero E, Ruiz MC. Framework for applying a complex adaptive system approach to model the operation of eco-industrial parks. *J Ind Ecol* 2013. <http://dx.doi.org/10.1111/jiec.12032>.

- Schieritz N, Milling PM. Modeling the forest and modeling the trees. A comparison of system dynamics and agent-based simulation. Proceedings of the 21st International Conference of the System Dynamics Society; 2003. [New York City, USA July 20 to 24].
- Scholl HJ. Agent based and system dynamics modeling: a call for cross study and joint research. Proceedings of the 34th Annual Hawaii International Conference on System Sciences; 2001. [Maui, Hawaii January 3 to 6].
- Sterman JD. Business dynamics: systems thinking modeling for a complex world. Boston, USA: Irwin McGraw-Hill; 2000.
- Swinerd C, McNaught KR. Design classes for hybrid simulations involving agent-based and system dynamics models. *Simul Model Pract Theory* 2012;25: 118–33.
- Wakeland WW, Galaher EJ, Macovsky LM, Aktipis CA. A comparison of system dynamics and agent-based simulation applied to the study of cellular receptor dynamics. In: Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences; 2004. [Big Island, Hawaii January 5 to 8].
- Weiss G. Multiagent systems, a modern approach to distributed artificial intelligence. Cambridge: MIT Press; 1999.
- Windrum P, Fagiolo G, Moneta A. Empirical validation of agent-based models: alternatives and protocols. *JASSS* 2007;10.
- Wooldridge M. An introduction to multiagent systems. Chichester, England: John Wiley & Sons LTD; 2002.
- Wooldridge M, Jennings NR. Intelligent agents: theory and practice. *Knowl Eng Rev* 1995;10:115–52.
- Zhao Y, Shang J, Chen C, Wu H. Simulation and evaluation on the eco-industrial system of Changchun economic and technological development zone, China. *Environ Monit Assess* 2008;139:339–49.

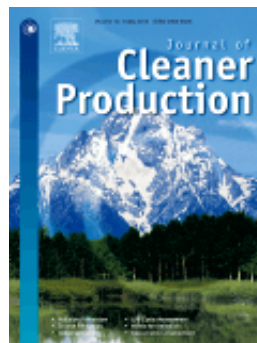


**ANEXO II.**  
**ARTÍCULO EN REVISIÓN**

---



## II.1. Analysis and validation of a computational agent-based model to convert industrial areas in eco-industrial systems



---

<b>Título</b>	<b>Analysis and Validation of a Computational Agent-Based Model to Convert Industrial Areas in Eco-Industrial Systems</b>
<b>Autores</b>	Elena Romero, M. Carmen Ruiz
<b>Revista</b>	Journal of Cleaner Production
	EN PROCESO DE REVISIÓN
<b>Índice de Impacto (JCR 2012)</b>	3.398
<b>Nombre del Área</b>	(1) ENVIRONMENTAL SCIENCES (2) ENVIRONMENTAL ENGINEERING
<b>Lugar que ocupa en el Área</b>	(1) Q1 (29/210) (2) Q1 (8/42)

---