

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

**UNIVERSIDAD DE CANTABRIA**



**Proyecto Fin de Máster**

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE RED DE  
SINERGIAS DE SIMBIOSIS INDUSTRIAL  
ANÁLOGA A UNA CADENA DE  
SUMINISTRO**

**(Industrial symbiosis network modeling and  
simulation analogous to a supply chain)**

Para acceder al Título de

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INVESTIGACIÓN EN  
INGENIERIA INDUSTRIAL**

**Autor: Eduardo Bayona Blanco  
Julio 2015**

<b>TÍTULO</b>	<b>MODELADO Y SIMULACIÓN DE RED DE SINERGIAS DE SIMBIOSIS INDUSTRIAL ANÁLOGA A UNA CADENA DE SUMINISTRO</b>		
<b>AUTOR</b>	<b>EDUARDO BAYONA BLANCO</b>		
<b>DIRECTOR / PONENTE</b>	<b>MARÍA DEL CARMEN RUIZ PUENTE</b>		
<b>TITULACIÓN</b>	<i>MÁSTER EN INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA INDUSTRIAL</i>	<b>FECHA</b>	JULIO 2015

## **PALABRAS CLAVE**

Ecología Industrial  
 Simbiosis Industrial  
 Sinergias  
 Analogía  
 Ciclo de Vida  
 Resiliencia

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

*El objetivo de este trabajo es diseñar una metodología para el modelado y la simulación de redes de sinergias en un complejo industrial siguiendo una estructura definida y extrapolable a cualquier caso. El modelado de la red se realiza a partir de la analogía existente entre una sinergia industrial y una cadena de suministro (analogía ISSC). Esta investigación utiliza el contexto de un estudio anterior del grupo de investigación INGEPRO [1] para crear una metodología adecuada para el diseño de una red de sinergias viable entre un conjunto de empresas de un área industrial. El proyecto citado identificó de forma preliminar las sinergias posibles entre grandes empresas situadas en un complejo industrial en la ciudad de Torrelavega, en el norte de España. El objetivo final perseguido por el método desarrollado es llegar a un modelo inicial de una red de sinergias industrial técnicamente factible y económicamente viable, estudiando su residencia ante diferentes escenarios de funcionamiento. La implantación de la red de sinergia en el sistema industrial garantizará por tanto un beneficio ambiental y social, logrando un desarrollo más sostenible de la actividad del complejo.*

## **DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO**

La Ecología Industrial (EI) es una nueva disciplina que examina las relaciones entre las empresas y el medio ambiente. Se trata de una visión sistémica en la que se busca optimizar el ciclo total de los materiales desde la extracción del material virgen hasta su desecho final [2]. La simbiosis industrial (SI) forma parte de este nuevo campo de estudio. Propone la implementación de sinergias que supongan un avance en términos de desarrollo sostenible, de manera que se garantice la coexistencia de un beneficio, no sólo económico, sino también social y medioambiental [3]. En experiencias anteriores la atención se centra principalmente en el ahorro y en el potencial económico de la implementación de las sinergias. Este trabajo aporta un enfoque de ciclo de vida en el análisis ambiental y económico que proporciona una información que debe ser cuantificada para valorar el diseño de la red.

En este trabajo se propone una analogía entre el concepto de cadena de suministro y de sinergia industrial para modelar una red de simbiosis industrial como una cadena de suministro, con la intención de ofrecer un nuevo enfoque al análisis de estrategias de SI (Analogía ISSC). Para ilustrar estas correspondencias se modela el funcionamiento de ambos casos y se compara ambos modelos para mostrar los comportamientos análogos. A partir de la analogía ISSC se desarrolla todo el análisis técnico-económico y ambiental de las sinergias y se realiza la implementación computacional de la red final.

Este proyecto parte de 26 sinergias identificadas de forma preliminar en grandes empresas industriales de procesado y fabricación, ubicadas en un complejo industrial en el norte de España. El análisis y la selección de las sinergias identificadas se lleva a cabo por

# Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>17</b>
<b>2. ANTECEDENTES/ESTADO DEL ARTE</b>	<b>21</b>
2.1. Ecología Industrial . . . . .	21
2.2. Simbiosis Industrial . . . . .	24
2.2.1. Experiencias Previas: Kalundborg . . . . .	26
2.2.2. Concepto de Sinergia en Simbiosis Industrial . . . . .	26
2.2.3. Sistema estudiado . . . . .	30
2.2.4. Flujos objeto de estudio . . . . .	31
2.2.5. Fases de Implantación de sinergias . . . . .	33
2.3. Cadena de Suministro . . . . .	36
2.3.1. Definición y Base Conceptual . . . . .	36
2.3.2. Estudio de la cadena de suministro . . . . .	37

2.4. Análisis del Ciclo de Vida . . . . .	38
2.4.1. Concepto y Base Teórica . . . . .	39
2.4.2. Orígenes . . . . .	40
2.4.3. Metodología del ACV . . . . .	41
2.4.4. Beneficios del ACV . . . . .	41
<b>3. ANALOGÍA SUPPLY CHAIN - SINERGIA DE SIMBIOSIS INDUSTRIAL</b>	<b>44</b>
3.1. Modelo del Concepto de Supply Chain . . . . .	45
3.2. Investigaciones y analogías del concepto de Supply Chain . . . . .	49
3.3. Modelo adaptado de Sinergia Industrial ( <i>ISSC-Industrial Sinergy Supply Chain</i> ) . . . . .	52
3.4. Aplicación del Modelo Adaptado de Sinergia Industrial (ISSC) . . . . .	58
<b>4. EVALUACIÓN Y SELECCIÓN PRELIMINAR DE SINERGIAS</b>	<b>60</b>
4.1. Factores y métodos de evaluación preliminar . . . . .	60
4.1.1. Análisis de factores y selección Preliminar Multicriterio de Sinergias	60
4.1.2. Viabilidad Económica de la Red de Sinergias . . . . .	72
4.1.3. Viabilidad Ambiental de la Red de Sinergias . . . . .	76

4.2. Análisis y selección preliminar técnica-económica y ambiental de sinergias	79
4.2.1. Análisis cualitativo técnico . . . . .	79
4.2.2. Análisis Económico y Ambiental . . . . .	86
4.3. Resumen del análisis de viabilidad de las sinergias . . . . .	160
<b>5. IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL</b>	<b>161</b>
5.1. Implementación Computacional de la Red . . . . .	161
5.1.1. Modelado del sistema . . . . .	162
5.1.2. Herramientas de Simulación de Procesos y Cadena de Suministro	166
5.1.3. Características de la Herramienta . . . . .	167
5.2. Variables de Análisis del Rendimiento de una Cadena de Suministro . . .	169
5.3. Descripción de Variables de Simulación dentro del modelo ISSC . . . . .	173
5.4. Descripción gráfica del modelado y la simulación . . . . .	175
<b>6. RESILIENCIA EN REDES DE SIMBIOSIS INDUSTRIAL</b>	<b>179</b>
6.1. Resiliencia en Sistemas ecológicos . . . . .	180
6.2. Resiliencia en ecosistemas industriales . . . . .	180
6.3. Resiliencia en Cadenas de Suministro . . . . .	181
6.4. Resiliencia en redes de sinergias . . . . .	182

<b>7. EXPERIMENTOS</b>	<b>184</b>
7.1. Nomenclatura de los escenarios . . . . .	184
7.2. Escenario inicial de Funcionamiento ( $IS_0$ ) . . . . .	185
7.2.1. MM1. Proveedor Común de Materia SAP . . . . .	186
7.2.2. MM3. Gestión Conjunta de Residuos peligrosos . . . . .	187
7.2.3. MM4. Gestión común de Residuos No Peligrosos . . . . .	189
7.3. Descripción de los experimentos . . . . .	190
7.3.1. Experimento 1.1 ( $IS_{1,1}$ ) . . . . .	190
7.3.2. Experimento 1.2 ( $IS_{1,2}$ ) . . . . .	194
7.3.3. Experimento 2 ( $IS_2$ ) . . . . .	197
7.3.4. Experimento 3 ( $IS_3$ ) . . . . .	200
<b>8. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN</b>	<b>203</b>
8.1. ESCENARIO $IS_0$ . . . . .	203
8.2. EXPERIMENTO 1.1( $IS_{1,1}$ ) . . . . .	204
8.2.1. MM1. Proveedor Común de Materia SAP . . . . .	204
8.2.2. MM3. Gestión conjunta de residuos peligrosos . . . . .	206
8.2.3. MM4. Gestión Conjunta de Residuos No Peligrosos . . . . .	210

8.3. EXPERIMENTO 1.2 ( $IS_{1,2}$ ) . . . . .	214
8.3.1. MM1. Proveedor Común de Materia SAP . . . . .	214
8.3.2. MM3. Gestión conjunta de residuos peligrosos . . . . .	215
8.3.3. MM4. Gestión Conjunta de Residuos No Peligrosos . . . . .	217
8.4. EXPERIMENTO 2 ( $IS_2$ ) . . . . .	219
8.4.1. MM3. Gestión conjunta de residuos peligrosos . . . . .	219
8.4.2. MM4. Gestión Conjunta de Residuos No Peligrosos . . . . .	221
8.5. EXPERIMENTO 3 ( $IS_3$ ) . . . . .	223
<b>9. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS</b>	<b>225</b>
9.1. Conclusiones . . . . .	225
9.2. Líneas Futuras . . . . .	233
<b>10. ANEXOS</b>	<b>235</b>
10.1. Experimento 1.1 MM1 . . . . .	235
10.2. Experimento 1.1 MM3 . . . . .	237
10.3. Experimento 1.1 MM4 . . . . .	239
10.4. Experimento 1.2 MM1 . . . . .	241
10.5. Experimento 1.2 MM3 . . . . .	243

10.6. Experimento 1.2 MM4 . . . . .	245
10.7. Experimento 2 MM3 . . . . .	247
10.8. Experimento 2 MM4 . . . . .	249
10.9. Experimento 3 . . . . .	251
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>253</b>

# Indice de tablas

3.1. Relación de Entidades del modelo SCOR de Supply Chain simplificado y Sinergia de Simbiosis industrial . . . . .	54
3.2. Estructura del Modelo de las Sinergias Identificadas . . . . .	55
3.3. Estructura del Modelo de las Sinergias Identificadas . . . . .	59
4.1. Definición de los criterios de selección multicriterio . . . . .	65
4.2. Clasificación de las Clases de Estimación de Costes [46] . . . . .	72
4.3. Listado de Sinergias Identificadas . . . . .	82
4.4. Puntuaciones totales en análisis multicriterio . . . . .	83
4.5. Sinergias seleccionadas mediante análisis multicriterio . . . . .	85
4.6. Clasificación de las Clases de Estimación de Costes [46] . . . . .	86
4.7. Cantidades de flujo implicadas, costes iniciales y costes en escenario inicial y tras la aplicación de la sinergia MM1 [6] . . . . .	96

---

4.8. Distancias entre el complejo industrial y los diferentes proveedores de Materia SAP . . . . .	98
4.9. Cantidades de flujo implicadas, distancias entre compañías e impacto ambiental asociado en el caso de la sinergia MM1 para los escenarios iniciales y con implantación de sinergia . . . . .	104
4.10. Cálculo de Costes de Transporte por Viaje Según Escenario para la Sinergia MM2 [6] . . . . .	112
4.11. Cálculo de Costes Totales de Transporte de Flujos en Escenario Inicial y tras la Implantación de la Sinergia MM2 [6] . . . . .	113
4.12. Distancias entre el complejo industrial y los diferentes gestores de residuos peligrosos . . . . .	119
4.13. Cálculo de Costes de Transporte por Viaje Según Escenario para la Sinergia MM3 [6] . . . . .	122
4.14. Cálculo de Costes Totales de Transporte de Flujos en Escenario Inicial y con Sinergia MM3 [6] . . . . .	123
4.15. Impacto ambiental parcial y total de los procesos de transporte iniciales de la sinergia MM3 . . . . .	127
4.16. Impacto ambiental parcial y total de los procesos de transporte con transporte de la sinergia MM3 . . . . .	129
4.17. Distancias entre el complejo industrial y los diferentes gestores de residuos peligrosos . . . . .	133

---

4.18. Cálculo de Costes de Transporte por Viaje Según Escenario para la Sinergia MM4 [6] . . . . .	136
4.19. Cálculo de Costes Totales de Transporte de Flujos en Escenario Inicial y con Sinergia MM4 [6] . . . . .	137
4.20. Impacto ambiental parcial y total de los procesos de transporte iniciales de la sinergia MM4 . . . . .	140
4.21. Impacto ambiental parcial y total de los procesos de transporte con transporte de la sinergia MM4 . . . . .	142
4.22. Costes estimados en el escenario posterior a la implantación de la sinergia MA1 . . . . .	149
4.23. Costes estimados en el escenario posterior a la implantación de la sinergia MA2 . . . . .	154
4.24. Costes estimados en el escenario posterior a la implantación de la sinergia MA3 . . . . .	159
5.1. Modelo ISSC y SIMIO de las entidades de la red . . . . .	176
5.2. Modelo ISSC y SIMIO de las entidades de la red . . . . .	177
5.3. Modelo ISSC y SIMIO de las entidades de la red . . . . .	177
7.1. Valores de variables de estudio en $ISSC_0$ para la sinergia MM1 . . . . .	187
7.2. Precios por flujo para la sinergia MM1 . . . . .	187
7.3. Valores de variables de estudio en $ISSC_0$ para la sinergia MM3 . . . . .	188

---

7.4. Precios por flujo para la sinergia MM3 . . . . .	189
7.5. Valores de variables de estudio en ISSC <sub>0</sub> para la sinergia MM4 . . . . .	190
7.6. Precios por flujo para la sinergia MM4 . . . . .	190
7.7. Cantidades de flujo en experimento 1.1 para la sinergia MM3 . . . . .	193
7.8. Tabla de cantidades de flujo en experimento 1.1 para la sinergia MM4 . .	194
7.9. Tabla de cantidades de flujo en experimento 1.2 para la sinergia MM1 . .	196
7.10. Tabla de cantidades de flujo en experimento 1.2 para la sinergia MM3 . .	196
7.11. Tabla de cantidades de flujo en experimento 1.2 para la sinergia MM4 . .	197
7.12. Tabla de transportes de flujo en experimento 2 para la sinergia MM3 . .	199
7.13. Tabla de transportes de flujo en experimento 2 para la sinergia MM4 . .	200
7.14. Tabla de aumento de costes en Experimento 3 . . . . .	202
8.1. Tabla de transportes de flujo en experimento 2 para la sinergia MM3 . .	206
8.2. Tabla de transportes de flujo en experimento 2 para la sinergia MM3 . .	210
9.1. Resumen de las simulaciones de funcionamiento de la red de sinergias . .	232
10.1. Variables de salida de la simulación. Experimento 1.1 MM1 . . . . .	235
10.2. Variables de entrada de la simulación. Experimento 1.1 MM1 . . . . .	236

---

10.3. Variables de salida de la simulación. Experimento 1.1 MM3 . . . . .	237
10.4. Variables de entrada de la simulación. Experimento 1.1 MM3 . . . . .	238
10.5. Variables de salida de la simulación. Experimento 1.1 MM4 . . . . .	239
10.6. Variables de entrada de la simulación. Experimento 1.1 MM4 . . . . .	240
10.7. Variables de salida de la simulación. Experimento 1.2 MM1 . . . . .	241
10.8. Variables de entrada de la simulación. Experimento 1.2 MM1 . . . . .	242
10.9. Variables de salida de la simulación. Experimento 1.2 MM3 . . . . .	243
10.10. Variables de entrada de la simulación. Experimento 1.2 MM3 . . . . .	244
10.11. Variables de salida de la simulación. Experimento 1.2 MM4 . . . . .	245
10.12. Variables de entrada de la simulación. Experimento 1.2 MM4 . . . . .	246
10.13. Variables de salida de la simulación. Experimento 2 MM3 . . . . .	247
10.14. Variables de entrada de la simulación. Experimento 2 MM3 . . . . .	248
10.15. Variables de salida de la simulación. Experimento 2 MM4 . . . . .	249
10.16. Variables de entrada de la simulación. Experimento 2 MM4 . . . . .	250
10.17. Variables de salida de la simulación. Experimento 3 . . . . .	251
10.18. Variables de entrada de la simulación. Experimento 3 . . . . .	252

# Índice de figuras

2.1. Sinergias de Sustitución [6] . . . . .	28
2.2. Sinergias de Mutualidad [6] . . . . .	29
2.3. Sinergias de Génesis [6] . . . . .	30
2.4. Representación del comportamiento del sistema [7] . . . . .	31
2.5. Representación del Sistema y Flujos objetos de Estudio [7] . . . . .	31
2.6. Estructura del Proceso de Implantación de una Sinergia [7] . . . . .	33
2.7. Estructura básica de una cadena de suministro simple . . . . .	37
2.8. Visión General del Análisis de Ciclo de Vida de un Producto . . . . .	39
2.9. Fases de un ACV, de acuerdo con la serie de normas ISO 14040 [27] . . . . .	42
3.1. Modelo PFC para Cadena de Suministro . . . . .	46
3.2. Modelo CSC para Cadena de Suministro . . . . .	47
3.3. Modelo SCOR para Cadena de Suministro . . . . .	48

---

3.4. Modelo de Supply Chain . . . . .	48
3.5. Modelo de Sinergia Industrial . . . . .	53
4.1. Esquema de Operación con modelo ICCS . . . . .	61
4.2. Factores Condicionantes en la Implantación de Sinergias . . . . .	62
4.3. Comparativa gráfica de puntuaciones de las sinergias en análisis multicriterio	84
4.4. Representación gráfica de la sinergia MM1 [6] . . . . .	88
4.5. Estructura de flujo de caso inicial y final de la sinergia MM1 . . . . .	97
4.6. Árbol del ciclo de vida del flujo conjunto de materia SAP en escenario inicial de la sinergia MM1 . . . . .	100
4.7. Relación de pesos de cada proceso sobre el impacto ambiental en escenario inicial de la sinergia MM1 . . . . .	101
4.8. Árbol del ciclo de vida de la sinergia MM1 tras la implantación de la misma	101
4.9. Relación de pesos de cada proceso sobre el impacto ambiental en escenario de implantación de la sinergia MM1 . . . . .	102
4.10. Comparativa de impacto ambiental de los escenarios iniciales y tras im- plantación de sinergia para la sinergia MM1 . . . . .	103
4.11. Representación gráfica de la sinergia MM2 [6] . . . . .	105
4.12. Estructura de flujos de caso inicial y final de la sinergia MM2 . . . . .	114
4.13. Representación gráfica de la sinergia MM3 [6] . . . . .	115

4.14. Estructura de flujo de caso inicial y final de la sinergia MM3 . . . . .	124
4.15. Árbol del ciclo de vida del Flujo en escenario inicial de la sinergia MM3 .	125
4.16. Relación de pesos de cada proceso sobre el impacto ambiental en escenario inicial de la sinergia MM3 . . . . .	126
4.17. Árbol del ciclo de vida del Flujo de la sinergia MM3 tras la implantación de la misma . . . . .	128
4.18. Relación de pesos de cada proceso sobre el impacto ambiental en escenario de implantación de la sinergia MM3 . . . . .	129
4.19. Comparativa de impacto ambiental de los escenarios iniciales y tras im- plantación de sinergia para la sinergia MM3 . . . . .	130
4.20. Representación gráfica de la sinergia MM4 [6] . . . . .	131
4.21. Estructura de flujo de caso inicial y final de la sinergia MM4 . . . . .	138
4.22. Árbol del ciclo de vida del Flujo en escenario inicial de la sinergia MM4 .	139
4.23. Relación de pesos de cada proceso sobre el impacto ambiental en escenario inicial de la sinergia MM4 . . . . .	140
4.24. Árbol del ciclo de vida del Flujo de la sinergia MM4 tras la implantación de la misma . . . . .	142
4.25. Relación de pesos de cada proceso sobre el impacto ambiental en escenario de implantación de la sinergia MM4 . . . . .	143

---

4.26. Comparativa de impacto ambiental de los escenarios iniciales y tras im- plantación de sinergia para la sinergia MM4 . . . . .	143
4.27. Representación gráfica de la sinergia MA1 [6] . . . . .	144
4.28. Representación gráfica de la sinergia MA1 [6] . . . . .	150
4.29. Representación gráfica de la sinergia MA3 [6] . . . . .	155
5.1. Modelo basado en objeto . . . . .	163
5.2. Modelo basado en proceso . . . . .	165
5.3. Red de sinergias de simbiosis industrial implementada en SIMIO . . . . .	178
7.1. Modelo ISSC de sinergia MM1 . . . . .	186
7.2. Modelo ISSC de sinergia MM3 . . . . .	188
7.3. Modelo ISSC de sinergia MM4 . . . . .	189
8.1. Comparación de costes de compañías y conjunto del sistema en escenario <i>R</i> y <i>IS<sub>0</sub></i> . . . . .	204
8.2. Comparación de costes de compañías y Red de Sinergias (Experimento 1.1 – MM1) . . . . .	205
8.3. Evolución de Costes de Compañías y Red para Faltas de la Compañías (Experimento 1.1 – MM3) . . . . .	209

8.4. Evolución de Costes de Compañías y Red para Faltas de la Compañías (Experimento 1.1 – MM4) . . . . .	213
8.5. Evolución de Costes de Compañías y Red para Experimento 1.2 (Sinergia MM1) . . . . .	215
8.6. Evolución de Costes de Compañías y Red para Experimento 1.2 (Sinergia MM3) . . . . .	216
8.7. Evolución de Costes de Compañías y Red para Experimento 1.2 (Sinergia MM4) . . . . .	218
8.8. Evolución de Costes de Compañías y Red para Experimento 2 (Sinergia MM3) . . . . .	221
8.9. Evolución de Costes de Compañías y Red para Experimento 2 (Sinergia MM4) . . . . .	222
8.10. Evolución de Costes de Compañías y Red para Experimento 3 . . . . .	224

# Capítulo 1

## INTRODUCCIÓN

El concepto de desarrollo sostenible ha sido reconocido desde 1992 en la Conferencia Mundial del Medio Ambiente y el Desarrollo (ECO-92), durante la cual se establecieron las directrices ambientales, entre las que destacan: la adopción de los principios de desarrollo sostenible por parte de las naciones participantes, es decir, la adopción de políticas y estrategias de gestión que se centran en el equilibrio de la integridad ambiental, equidad social y la eficiencia económica [1].

El deterioro ambiental actual, resultado de la actividad industrial y de la explosión demográfica en los dos últimos siglos, pone a la sociedad actual en una situación en la que se deben replantear los procesos de producción bajo una óptica del máximo aprovechamiento de energía y recursos naturales. Así entonces, la sostenibilidad representa uno de los retos claves del siglo XXI [2]. Bajo esta premisa las empresas están llamadas a tener un funcionamiento eficiente y reducir su carga sobre el medio ambiente. En este escenario surge la Ecología Industrial (EI), que plantea el estudio de las empresas como sistemas productivos donde aspectos ambientales, económicos y tecnológicos se combinan con un ambiente urbano.

La actividad económica es ante todo un fenómeno físico de concentración, derroche y transformación de flujos materiales y la optimización de estos procesos se enfoca hacia la generación de lo que se conoce como Simbiosis Industrial (SI). Ésta es parte del nuevo campo de la Ecología Industrial y se da cuando las industrias de una región colaboran para utilizar los sub-productos de otras compañías o de una forma de compartir recursos [3]. Así, el desarrollo industrial sostenible (eco-industrial) es un concepto emergente que está siendo utilizado como un nuevo modelo industrial que puede integrar las tres dimensiones de sostenibilidad: social, económica y de medio ambiente.

La EI concierne principalmente al flujo de materiales y energía a través de sistemas a diferentes escalas; desde fábricas, pasando por naciones y hasta niveles globales. La SI se enfoca a los flujos a través de redes de negocios y otras organizaciones en economías local y regional como un medio de enfoque de desarrollo sostenible ecológico industrial. Involucra tradicionalmente industrias separadas en un enfoque colectivo como una ventaja competitiva implicando intercambio físico de materiales, energía, agua y/o subproductos. La clave para la SI son las posibilidades de colaboración entre compañías, denominadas sinergias, cuya implantación se va a ver favorecida por la proximidad geográfica [4]

Las organizaciones privadas se conectan entre sí de muchas formas diferentes. No hay ninguna empresa que pueda controlar todos los recursos necesarios para alcanzar el éxito. Los fabricantes necesitan las aportaciones de los proveedores y los productos necesitan consumidores. Las relaciones empresa-universidad para determinadas actividades de investigación y desarrollo son otra forma de cooperación. Las empresas conectadas geográficamente y ubicadas en áreas industriales u otras zonas donde se concentra la actividad empresarial, desarrollarán probablemente algún tipo de interacción formal o informal. Que ello se realice a través de la dirección del parque industrial, de asociaciones locales de fabricantes o de una cámara de comercio, depende de las infraestructuras locales existentes. En estos tipos de redes, la colaboración se establece, con frecuencia, sobre intereses locales, regionales o nacionales, como educación, empleo y reglamentos.

Más allá del aspecto conceptual, el desarrollo de algún tipo de marco sistemático es un elemento importante para promover y mantener la viabilidad de las actividades cooperativas en un proyecto de desarrollo eco-industrial. El trasfondo de este proyecto sugiere un cambio del sistema productivo, desde el actual comportamiento lineal, hacia economías circulares de cierre de ciclos, 'desviando productos y materiales que de otro modo serían destinados a su vertido, hacia usos productivos' [5].

Una perspectiva de ciclo de vida asegura un enfoque más amplio que no se limita sólo a los procesos que ocurren dentro de una instalación o planta, sino que tendrá en cuenta el conjunto completo de los impactos ambientales que se producen en cada etapa de desarrollo, y el uso industrial dado a cada uno de los materiales involucrados. Centrándose en el caso de la SI, el enfoque de ciclo de vida es útil en la evaluación de oportunidades para el desarrollo de la simbiosis y de posibles sinergias, cuando la situación del ciclo de vida de un producto hace que las corrientes residuales pueden ser consideradas útiles para otros usos dentro de la vida ciclo de otro producto.

El objetivo de este trabajo es diseñar una metodología para el análisis de viabilidad técnica, económica y medioambiental de redes de sinergias en un complejo industrial siguiendo una estructura definida y extrapolable a cualquier caso contemplable. Esta investigación utiliza el contexto de un estudio anterior de INGEPRO [6] para crear una metodología adecuada para el diseño de una red de sinergias factible entre un conjunto de empresas de un área industrial. El proyecto citado identificó preliminarmente las sinergias posibles entre grandes empresas de fabricación de la producción situadas en un complejo industrial en la ciudad de Torrelavega, en el norte de España. El diseño de la red se sustenta sobre un listado de las sinergias dentro de una zona industrial, identificadas en el estudio anterior de INGEPRO [6].

Basado en la estructura de fases realizada por Fernández et al. (2010) [7], este trabajo se centra en las etapas de selección de las sinergias técnicamente viables y el análisis

económico-ambiental de las alternativas. El objetivo final perseguido por el método desarrollado es llegar a un diseño inicial de una red de sinergias industrial técnicamente factible y económicamente viable que garantice a su vez un beneficio ambiental y social, logrando un desarrollo más sostenible de la actividad del complejo. A partir de esta metodología, se intenta simular los efectos y ventajas obtenidas, de forma deliberada y cuantificada, así como establecer una línea fija de trabajo que facilita la creación de una red de simbiosis industrial en un polígono industrial.

## Capítulo 2

# ANTECEDENTES/ESTADO DEL ARTE

### 2.1. Ecología Industrial

La actual crisis económica ha sido el detonante para que la industria considere esencial para su desarrollo la inversión en tecnologías ambientales como medio para la creación de “valor sostenible”, pensando en términos de ciclos de vida, integrando estrategias y sistemas de gestión y empezado a aceptar mayores responsabilidades globales compartiendo la satisfacción de necesidades entre las generaciones presentes y futuras. La inversión presente y futura debe incorporar la racionalidad ecológica para que el sistema productivo invierta decididamente en investigación, desarrollo e innovación para progresar hacia una industria basada en el conocimiento y en la lógica cíclica de los sistemas naturales.

Con un enfoque amplio y mirando al futuro, las tecnologías ambientales nuevas e innovadoras, en particular las que tienen un carácter integrador, son las que presentan un mayor potencial de creación de empleo presente y en un futuro inmediato. Aquí se

deben incluir no solamente las tecnologías de final de proceso que reducen las emisiones y residuos, sino que se incluyen las tecnologías de prevención en origen y las relacionadas con nuevos materiales y procesos de producción eficientes para el uso de los recursos y la energía, el conocimiento y gestión racional del medio y nuevos métodos de trabajo, conjuntamente con técnicas de adaptación y promoción de modos de producción y consumo sostenibles. En gran medida, las tecnologías ambientales integradoras son soluciones doblemente positivas, que permiten a la vez lograr objetivos ambientales y una mejora del rendimiento económico. En este sentido, destacan las tecnologías de la información y comunicación que pueden presentar ventajas ambientales por sus efectos catalizadores para disociar las presiones ambientales del desarrollo económico y permitir que nuestras economías sean menos intensivas en materia, energía y emisiones de carbono introduciendo procesos “inteligentes” en modos de producción y de comportamiento social .

La Ecología Industrial (EI) es una nueva disciplina que examina las relaciones entre las empresas y el medio ambiente. El concepto de ecosistema industrial fue objeto de una gran atención, en 1989, a partir de un artículo publicado en *Scientific American*. En él, los investigadores de la General Motors sugerían que los días en que se encontraban ‘espacios abiertos, fuera de las ciudades’, para depositar los subproductos industriales, estaban tocando a su fin, y se necesitaban nuevos modos de pensar sobre los residuos y la contaminación [8]. Desde entonces, el concepto de EI ha suscitado una cantidad creciente de trabajos de investigación, discusiones y aplicaciones reales. En su forma más elemental, la EI presenta un sistema en el que los residuos de una empresa (*outputs*) se convierten en la materia prima de otra (*inputs*). En este “ciclo cerrado” se desechan menos materiales [9].

Se analizan los flujos de recursos naturales desde la extracción hasta la fabricación, el uso del producto, su reutilización y regreso al medio ambiente; de esta forma se analiza el efecto combinado de todos estos pasos en el medio ambiente [10]. Si los materiales residuales son reciclados a través de los sistemas industriales como lo son en los ecosistemas

naturales, a continuación, estos subproductos de un proceso se convierten en la materia prima de otro y el concepto de residuo dejaría de existir.

La EI intenta asimilar el funcionamiento de los ecosistemas industriales al de los naturales, con una interrelación entre industrias, el medio social y natural que tienda a cerrar el ciclo de materia y a hacer eficientes los procesos internos. Es actualmente una de las maneras con las que la industria puede contribuir al desarrollo sostenible, puesto que incluye las vertientes ambientales, económicas y sociales.

Esta disciplina tiende a cerrar el ciclo de materia y, por lo tanto, obtener un nivel cero de residuos. Esto lo consigue en parte usando los subproductos y residuos de una industria como materia prima de otras, como sucede en los ecosistemas naturales; y por otra parte, mejorando la imagen ambiental de las empresas, entidades y municipios y aumentando la relación y colaboración dentro del sector industrial y a su vez del sector industrial con el medio social y natural. El intercambio de recursos entre las empresas industriales proporciona una serie de ventajas que se indican a continuación:

- Reducción del coste de la gestión de residuos para las empresas: los residuos de las empresas se convierten en recursos para otras.
- Importante minimización en la producción de residuos de las empresas pertenecientes a los proyectos de colaboración.
- Reducción del coste de materias primas y/o combustibles, al valorizarse residuos que en general han de resultar más económicos.

Tal y como describen Gaedel y Allenby [11], la EI “es una visión sistémica en la que se busca optimizar el ciclo total de los materiales desde la extracción del material virgen, pasando por el material terminado, el componente, el producto final, la obsolescencia del producto y su desecho final”. Una perspectiva de ciclo de vida asegurará un enfoque más

amplio que no se limite sólo a los procesos que ocurren dentro de una instalación o una fábrica, sino que considere el conjunto completo de los impactos medioambientales que producen cada una de las etapas del desarrollo, y el uso industrial que se da a cada uno de los materiales implicados.

En los últimos años, la EI se ha convertido en una guía para crear oportunidades de implantación de negocios ambientales, y para reestructurar el sistema industrial con conceptos de sostenibilidad.

## 2.2. Simbiosis Industrial

La EI, trabaja principalmente con los flujos de materiales y energía existentes a través de diferentes sistemas y a diferentes escalas, englobando desde los productos terminados a las fábricas que les producen, alcanzando niveles regionales, nacionales e incluso mundiales [3].

De manera más particular, la Simbiosis Industrial (SI) se centra en estos flujos a través de redes de empresas y otras organizaciones dentro de la economía local y regional como un medio para enfocar el desarrollo industrial desde un punto de vista ecológicamente sostenible. La SI involucra sectores tradicionalmente separados dada su diferente actividad, dentro de un enfoque de colectividad que aporta una ventaja competitiva a través de un intercambio físico de materiales, energía, agua y/o subproductos. La clave de la SI está en la colaboración y en las posibilidades sinérgicas que ofrece la proximidad geográfica de las entidades implicadas [4].

El término SI fue acuñado en el pequeño municipio de Kalundborg, Dinamarca, donde de manera espontánea, había surgido una densa red de interacciones entre los entes que formaban el parque industrial de la localidad. Los principales socios que participaban en

Kalundborg incluían una refinería de petróleo, una central eléctrica, un centro de placas de yeso y una compañía farmacéutica [12]. Entre ellos se compartían los flujos de aguas subterráneas, aguas residuales, vapor y combustible, así como se intercambiaban una variedad de subproductos, que servían de materia prima para otros procesos dentro de la red. A través de estas relaciones, se han llegado a alcanzar altos niveles de eficiencia ambiental y económica, lo que deriva en muchos otros beneficios menos tangibles que afectan al personal, el equipo y el intercambio de información. Existen muchos otros ejemplos de SI a lo largo de todo el mundo con los que se puede comprobar de primera mano la esencia del concepto de SI, así como ilustrar el funcionamiento de las redes de intercambio [13].

Sobre la base de la EI, la SI incorpora muchos elementos que hacen hincapié en la idea de completar los ciclos dentro del proceso industrial y la reutilización de materiales desde una perspectiva muy amplia del concepto de sistema. Entre estos elementos implicados en la SI se encuentran los materiales y la energía implicados en el proceso productivo. Para la creación de un producto, se utilizan gran variedad de recursos para la extracción de materiales, transporte, fabricación primaria y secundaria, así como para su distribución. El total de la energía y materiales utilizados es la cantidad que se considera incorporada en el producto. La reutilización de los subproductos provenientes de la producción dentro del concepto de SI, conserva esta energía y materiales incorporados en el producto durante un periodo más largo dentro de la idea de funcionamiento en ciclos que propone la EI.

En el caso de la SI, la perspectiva de ciclo de vida también es de gran utilidad a la hora de evaluar las oportunidades de simbiosis y de existencia de sinergias, donde la coyuntura del ciclo de vida de un producto hace que su subproducto pueda ser considerado útil para otro uso diferente dentro del ciclo de vida de otro producto.

Sobre estas premisas, la creación de redes de sinergias que se puedan implementar a partir de los conocimientos teóricos sobre el tema y simular comportamientos, como

los conseguidos en casos como el de Kalundborg inicialmente y de manera espontánea, u otros realizados de manera intencionada como es el caso de Ulsan [14] se convierte en una necesidad para conseguir comportamientos y actividades industriales sostenibles capaces de mantener el desarrollo económico consiguiendo asimismo un equilibrio medioambiental y social.

### **2.2.1. Experiencias Previas: Kalundborg**

La muestra más evidente del concepto de SI son los llamados ecoparques industriales. El ejemplo de éxito más antiguo es el de Kalundborg citado previamente, una pequeña ciudad danesa de apenas 20.000 habitantes cerca de Copenhague, en la que desde los años setenta se ha venido desarrollando un importante complejo de SI promovido por la propia motivación de las empresas y con la firme colaboración de las instituciones públicas.

El sistema está constituido por una central eléctrica, una refinería, una planta de ácido sulfúrico y otra farmacéutica, una industria de paneles de cartón yeso, una planta de biomasa, varias granjas acuícolas, porcinas y de cultivo, y la propia ciudad de Kalundborg. El funcionamiento de este complejo industrial se asemeja al de una cadena trópica dentro de un ecosistema [12].

### **2.2.2. Concepto de Sinergia en Simbiosis Industrial**

La SI propone la implementación de sinergias que supongan un avance en términos de desarrollo sostenible, de manera que se garantice la coexistencia de un beneficio, no sólo económico, sino también social y medioambiental. En experiencias anteriores de estudio y diseño de redes de SI, la atención se centra principalmente en el ahorro y en el potencial económico de la implementación de las sinergias. Manteniendo la necesidad de convertir

el proceso de diseño de una red de SI en rentable, un enfoque de ciclo de vida en el análisis ambiental y económico proporciona una información que debe ser cuantificada para valorar el diseño de la red.

La naturaleza de estas innovadoras redes industriales se apoya en el concepto de sinergia. Según la Real Academia de la Lengua Española, sinergia significa la mejora obtenida a través de una asociación entre dos o más empresas que buscan un beneficio mayor que el obtenido individualmente. Esta asociación se ve favorecida por la proximidad geográfica entre los miembros que participan en la sinergia [15].

En el contexto de la SI y de la definición de sinergia, se establece que la relación de colaboración entre las empresas debe estar orientado a su vez a reducir el impacto ambiental reduciendo el consumo de recursos naturales y la generación de residuos. Esta relación debe traer beneficios económicos o reducción de costes que aumente el interés de establecer la relación.

Existen proyectos como el de Outters [16] o la desarrollada en Ginebra por Massard y Erkman [17], donde las oportunidades de colaboración anteriores se clasifican en dos grandes grupos de actividades de mutualización y de sustitución. Se definen como los mecanismos de acción a través de los cuales se identifican las posibilidades sinérgicas entre las diferentes compañías dentro del sistema.

A partir de las experiencias previas y proyectos tales como el de Chertow, Ashton y Espinosa [18] se consideran tres oportunidades primarias de colaboración en el intercambio de recursos:

- Reutilización de subproductos
- Infraestructura compartida
- Provisión conjunta de servicios.

Asimismo cuando existe la posibilidad o necesidad de creación de una nueva actividad para apoyar las oportunidades de colaboración que surjan se propone la definición del concepto de actividad o sinergia de génesis [6].

### Sinergias de Sustitución

Integran todos aquellos intercambios de flujos físicos entre actividades del sistema. Lo que por una industria es visto como flujo residual, para otra puede suponer un abastecimiento de recursos para su proceso productivo mediante su reutilización. Este reaprovechamiento sustituye parte del flujo original entrante al sistema global por un flujo residual del propio sistema, con lo que disminuimos el consumo de requerimientos por parte del conjunto. Esta implementación de sinergias de sustitución fortalece el cierre de ciclos, aumentando la recirculación de los flujos dentro del sistema [7].

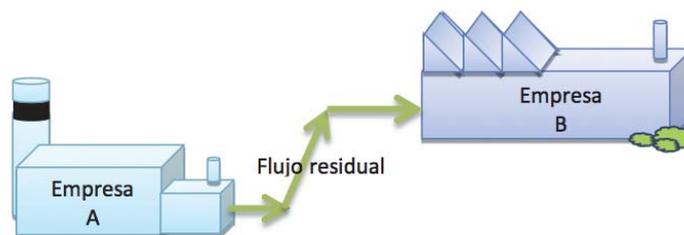
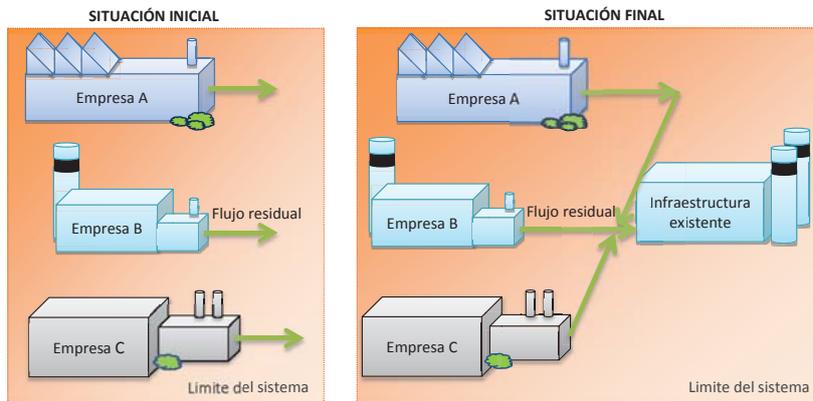


Figura 2.1: Sinergias de Sustitución [6]

### Sinergias de Mutualidad

Equivalentes a las oportunidades citadas anteriormente de infraestructura compartida y a la provisión conjunta de servicios. El concepto integra al conjunto de infraestructuras o servicios requeridos por las empresas del sistema cuyo uso pueda realizarse de manera conjunta, reduciendo la demanda de recursos. El flujo principal sobre el que actúan este

tipo de sinergias es el económico, no afectando tan directamente al físico. Al gestionar actividades conjuntamente, las industrias reducen los costes asociados a los flujos físicos, debido a las economías de escala y a un uso más eficiente de los recursos logísticos e infraestructurales principalmente. La reducción del flujo físico puede producirse debido a la implantación de nuevos equipos más eficientes para el suministro conjunto de un servicio a dos empresas que lo requieran [7].



**Figura 2.2:** Sinergias de Mutualidad [6]

### Sinergias de Génesis

Este tipo de sinergias permite la implementación de sinergias tanto de mutualización como de sustitución. Se basa en la creación de nuevas actividades o relocalización de las mismas dentro del sistema, debido a la existencia de importantes oportunidades de negocio en el área [6]. Estas ventajas relativas al traslado del establecimiento productivo, deben de compensar los gastos y riesgos asumidos por parte de las empresas al cambiar su ubicación espacial [19]. Las nuevas actividades sólo serán implantadas en el sistema si contribuyen a la mayor sostenibilidad del conjunto.

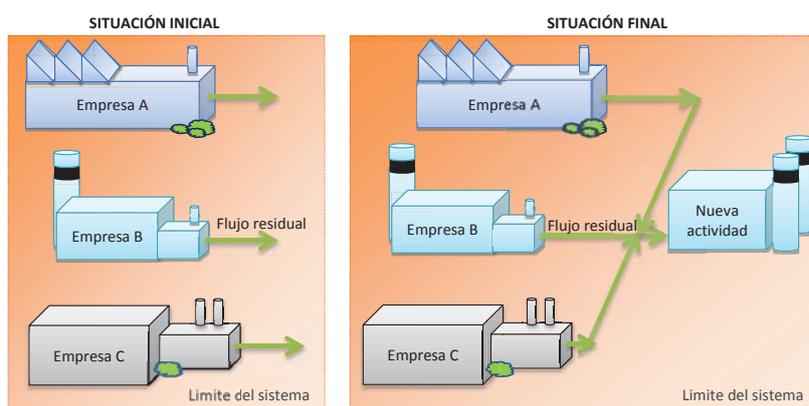


Figura 2.3: Sinergias de Génesis [6]

### 2.2.3. Sistema estudiado

El sistema de estudio planteado alberga únicamente a las actividades industriales de una área, con el fin de identificar oportunidades de negocio medioambientalmente favorables que no estén siendo explotadas. Sin embargo, en el caso de la reconocida SI establecida en Kalundborg, también se establecieron actividades sinérgicas entre la industria y la localidad con el mismo nombre, integrando los metabolismos urbano e industrial [20, 15]. Por lo tanto, se podría plantear la identificación de grandes focos de consumo de recursos o fuentes de contaminación que no pertenezcan al sector secundario, integrando dentro de los límites del sistema el conjunto de actividades humanas que afecten al planeta [11]. No obstante, se escoge el primer planteamiento debido a que la SI es un campo en constante evolución cuyo concepto y límites no están aún muy bien delimitados, siendo la industria su principal objeto de estudio. Y por otro lado, de acuerdo a los medios y herramientas de las que se disponen, el delimitar el sistema inicialmente en busca de oportunidades de negocio en el sector industrial, hace más factible el análisis [7].

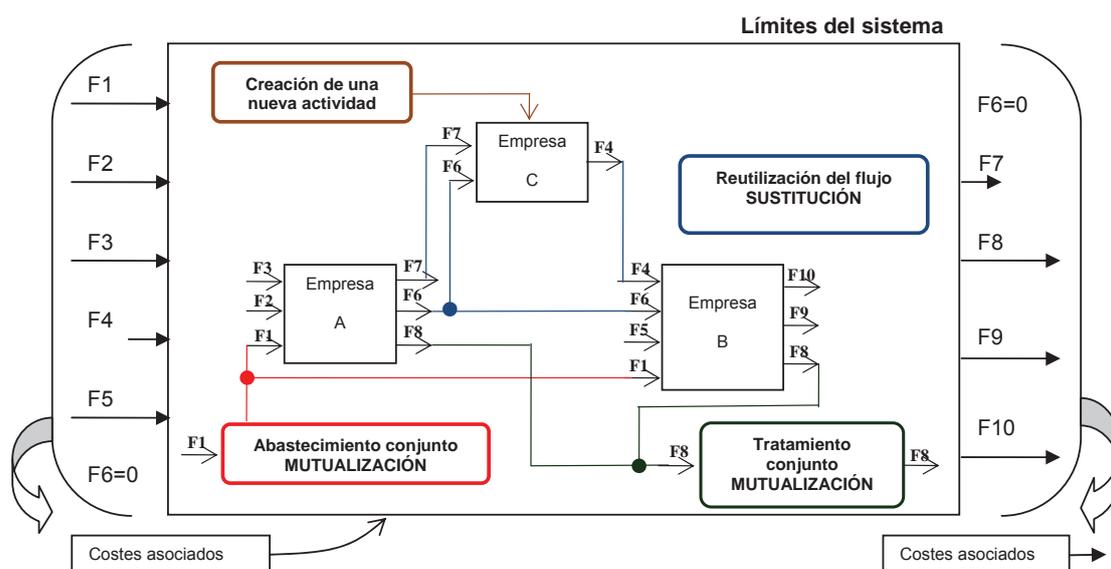


Figura 2.4: Representación del comportamiento del sistema [7]

### 2.2.4. Flujos objeto de estudio

A continuación se detallan los flujos entrantes y salientes de nuestro sistema de estudio sobre los que actúan las actividades de colaboración que se analizan en el proyecto (Figura 2.5).

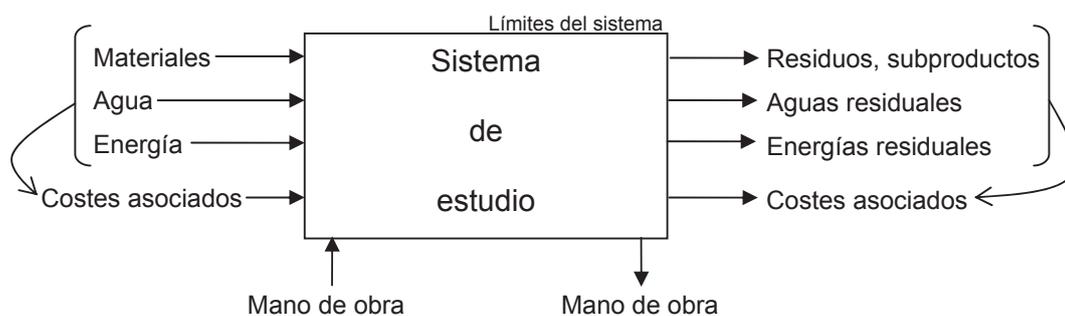


Figura 2.5: Representación del Sistema y Flujos objetos de Estudio [7]

Dentro del grupo de flujos estudiados se engloban todas las corrientes de abastecimiento necesarias para la implementación de las actividades industriales (materiales de producto y de proceso) y las corrientes residuales asociadas a la producción del producto

final [7]:

**Materiales:** En este flujo se integran todos los inputs necesarios entrantes al sistema de materias primas para el desarrollo de las actividades productivas de las empresas del estudio. Analizándolos tanto cuantitativa como cualitativamente. Como salida del sistema, este flujo integra los residuos y subproductos de cada entidad. La Directiva 98/2008/CE [21] define un residuo como “cualquier sustancia u objeto del cual su poseedor se desprenda o tenga la intención o la obligación de desprenderse”, e introduce conceptos como el de subproducto, con el fin de fomentar su reutilización como recursos. En el caso de la utilización de un residuo para la creación de una sinergia, el proceso debe cumplir con el marco legislativo actual.

**Agua:** Representa el consumo que de este recurso se realiza dentro de los límites de nuestro sistema por las diferentes empresas. Este flujo, además de ser cuantificado, se caracteriza de acuerdo a las calidades mínimas requeridas por parte de las diferentes empresas del sistema para su futura sustitución por aguas recirculadas. Asimismo también se consideran las aguas residuales vertidas por las empresas del sistema.

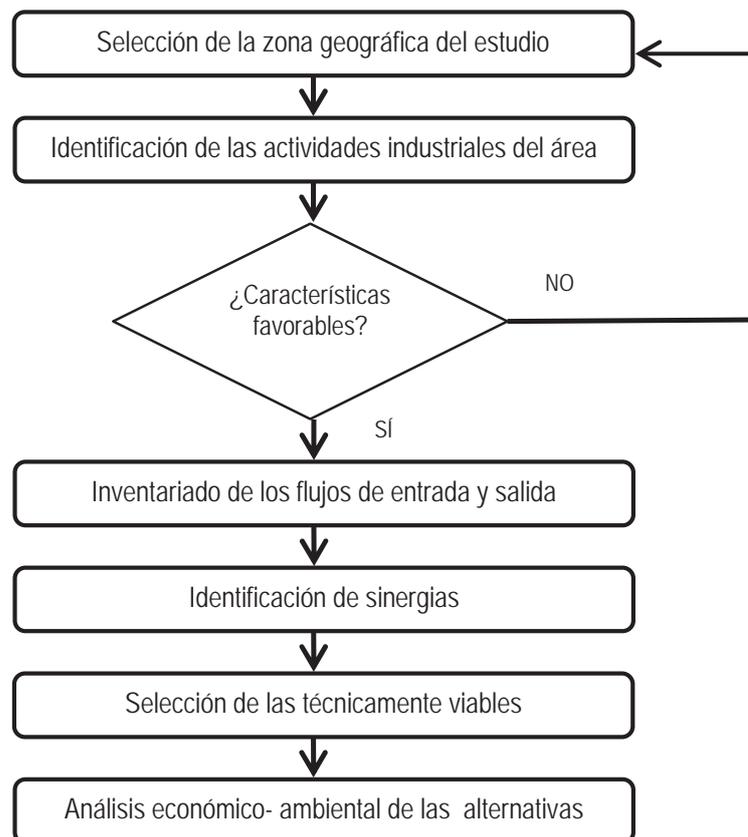
**Energía:** Este flujo caracteriza los consumos energéticos de las diferentes industrias del sistema. La energía entrante al sistema se denomina primaria, esto es, o en forma de energía eléctrica o combustibles fósiles, para posteriormente ser transformada mediante procesos de conversión energética en las formas de consumo final en el proceso productivo (neumática, térmica, mecánica, etc.). Estos consumos finales en el proceso son flujos intermedios, no entrantes al sistema. Pero es necesario caracterizar de esta manera las corrientes energéticas para poder identificar mayor número de actividades de colaboración entre las industrias. Parámetros a definir del flujo serán temperaturas, presiones, caudales, entalpías, tiempos de consumo, etc. También se consideran las energías residuales que

son energías no aprovechadas por los procesos industriales, vertidas a pesar de su valor energético.

### 2.2.5. Fases de Implantación de sinergias

El proceso de implantación de una sinergia industrial está estructurado en una fases definidas y desarrolladas [7]. La figura 2.6 esquematiza las etapas consecutivas de este proceso.

**Figura 3: Esquema de las etapas del método**



**Figura 2.6:** Estructura del Proceso de Implantación de una Sinergia [7]

### **Selección de la zona geográfica del estudio**

En general, la SI se produce entre empresas ubicadas local o regionalmente, dada la importancia de la proximidad geográfica. Como explica Chertow [4], al aumentar la distancia a recorrer por las corrientes para implementar las sinergias, el potencial del intercambio disminuye, debido a los costes derivados del transporte. La distancia máxima para que la sinergia siga siendo económicamente factible, dependerá de la naturaleza (cuantitativa y cualitativa) del flujo a ser intercambiado. Por lo tanto, queda establecida la relatividad del concepto escala espacial factible en la implementación de sinergias. En la elección de la escala geográfica para la creación de redes de SI se deben tener en cuenta numerosos factores, siendo la escala regional la unidad geográfica que mejor resultado global obtiene.

### **Identificación de las actividades industriales del área**

El siguiente paso a realizar es el de identificar las actividades industriales de la zona de estudio. La identificación no consiste únicamente en el listado de las diferentes razones sociales de las empresas implantadas en el área, sino que resulta interesante el clasificarlas según su código de actividad económica (CNAE) y obtener sus coordenadas espaciales.

### **Inventariado de los flujos objeto del estudio**

Durante la realización de esta etapa se realiza un inventario de los flujos de entrada y salida de las diferentes actividades industriales del sistema. La recolección de datos se debe realizar tanto cualitativa como cuantitativamente para las corrientes objeto del estudio.

### **Identificación de sinergias**

Esta fase identifica las diferentes posibilidades de sinergia a implementar entre las diferentes industrias del sistema. La identificación se realiza a partir de los flujos cuali-

tativos entrantes y salientes de las empresas. El desarrollo de herramientas y bases de datos para facilitar esta etapa del método es un factor importante a la hora de potenciar la creación de redes de SI.

### **Selección de las técnicamente viables**

Dentro de las diferentes posibilidades de sinergia identificadas en la etapa anterior del método, existe un grupo que no puede ser proyectado para su realización debido a su inviabilidad técnica. Atendiendo a la naturaleza de los flujos y a sus cantidades, las actividades de colaboración pueden tener asociados obstáculos técnicos. Factores tales como los geográficos, tecnologías inviables, cantidades de flujo insuficientes o propiedades de flujos no compatibles provocan que el intercambio no posea una viabilidad técnica adecuada.

### **Análisis económico-ambiental de las alternativas**

Como su propio nombre indica, esta última fase del método estudia económica y ambientalmente las diferentes sinergias técnicamente viables.

Por un lado, el estudio económico analiza el posible beneficio económico o ahorro de costes derivados de las diferentes actividades de colaboración. Éste debe tener en cuenta numerosos factores atendiendo a la naturaleza del intercambio (nuevos procesos, nueva infraestructura, etc.) si fuera necesario.

Por otro lado, el proyecto trata de buscar oportunidades de negocio solucionando problemas medioambientales. Tales como la reducción en el consumo de recursos y la disminución en la generación de contaminación por parte del conjunto de actividades del sistema. Las mejoras pueden ser medidas mediante sistemas de indicadores, o de una manera más analítica mediante el uso de herramientas de análisis del ciclo de vida.

Este proyecto se centra en la metodología utilizada para llevar a cabo las dos últi-

mas fases descritas: Análisis de viabilidad técnica y análisis económico-ambiental de las sinergias técnicamente viables.

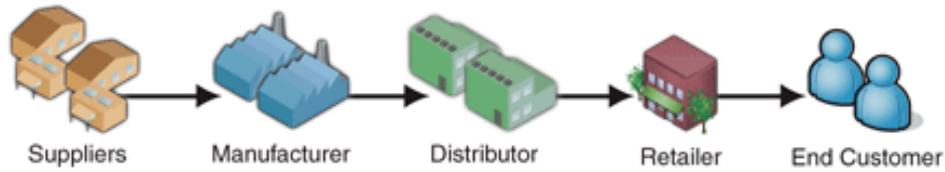
## 2.3. Cadena de Suministro

El término “Cadena de Suministro” (en inglés: *Supply Chain*) entró al dominio público cuando Keith Oliver, un consultor en Booz Allen Hamilton, lo usó en una entrevista para el Financial Times en 1982. Tardó en afianzarse y quedarse en el léxico utilizado en el entorno empresarial, pero a mediados de los 90 empezó a popularizarse, comenzando a aparecer gran cantidad de publicaciones sobre el tema y convirtiéndose en un término común pudiéndose encontrar incluso los nombres de los puestos de algunos funcionarios en administraciones de todo el mundo [22]

### 2.3.1. Definición y Base Conceptual

David Blanchard define a la cadena de suministro como: “La secuencia de eventos que cubren el ciclo de vida entero de un producto o servicio desde que es concebido hasta que es consumido” [23]. Una cadena de suministro está formada por todas aquellas partes involucradas de manera directa o indirecta en la satisfacción de la solicitud de un cliente. La cadena de suministro incluye no solamente al fabricante y al proveedor, sino también a los transportistas, almacenes, comerciales e incluso a los mismos clientes. Dentro de cada organización abarca todas las funciones que participan en la recepción y el cumplimiento de una petición del cliente. Estas funciones incluyen el desarrollo de nuevos productos, la mercadotecnia, las operaciones, la distribución, las finanzas y el servicio al cliente [24]

El Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP) también ofrece una



**Figura 2.7:** Estructura básica de una cadena de suministro simple

descripción del término en la misma línea. Considera que la Cadena de Suministro eslabona a muchas compañías, iniciando con materias primas no procesadas y terminando con el consumidor final utilizando los productos terminados. Todos los proveedores de bienes y servicios y todos los clientes están incluidos en la cadena como un eslabón al igual que los intercambios materiales e informáticos en el proceso logístico, desde la adquisición de materias primas hasta la entrega de productos terminados al usuario final.

El término Supply Chain no está limitada a empresas manufactureras, sino que se ha ampliado para incluir tanto “productos tangibles” como “servicios intangibles” que llegan al consumidor que requieren a su vez de productos y servicios externos [25]

### 2.3.2. Estudio de la cadena de suministro

La gestión de la cadena de suministro es un enfoque interdisciplinario que incluye; la gestión de la circulación de materias primas dentro una organización, la tramitación interna de los materiales en productos terminados, y el movimiento de productos terminados de la organización hacia el consumidor final. Las organizaciones centran sus esfuerzos en sus competencias básicas y en ser más flexibles, reduciendo su actividad sobre las fuentes de materias primas y los canales de distribución. Estas funciones son subcontratadas a otras empresas que puedan realizar las actividades mejor o más rentable. El efecto es el de aumentar el número de organizaciones involucradas en la satisfacción de la demanda de los clientes, al tiempo que reduce el control administrativo sobre las actividades

logísticas. Esta situación de variabilidad y necesidad de control de los *input* y *output* de una empresa, condujo a la creación del concepto de gestión de la cadena de suministro. El propósito de la gestión de la cadena de suministro es el de mejorar la confianza y la colaboración entre los socios de la cadena de suministro, mejorando así la gestión del inventario y la velocidad del movimiento de materias primas y producto terminado.

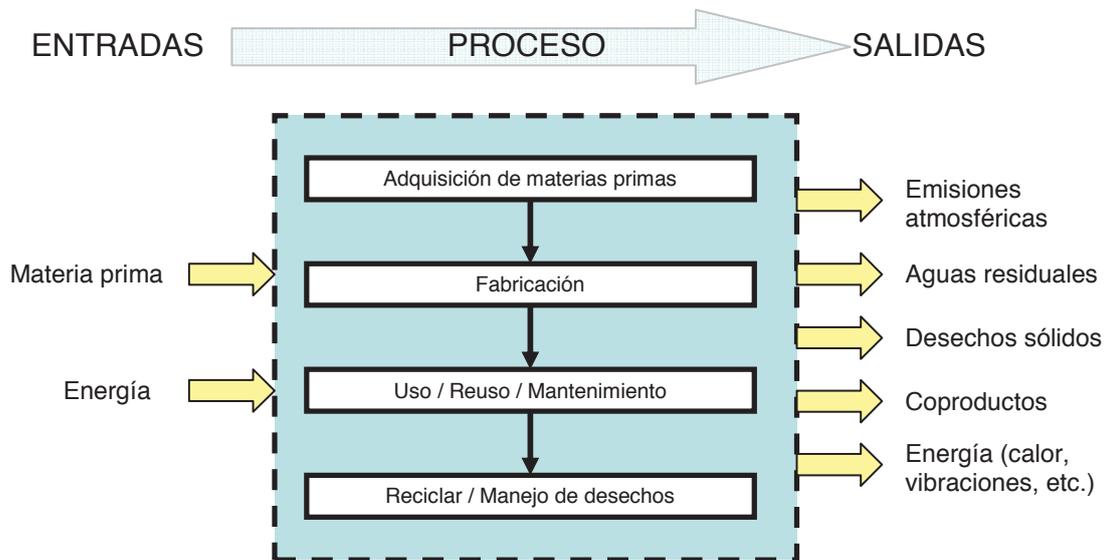
## 2.4. Análisis del Ciclo de Vida

En la actualidad, legar a las futuras generaciones un medio ambiente apto para la continuidad de la civilización se ha convertido en una de las principales preocupaciones de la humanidad. En el marco de la globalización de las economías no es posible estar al margen de esta preocupación. En estos días, los consumidores son más exigentes, tanto en la conservación de los recursos naturales y en la protección del medio ambiente, como en la calidad de los productos y servicios que reciben. Por tal motivo, la industria se enfrenta el reto de producir con alta calidad y satisfacer las expectativas de los consumidores y de otras partes interesadas en el tema de la protección del medio ambiente.

El impacto ambiental de un producto se inicia con la extracción de las materias primas y termina cuando la vida útil del producto finaliza, convirtiéndose en un residuo que ha de ser gestionado adecuadamente. Durante la fabricación, las empresas deben evaluar el impacto ambiental que tiene su proceso, además tienen la responsabilidad sobre el impacto que ocasionan las partes involucradas en el proceso hasta que el producto llega al cliente consumidor, (por ejemplo proveedores, distribuidores y consumidores). Esta cadena, que va ‘desde el nacimiento hasta la tumba’ es lo que se denomina ciclo de vida de un producto.

### 2.4.1. Concepto y Base Teórica

El análisis del ciclo de vida (ACV) de un producto es una metodología que intenta identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales potenciales, asociados a cada una de las etapas del ciclo de vida de un producto. Básicamente, se enfoca al rediseño de productos bajo el criterio de que los recursos energéticos y materias primas no son ilimitados y que, normalmente, se utilizan más rápido de como se reemplazan o como surgen nuevas alternativas. Por tal motivo, la conservación de recursos privilegia la reducción de la cantidad de residuos generados (a través del producto), pero ya que éstos se seguirán produciendo, el ACV plantea manejar los residuos en una forma sostenible (desde el punto de vista ambiental) minimizando todos los impactos asociados al sistema de gestión de los mismos [26]. La Figura 1 presenta un esquema que ilustra el concepto de ACV.



**Figura 2.8:** Visión General del Análisis de Ciclo de Vida de un Producto

La Organización Internacional para la Estandarización (ISO) es el organismo que ha desarrollado una serie de estándares enfocados a la Administración o Gestión Ambien-

tal. Estos estándares incluyen las series ISO-14040 sobre el ACV, que son de carácter voluntario. La norma ISO 14040:1997 [27] establece que “el ACV es una técnica para determinar los aspectos ambientales e impactos potenciales asociados con un producto, lo cual se efectúa recopilando un inventario de las entradas y salidas relevantes del sistema; evaluando los impactos ambientales potenciales asociados a esas entradas y salidas, e interpretando los resultados de las fases de inventario e impacto en relación con los objetivos del estudio”.

### 2.4.2. Orígenes

El desarrollo del ACV se originó casi simultáneamente en Estados Unidos y Europa. Si bien el primer ACV fue realizado en 1969 por el *Midwest Research Institute* (MRI) para la Coca-Cola, donde la premisa fundamental fue disminuir el consumo de recursos y, por lo tanto, disminuir la cantidad de emisiones al ambiente. Entre 1970 y 1974, la *Environmental Protection Agency* (EPA) realizó nueve estudios de envases para bebidas. Los resultados sugirieron no utilizar el ACV en cualquier estudio, especialmente para empresas pequeñas, ya que involucra costos altos, consume mucho tiempo e involucra el uso de recursos de mayor utilidad en otras áreas [28]. En Europa, estudios similares se realizaron en la década de los sesenta, pero fue a partir de los años ochenta cuando la aplicación del ACV se incrementó. En esta misma década fue cuando se desarrollaron dos cambios importantes: primero, los métodos para cuantificar el impacto del producto en distintas categorías de problemas ambientales (tal como el calentamiento global y agotamiento de los recursos); y segundo, los estudios de ACV comenzaron a estar disponibles para uso público.

La *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* (SETAC) es la principal organización que ha desarrollado y liderado las discusiones científicas acerca del ACV. En 1993, formuló el primer código internacional, Código de prácticas para el ACV (*Code of*

*Practice for Life Cycle Assessment*), con el fin de homogeneizar los diversos estudios realizados para que siguieran una misma metodología. Esto impulsó el inicio de desarrollos masivos de ACV en diversas áreas de interés mundial, pues se realizaron conferencias, talleres y políticas sobre ACV. Posteriormente, la ISO apoyó este desarrollo para establecer una estructura de trabajo, uniformizar métodos, procedimientos, y terminologías, debido a que cada vez se agregaban nuevas etapas, se creaban metodologías, índices, programas computacionales dedicados a realizar ACV en plantas industriales, etc.

### **2.4.3. Metodología del ACV**

La metodología considera una serie de fases de trabajo interrelacionadas, que siguen una secuencia más o menos definida. De acuerdo con la ISO 14040, el ACV consta de cuatro fases: definición de los objetivos y el alcance, análisis del inventario, evaluación del impacto e interpretación de resultados (Figura 2.9).

Las fases activas o dinámicas, en las que se recopilan y evalúan los datos, son la segunda y la tercera. Las fases primera y cuarta pueden considerarse como fases estáticas. A partir de los resultados de una fase pueden reconsiderarse las hipótesis de la fase anterior y reconducirla hacia el camino que ofrezca el nuevo conocimiento adquirido. El ACV es, por lo tanto, un proceso que se retroalimenta y se enriquece a medida que se realiza. En ocasiones es posible realizar un estudio no tan ambicioso obviando alguna fase del análisis según las necesidades.

### **2.4.4. Beneficios del ACV**

Las organizaciones consideran beneficioso conocer, con el mayor detalle posible, los efectos, aunque sean involuntarios, que sus productos, servicios o actividades podrían

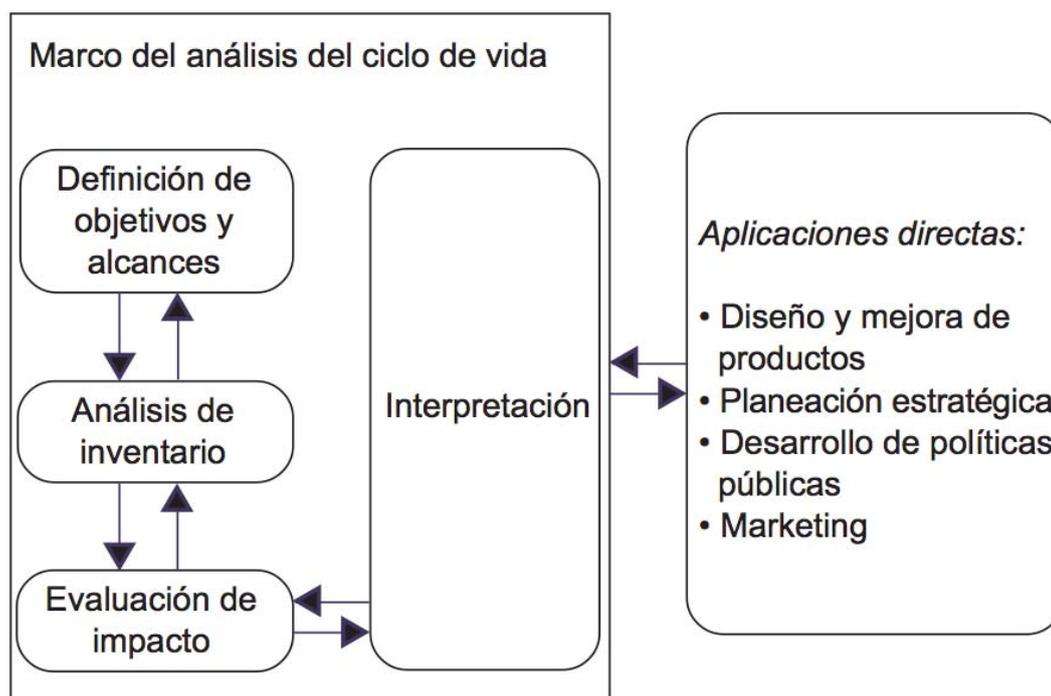


Figura 2.9: Fases de un ACV, de acuerdo con la serie de normas ISO 14040 [27]

causar en el medio ambiente; en especial, los que provoquen impactos ambientales significativos adversos, para atender a las responsabilidades legales, sociales y políticas que ellos implican, además de las pérdidas económicas y de imagen empresarial.

El ACV, realizado de acuerdo con los procedimientos estipulados en la serie de normas ISO 14040, es una herramienta de gestión ambiental que brinda una base sólida para que la dirección de una organización pueda tomar decisiones técnicas adecuadas con base en las cuestiones que podrían plantearse sobre el lanzamiento de un nuevo producto o la modificación de productos existentes, para hacerlos más eficientes en cuanto a su desempeño ambiental y que sigan realizando igualmente la función para la que fueron programados.

En el concepto de impacto ambiental del producto se encuadran temas tales como su

diseño, los procesos de fabricación, los medios de transporte, el tipo de energía necesaria en las distintas etapas de su ciclo de vida, las recomendaciones para su uso y la forma y el momento para su disposición final, si es que antes no se le recicla o reutiliza. En la medida en que, por la aplicación del ACV, se identifiquen oportunidades de mejora y se implementen efectivamente en el producto, también se habrá logrado una mejora en el desempeño ambiental de ese producto [29].

El ACV no sólo es un instrumento para proteger el medio ambiente y conservar los recursos naturales, sino una herramienta empresarial para reducir costos y mejorar posiciones en el mercado. El ACV puede ser una ayuda útil para reducir costes en la medida que el nuevo diseño y los nuevos procesos de fabricación, transporte y distribución, entre otros, promuevan una mayor eficiencia en la asignación y el empleo de materias primas, insumos y energía [30].

## Capítulo 3

# ANALOGÍA SUPPLY CHAIN - SINERGIAS DE SIMBIOSIS INDUSTRIAL

En este capítulo se presenta la analogía existente entre el concepto de cadena de suministro y el de sinergia industrial. Esta analogía consiste en la correspondencia de comportamientos que existen entre las partes de cada concepto. Para ilustrar estas correspondencias se modela el funcionamiento de ambos casos y se compara ambos modelos para mostrar los comportamientos análogos. El estudio de esta analogía ofrece un nuevo enfoque para la creación de estrategias de simbiosis industrial y persigue el objetivo de desarrollar una nueva metodología de estudio de viabilidad técnica de una sinergia. A su vez permitirá facilitar la implementación computacional de la red.

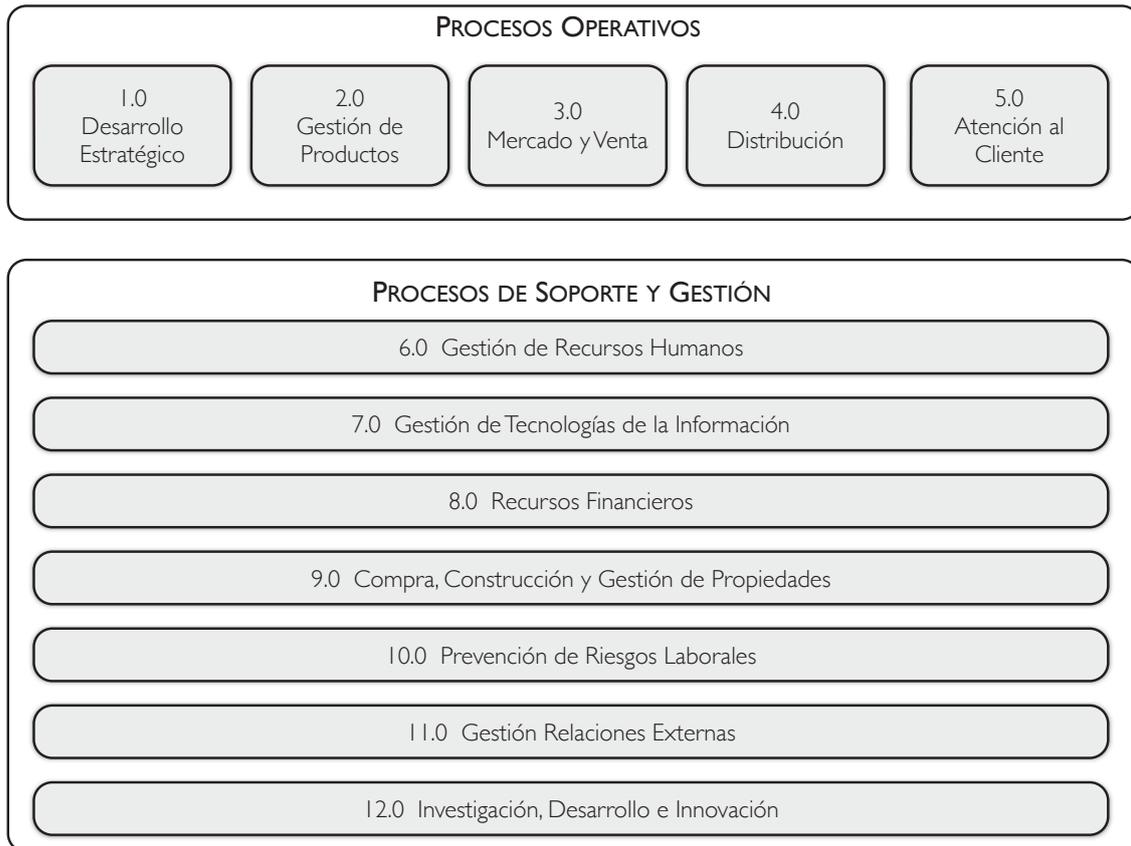
### 3.1. Modelo del Concepto de Supply Chain

Existe una amplia variedad de modelos asociados a la cadena de suministro, que se ocupan no sólo del conjunto de los elementos que la forman tradicionalmente (Proveedor, Producción, Distribución, Cliente) sino también de forma más particular de elementos aguas arriba y aguas abajo de los extremos de la cadena tradicional. El objetivo de estos modelos es describir el concepto de cadena de suministro utilizando un conjunto común de definiciones con una estructura determinada, de manera que cualquier industrial pueda describir cualquier cadena de suministro sea ésta simple o compleja. Asimismo, estos modelos proporcionan una base para la mejora de dichas cadenas a través de simulación y su análisis. A continuación se citan algunos ejemplos de modelos desarrollados y el objetivo perseguido.

El Global Supply Chain Forum ha introducido un modelo muy popular para el concepto de cadena de suministro [31]. Este marco se basa en ocho procesos críticos tanto para el funcionamiento de la compañía, como para el modelo de negocio de la misma. Los ocho procesos clave de negocio son: gestión de la relación con el cliente, gestión de atención al cliente, gestión de la demanda, realización de pedidos, gestión de flujo de fabricación, gestión de relaciones con los proveedores, desarrollo de productos y comercialización y de gestión de devoluciones [32]. Cada proceso es dirigido por un equipo multidisciplinar integrado por representantes de la logística, producción, compras, finanzas, marketing, investigación y desarrollo, y se divide en una serie de subprocesos estratégicos que terminan de definir el modelo de trabajo.

El *American Productivity and Quality Center Process Classification Framework* es un modelo de alto nivel para la gestión de la cadena de suministro [33]. Es un proceso empresarial que permite a las empresas ver sus procesos de negocio desde una perspectiva profesional. El *Process Classification Framework (PCF)* fue desarrollado por el *American Productivity and Quality Center (APQC)* y sus empresas asociadas como un estándar

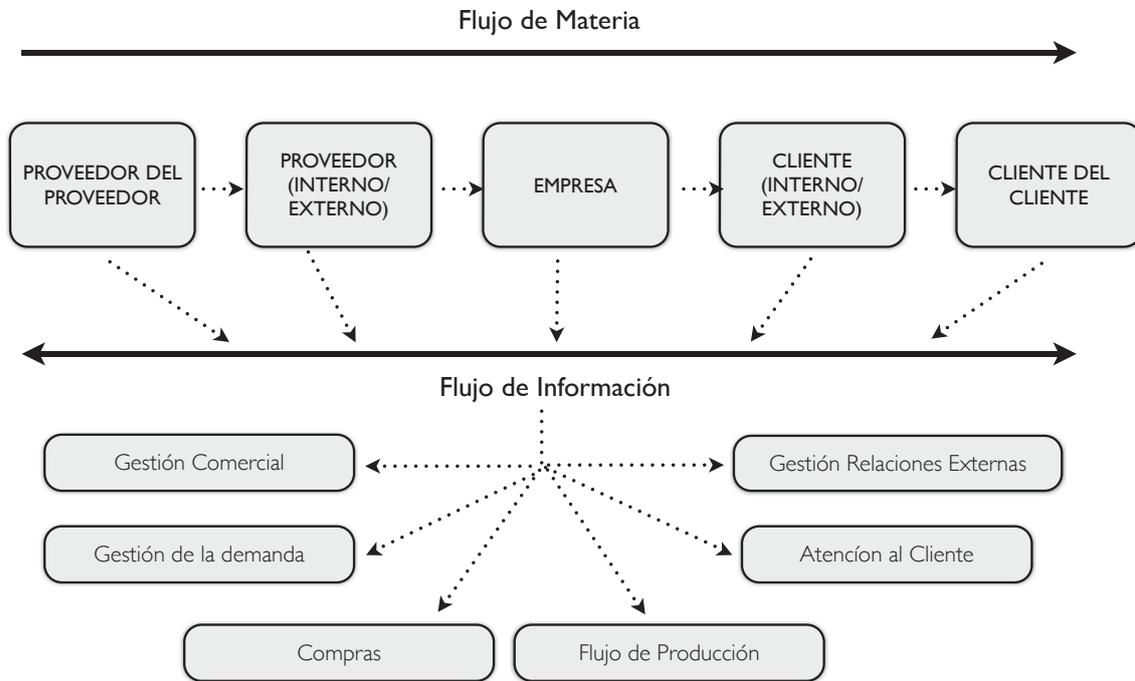
abierto para facilitar la mejora a través de la gestión de procesos y la evaluación comparativa, independientemente de la industria, el tamaño o la localización. El *PCF* organiza los procesos operativos y de gestión en doce categorías a nivel de empresa, incluyendo grupos de procesos y multitud de procesos y actividades asociadas.



**Figura 3.1:** Modelo PFC para Cadena de Suministro

El *Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP)* ofrece también una descripción del término en la misma línea que la de Blanchard [23] (incluida en el estado del arte). Considera que la cadena de suministro incluye muchas empresas, a partir de materias primas no procesadas y terminando con el consumidor final utilizando los productos terminados. Todos los proveedores de bienes y servicios y todos los clientes se incluyen en la cadena de enlace, al igual que los intercambios materiales e informáticos en

el proceso logístico, desde la adquisición de materias primas hasta la entrega de productos terminados al usuario final.



**Figura 3.2:** Modelo CSC para Cadena de Suministro

El modelo *SCOR* (*Supply-Chain Operations Reference*), ha sido desarrollado por la firma de consultoría *PRTM*, aprobado por el *Supply-Chain Council* (*SCC*) y se ha convertido en referencia para la gestión de la cadena de suministro. *SCOR* mide el rendimiento total de la cadena de suministro. Se trata de un modelo del proceso de gestión de la cadena de suministro, que abarca desde el proveedor del proveedor hasta el cliente del cliente tal y como muestra la figura 3.3 [34]. Incluye entrega y cumplimiento de pedidos, la flexibilidad de producción, garantía y devoluciones, costes de proceso de inventario y otros factores que sirven para evaluar el rendimiento global efectivo de una cadena de suministro.

En este trabajo, el modelo de cadena de suministro se ha simplificado a un subconjunto del modelo *SCOR* inicial (figura 3.4). Esta simplificación del modelo abarca desde la empresa proveedora hasta el cliente o destino del producto, omitiendo cualquier otro

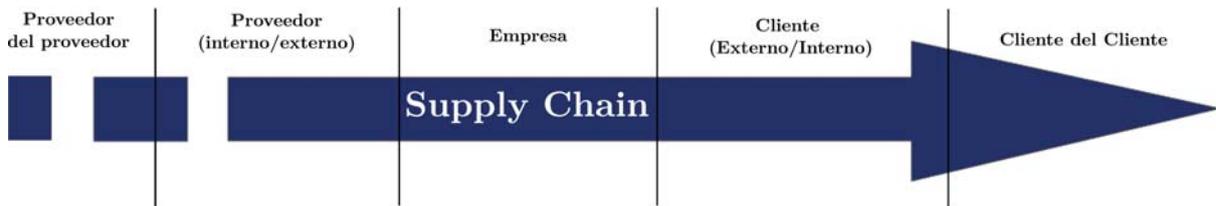


Figura 3.3: Modelo SCOR para Cadena de Suministro

elemento de la cadena.

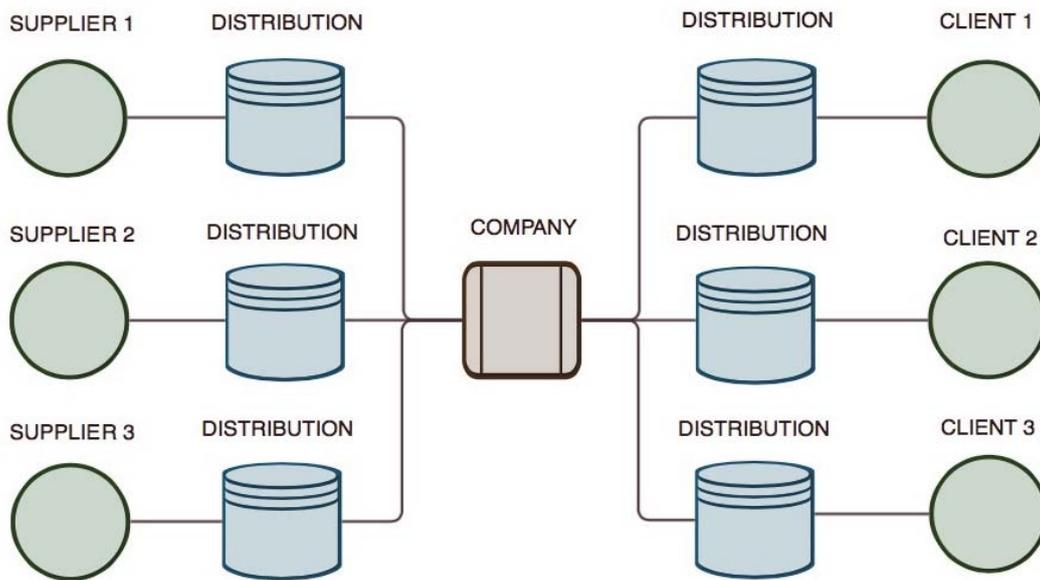


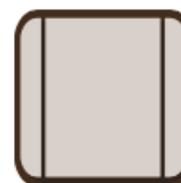
Figura 3.4: Modelo de Supply Chain

Consta de cuatro entidades clave ligadas entre ellas (Proveedor, Producción, Distribución y Cliente) y con una relación de dependencia. Se encuentra acotado entre el proveedor inicial de materias primas y el cliente final del producto primario ofrecido. En la figura 3.4, queda resumido la línea seguida por el flujo del producto, así como la naturaleza de las 4 entidades que se consideran.



El PROVEEDOR se considera una entidad de suministro de recursos para iniciar la transformación o proceso del producto que se pretende ofrecer.

La entidad de PRODUCCIÓN es la parte de la cadena donde se realiza el procesado de los recursos obtenidos de manera que a la salida de esta entidad la naturaleza de los recursos se ha modificado obteniendo el producto terminado que se ofrece para su consumo.

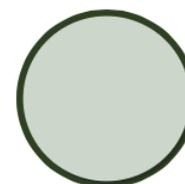


Pueden existir numerosos procesados del flujo hasta llegar al producto terminado, siendo todos ellos parte de la entidad de Producción como eslabón.



La DISTRIBUCIÓN no tiene una posición específica dentro de la cadena del modelo, aunque su posición natural se encuentra entre el producto terminado y el cliente que recibe el producto. Su función es la de unión entre el cliente y la propia compañía de producción, aunque podemos ampliar su definición a cualquiera de los otros eslabones, siendo la entidad que realiza la unión entre la compañía y el proveedor, entre cada una de las entidades de producción que puedan existir y básicamente entre cualquier movimiento del flujo o producto que se realice a lo largo de la cadena.

Por último, la entidad CLIENTE se refiere al sumidero de los productos de la compañía o eslabón final donde se produce la recepción del flujo del producto y se considera el final de la cadena de suministro.



## 3.2. Investigaciones y analogías del concepto de Supply Chain

El concepto de Supply Chain ha sugerido diversas analogías en otros campos. En este trabajo se destacan ciertos enfoques orientados en diferentes líneas como antecedente a la analogía entre Supply Chain y el concepto de sinergia de simbiosis industrial. En este

trabajo se presentan líneas de investigación en cadena de suministro con el objetivo de mejorar y facilitar la gestión de la misma por parte de las empresas, que son el antecedente de las investigaciones en analogías del concepto de Supply Chain.

Siguiendo el objetivo de mejora de su gestión, las líneas de investigación que se están siguiendo en cadena de suministro están enfocadas mayoritariamente a un ámbito local en el entorno de la compañía [35]. Graves et al. desarrollan el modelo de planificación de la cadena de suministro orientada a la demanda dinámica [36]. Baganha y Cohen desarrollan un modelo de cadena de suministro de fabricación/distribución de varios niveles, con el marco de decisión sobre cual analizar y comparar los cambios en el orden de suministro de la demanda en varios eslabones de la cadena del sistema [37]. Moon desarrolla un modelo para el diseño de la cadena de la red de suministro basado en la asignación de recursos [38]. Sin embargo, el desarrollo de productos complejos se ejecuta a través de un enfoque de ciclo de vida total de los productos que abarca el análisis de la demanda del cliente, el diseño de productos, la fabricación, montaje, distribución, logística, reservas, actualización, recuperación de desechos, así como otros procesos. Como resultado, Ge et al. proponen una estructura del sistema de cadena de suministro basado en el ciclo de vida total del producto complejo [35].

El desarrollo de un producto complejo se caracteriza por una alta personalización, la participación del cliente, altos costes y baja velocidad de producción. Recientemente se ha hecho necesario también aplicar a la gestión de las cadenas de suministros de este tipo de productos un enfoque de ciclo de vida. Este tipo de gestión de la cadena de suministro hace hincapié en la relación de coordinación entre las empresas en un proceso de integración progresiva [39]. Se trata de la coordinación de todos los eslabones de la cadena de suministro desde el abastecimiento de materia prima hasta la entrega al cliente, incluyendo la logística, el flujo de información y el flujo de capital, a fin de satisfacer mejor las demandas de los clientes con el menor coste y la mayor velocidad de producción.

A raíz de las investigaciones llevadas a cabo en materia de gestión de la cadena de suministro comienzan a surgir enfoques de modelos de gestión que relacionan el concepto de cadena de suministro con diferentes comportamientos observados en el mundo animal y en los ecosistemas mediante analogías que vinculan sus elementos y su modo de funcionamiento.

Para responder a la necesidad de una nueva forma de negocio que integre los sistemas económicos, biológicos y humanos, surge un nuevo enfoque a la hora de considerar el concepto de cadena de suministro. Li et al. [40] desarrollan un nuevo sistema de medición del desempeño estratégico (*Strategic performance measurement system* o SPMS) para las empresas a través de las cadenas de suministro y la demanda (*Supply and demand chains* o SDC) por analogía con la sucesión ecológica. La estructura de SDC en valor monetario desarrolla por analogía con la estructura de una comunidad en la naturaleza (cadena trófica). De la misma manera que el flujo de energía en la comunidad ecológica se rige por la primera y segunda ley de la termodinámica, el flujo de valor monetario en los negocios sigue dos leyes que son similares a las leyes de la termodinámica. En base a estas leyes, así como en la contabilidad y la gestión de costes tradicional, se propone un modelo de flujo de valor monetario general para el SDC.

Asimismo, Li et al. desarrollan en otra de sus investigaciones las dimensiones estructurales del *Service Supply Chain* (SSC) [41]. Sobre la base de la misma esencia de un sistema evolutivo complejo, demuestra la existencia de una analogía entre la SSC y la estructura de una comunidad ecológica, analizando la similitud entre las dimensiones estructurales ya existentes en la cadena/red de suministro de servicios (SSC) y la estructura de una comunidad. Para hacer frente a los defectos de las dimensiones estructurales existentes en la cadena de suministro aplicada a la SSC, el artículo desarrolla la estructura horizontal y la estructura vertical de SSC, por analogía con la riqueza de especies, abundancia relativa de las mismas, y el nivel trófico de una comunidad.

Zou y Yu publican un artículo donde se exponen las ideas centrales de la teoría sinérgica para construir un modelo de sistema basado en sinergias de cadena de suministro incluyendo un modelo de parámetros, de auto organización y un modelos dinámico de sinergias [42]. Estos tres modelos permiten trabajar para revelar el mecanismo de operación de la colaboración básica entre diferentes sistemas de cadena de suministro entre ellos. El propósito de este estudio es proporcionar una nueva perspectiva y un marco conceptual de pensamiento para las prácticas de gestión de cadenas de suministro, y proporcionar información básica para posteriores investigaciones teóricas sobre posibles aplicaciones de gestión de Supply Chain.

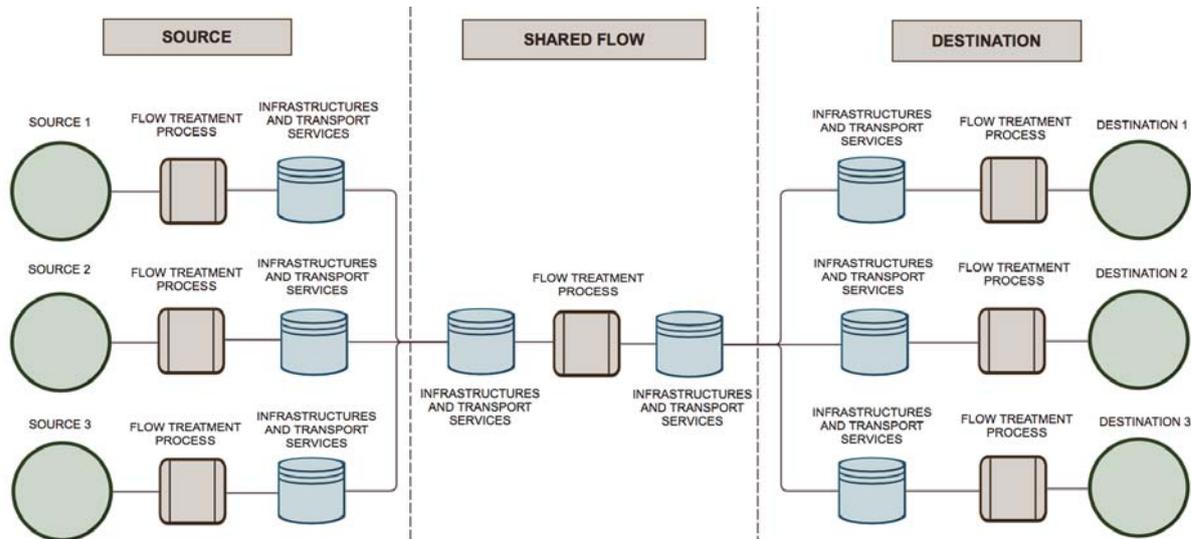
A partir de esta sucesión de ejemplos de investigaciones y analogías llevadas a cabo por diversos autores, se concluye que es adecuado el uso de la analogía entre el concepto de cadena de suministro y el de sinergia industrial para analizar el comportamiento de esta última, siempre que se especifique la relación que existirá entre ambos conceptos y el modelo extraído a partir de la analogía sea representativo del comportamiento real.

### **3.3. Modelo adaptado de Sinergia Industrial (ISSC- *Industrial Sinergy Supply Chain*)**

A partir del concepto de sinergia descrito en el Estado del Arte, en este trabajo se persigue modelar el comportamiento de una sinergia industrial. Para ello se diseña un modelo formado por las entidades implicadas en el funcionamiento de la sinergia desde el origen del flujo hasta el destino de dicho flujo.

La estructura del modelo incluye todos los casos posibles de sinergia que pueden darse, para que sea posible modelar cualquier tipo de sinergia que se presente. Se adapta la estructura que sigue el flujo de la sinergia a las entidades que forman el modelo,

utilizando aquellas que correspondan para su funcionamiento y omitiendo las que no sean necesarias. Por tanto se trata de un modelo totalmente flexible que abarca todo el concepto de sinergia, pero a la vez es robusto ya que mantiene una analogía sólida y directa con el modelo estudiado de cadena de suministro. (figura 3.5)



**Figura 3.5:** Modelo de Sinergia Industrial

Cada una de las entidades que lo conforman tienen identidad propia, y se refieren a alguna de las partes de la sinergia que se estudie en cada caso. Están a su vez directamente asociadas a las entidades consideradas en el modelo de cadena de suministro.

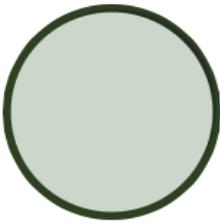
El modelo está dividido en tres zonas diferenciadas de competencias sobre el flujo de la sinergia. En las zonas de origen y destino, serán las compañías que ejerzan de proveedoras o de receptoras del flujo las que tengan responsabilidad sobre el transporte y procesamiento del mismo y por lo tanto las que asuman los costes de operación e inversión que se generen. En la zona de flujo compartido, el flujo no es competencia particular de ninguna de las empresas implicadas en la sinergia, sino que tanto la responsabilidad como la asunción de los costes asociados se comparte de manera proporcional.

**Tabla 3.1:** Relación de Entidades del modelo SCOR de Supply Chain simplificado y Sinergia de Simbiosis industrial

ENTIDAD	MODELO DE SUPPLY CHAIN	MODELO DE SINERGIA INDUSTRIAL
	Proveedor	Origen
	Producción	Proceso De Adaptación Del Flujo
	Distribución	Infraestructura Y Servicios Al Transporte
	Cliente	Destino

---

Tabla 3.2: Estructura del Modelo de las Sinergias Identificadas

ENTIDADES DEL MODELO DE SINERGIA INDUSTRIAL	
ORIGEN/DESTINO	
 <p>ORIGEN/DESTINO</p>	<p>Este elemento es considerado como la entidad de suministro o sumidero de un flujo dentro de una sinergia. Las entidades que pueden actuar como origen o destino de un flujo se corresponden con los siguientes agentes implicados en la creación de la sinergia:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Empresas suministradoras o receptoras del flujo correspondiente a la sinergia.</li> <li>· Gestores externos a la red de empresas que realicen labores de suministro o de gestión del flujo como residuo.</li> <li>· Actividades de nueva creación asociadas a la red de empresas que realicen labores de suministro o de gestión del flujo como residuo.</li> </ul> <p>Las entidades que actúan de esta manera son el límite de la sinergia como sistema con el exterior, considerando su acción como el <i>input</i> o el <i>output</i> de la sinergia considerada sin considerar su relación con el exterior.</p> <p>En el caso del estudio de una sinergia no será posible la existencia al mismo tiempo de varias entidades de origen y varias entidades de destino a la vez, ya que esto implicaría la existencia de dos sinergias desdobladas incluidas en una sola, por lo que solo es posible la existencia de varias entidades bien en origen, o bien en destino.</p> <p>Dentro de la sinergia, este elemento del modelo cuando actúa como ORIGEN de la misma mantiene una relación conceptual directa con un el Proveedor de una cadena de suministro. En ambos casos ambas entidades suministran un flujo de recursos o de productos que serán tratados posteriormente o directamente distribuidos a sus respectivos destinos.</p> <p>El funcionamiento de esta entidad como DESTINO en una sinergia industrial se corresponde con el cliente o receptor del producto terminado dentro del concepto de cadena de suministro. Realizan una labor de sumidero del producto final y es donde se cierra el flujo tras pasar por el resto de procesos que llevan hasta conseguir el producto terminado.</p>

<b>PROCESO DE ADAPTACIÓN DEL FLUJO</b>	
 <p><b>PROCESO DE ADAPTACIÓN DEL FLUJO</b></p>	<p>La naturaleza del flujo no es siempre constante, y existe la posibilidad de que sea necesario su procesado para la adecuación del mismo a las necesidades que se requieran en cada momento para la creación de la sinergia. Este proceso puede ser realizado en origen o en el destino, pero también puede realizarse el procesado durante la fase de flujo compartido.</p> <p>Las siguientes entidades que realizarán las labores de procesado del flujo bien durante la fase de flujo en origen o en destino o durante la fase de flujo compartido:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Las propias empresas que ejercen como origen y destino.</li> <li>· Gestores externos que realicen el procesado y devuelvan el flujo de nuevo con las condiciones deseadas.</li> <li>· Actividades de nueva creación por parte de las empresas implicadas en la sinergia.</li> <li>· Actividades creadas por terceras partes que realicen las labores necesarias en cada caso.</li> </ul> <p>En todos los casos la entrada y salida en el proceso mantiene la continuidad del flujo de la sinergia.</p> <p>Las labores de producción dentro de una cadena de suministro mantienen una analogía directa con los procesos de adecuación del flujo dentro de una sinergia industrial. Pueden ser una serie de sucesivos procesados hasta conseguir la naturaleza de flujo deseada, e incluso puede que no sean necesarios ya que el modelo en este caso represente una labor de distribución o reparto de un producto terminado.</p>

INFRAESTRUCTURA Y SERVICIOS AL TRANSPORTE	
 <p><b>INFRAESTRUCTURA Y SERVICIOS AL TRANSPORTE</b></p>	<p>Existen necesidades en materia de servicios y la instalación de infraestructuras para la implantación de una sinergia industrial y el transporte del flujo implicado desde el origen al destino final en una sinergia. El tránsito del flujo de un elemento a otro del recorrido del mismo se realizará a través de infraestructura de transporte para ese flujo, y a su vez será necesario realizar conexiones con dicha infraestructura para suministro y recepción del flujo. Estas labores asociadas al movimiento del flujo pueden ser realizadas de nuevo por diversas entidades:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>· Las propias empresas con infraestructura propia existente o de nueva creación que se adapten a las necesidades.</li> <li>· Agentes externos contratados para realizar las labores exigidas.</li> <li>· Actividades nuevas generadas por cada empresa de forma particular.</li> <li>· Actividades de nueva creación por terceras partes externas a la red de empresas.</li> </ul> <p>En todos los casos que exista un suministro o recepción de flujo, será necesaria la presencia de un elemento de esta naturaleza que realice el trabajo de conexión entre el medio de transporte del flujo y su entrada o salida en cada uno de las entidades implicadas en la sinergia.</p> <p>Las labores de distribución, no sólo del producto terminado hasta el cliente, sino de cualquier movimiento del flujo a lo largo de la cadena de suministro tienen su equivalencia en concepto con las infraestructuras y servicios al transporte consideradas en el modelo de sinergia. Se engloban todos los movimientos del flujo y los productos en una sola entidad, de manera que sea lo más simple pero también lo más versátil posible a la hora de establecer los parámetros que configuran su personalidad.</p>

### 3.4. Aplicación del Modelo Adaptado de Sinergia Industrial (ISSC)

Para comprender el planteamiento del modelo es importante abstraerse de la apariencia inicial. El esquema que se presenta en la figura 3.5 es un esquema general del que hay que desgranar cada una de las sinergias de manera individual. Cada una de las entidades que conformen la sinergia que se estudie cada vez, ha de identificarse con cada una de las partes que toman parte en su funcionamiento en la realidad. Por lo tanto si una sinergia de sustitución está formada por una entidad de origen y un solo destino, únicamente se utilizará una entidad de origen y otra de destino, con sus respectivas entidades de proceso e infraestructura de transporte a lo largo del flujo que definen dichas entidades, quedando inutilizadas el resto de entidades que se presentan en el modelo en ese caso por no participar en su funcionamiento.

A partir de este modelo inicial que cubre todas las posibilidades, cada una de las sinergias consta de manera particular de un número de entidades que la representan dentro del modelo y que excluyen el resto de ellas que no están representadas en su funcionamiento. Para identificar las entidades se realiza un listado de las mismas en el que se indica cuales son las entidades que la conforman en cada caso (Tabla 3.3)

Tabla 3.3: Estructura del Modelo de las Sinergias Identificadas

ESTRUCTURA DEL MODELO DE LAS SINERGIAS IDENTIFICADAS									
Código de Sinergia	Entidades Origen	Proceso De Adecuación Del Flujo Origen	Servicios Al Transporte Origen	Servicios Al Transporte En Intermedio Origen	Proceso Intermedio Del Flujo Compartido	Servicios Al Transporte En Intermedio Destino	Servicios Al Transporte En Destino	Proceso De Adecuación Del Flujo En Destino	Entidades Destino
SM1	1	✓	✓				✓		1
SM2	2		✓				✓		1
SM3	1		✓				✓		1
MM1	1		✓				✓		3
MM2	1		✓			✓			3
MM3	3			✓					1
MM4	2			✓					1
GM1	3		✓				✓		1
GM2	3		✓				✓		1
MA1	1	✓	✓				✓		2
MA2	1		✓				✓		2
MA3	1		✓				✓		3
GA1	3		✓		✓		✓		1
GA2	1		✓				✓		2
GA3	1		✓				✓		2
MV1	1		✓				✓		1
GE1	1		✓				✓		3
MAC1	1		✓				✓		3
GN1	1		✓			✓	✓		3
SF1	3		✓	✓			✓		1
SF2	1		✓				✓		1
SF3	1		✓				✓		1
SF4	3		✓	✓			✓		1
SF5	1		✓				✓		1

## Capítulo 4

# EVALUACIÓN Y SELECCIÓN PRELIMINAR DE SINERGIAS

### 4.1. Factores y métodos de evaluación preliminar

A partir de la lista preliminar de sinergias que se obtiene en el estudio previo del escenario inicial [6], es necesario realizar un proceso de identificación de aquellas sinergias que por su naturaleza son capaces de simplificar el proceso de implementación de la futura red de simbiosis industrial en la actividad cotidiana de las empresas. Esta simplificación convierte el proceso de implantación en más accesible para las empresas implicadas.

#### 4.1.1. Análisis de factores y selección Preliminar Multicriterio de Sinergias

En primer lugar, de una lista preliminar de sinergias identificadas se realiza una tarea de preselección y filtro de las sinergias que, finalmente, formarán la red de simbiosis

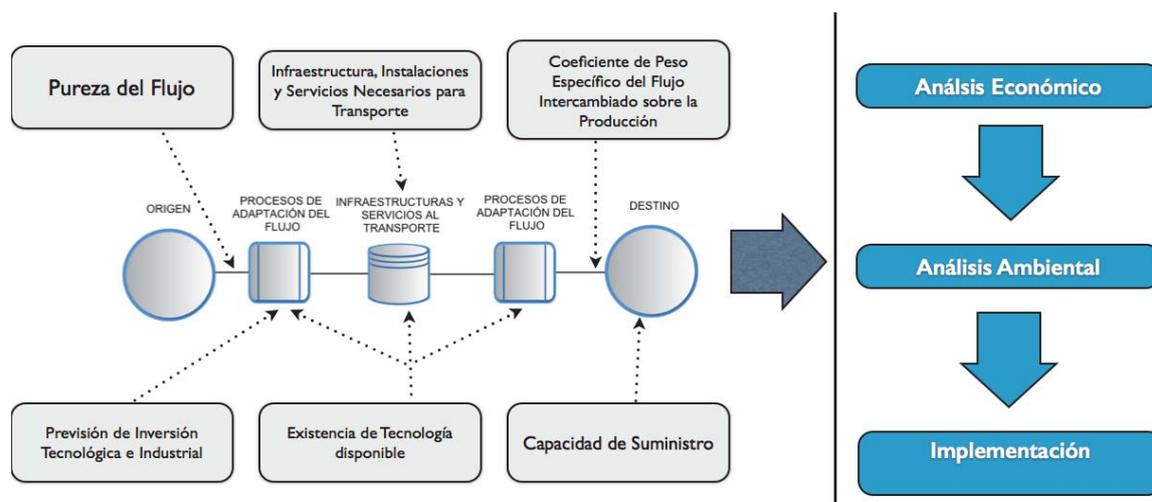


Figura 4.1: Esquema de Operación con modelo ICCS

industrial. Para esta labor es necesario el apoyo de sistemas de ayuda a la decisión del ser humano, de manera que la selección de las sinergias más idóneas para ser implantadas sea lo más objetiva y científica posible. Para abordar una situación problemática planteada en una toma de decisiones en la que se presentan diversos objetivos o criterios que han de ser incorporados simultáneamente, se utiliza la Metodología de Evaluación Multicriterio. Colson y De Bruyn [43] definen la toma de decisiones multicriterio como 'mundo de conceptos, aproximaciones, modelos y métodos, para auxiliar a los centros decisores a describir, evaluar, ordenar, jerarquizar, seleccionar o rechazar objetos, en base a una evaluación (expresada por puntuaciones, valores o intensidades de preferencia) de acuerdo a varios criterios'; pero es la definición acuñada por Barredo [44] la que, por su simplicidad, mejor expresa el significado de este método de toma de decisiones. Describe Barredo la evaluación multicriterio como el conjunto de técnicas utilizadas en la decisión multidimensional y los modelos de evaluación, dentro del campo de la toma de decisiones [44].

La selección en este caso se realiza mediante la técnica de selección multicriterio de ponderación lineal (*scoring*). Esta técnica permite analizar el listado de sinergias previo desde criterios establecidos con antelación teniendo en cuenta su simplicidad y viabilidad.

Permite abordar situaciones de incertidumbre o con pocos niveles de información de forma simplificada. Se trata de una técnica ampliamente utilizada internacionalmente en situaciones de características similares [45].

En la figura 4.2 se representa de forma esquemática el orden lógico que siguen los factores de los que depende la priorización a la hora de decidir las sinergias que formarán parte de una red de sinergias. Cuanto más favorables sean las características de una sinergia atendiendo a los factores de viabilidad técnica mayor interés tendrá la implementación de dicha sinergia en la red ya que su puesta en funcionamiento será más simple y rápida facilitando la creación de una primera red de sinergias que dinamice posteriormente la implantación de estrategias de simbiosis industrial en un complejo industrial.

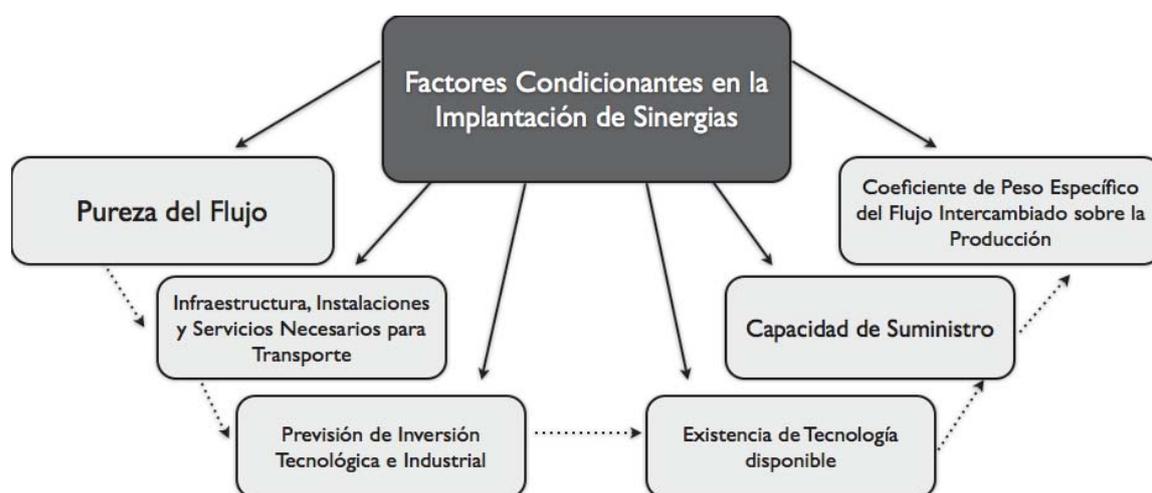


Figura 4.2: Factores Condicionantes en la Implantación de Sinergias

En un primer lugar se considera como un factor de viabilidad técnica primario **la pureza del flujo** de la sinergia que se va a compartir, ya que cuanto mayor sea compatibilidad entre el flujo residual de la empresa que le ofrece y el de la empresa que le requiere, menor será la necesidad de tratamientos y procesos con su transporte correspondiente y de contar con terceros agentes.

La incompatibilidad del flujo a compartir puede suponer un problema a la hora de

realizar su transporte si se encuentra en un estado (líquido, pulverulento, etc.) cuyo traslado puede ser dificultoso o impide la creación de un flujo continuo de suministro (tuberías, etc.), pero también puede suponer una ventaja si el estado inicial del flujo facilita su transporte hasta el lugar donde será procesado. Todas estas variables señalan como un factor importante para priorizar la implantación de una sinergia la capacidad de las empresas implicadas para contar con las **instalaciones necesarias para dar servicio al transporte** del mismo, así como la capacidad de recepción de las mercancías.

Bien por la necesidad de transformar el flujo residual que se pretende hacer llegar al origen, o por necesidades en transporte y servicios o infraestructuras, la implantación de una sinergia requiere una **inversión industrial inicial** por parte de las empresas implicadas. Puede que esta inversión sea compartida por las compañías colaboradoras lo que la haría más interesante de cara a minimizar costes, pero existe la posibilidad de que sea sólo una de las empresas la que realice el esfuerzo económico inicial y puede que este sea bajo o puede que suponga un contante muy elevado que haría la sinergia poco interesante a los ojos de dicha firma.

Directamente ligado con la inversión inicial a realizar por las empresas del complejo será el coste asociado a la **adquisición y utilización de las tecnología** que son necesarias para llevar a cabo la implantación final de la sinergia. Cuanto más complejo sea el aspecto técnico ya sea en el transporte o el procesado, mayor será el coste de las tecnologías a utilizar, teniendo en cuenta que puede llegar a ser necesario el desarrollo de nuevas tecnologías para el caso particular de alguna sinergia, algo que aumentaría aún más la inversión. En cualquier caso, la existencia y madurez de las tecnologías que se va a usar en el proceso de creación de la red es un factor importante a la hora de priorizar una sinergia sobre otra.

Aún cuando todos los factores anteriores sean favorables para las compañías, la **cobertura** que se hará **de las necesidades de la compañía** destino cuando la sinergia

esté en funcionamiento es un factor que puede reducir el interés por parte de las empresas para comenzar el funcionamiento de la sinergia ya que si este es muy reducido puede poner el un plano secundario la misma.

Por último y en la misma línea que el factor de la capacidad de cobertura se plantea un **coeficiente** que representa el **peso que tendrá la cantidad de flujo implicado en una sinergia en comparación con la producción total de las compañías** y en términos relativos. Es un factor a tener en cuenta a la hora de decidir la prioridad de una sinergia ya que permite ver el interés que tendrá un flujo para una compañía sobre el global de la empresa. Puede darse el caso de que la cobertura del flujo destino sea completa, pero que la empresa implicada no vea prioritaria su instauración por suponer un porcentaje muy reducido de su movimiento de flujos dentro de su sistema particular.

A raíz de estos factores considerados, se diseñan seis criterios de selección siguiendo la línea de simplicidad y facilidad de implantación que se busca para las sinergias que formen parte de la red a diseñar (Tabla 4.1).

**Tabla 4.1:** Definición de los criterios de selección multicriterio

Pureza del Flujo		
<p>Nivel de similitud fisico-química entre el flujo en el origen y el flujo de referencia. Se han de definir con claridad las características del flujo de referencia y el nivel exigido de pureza para el flujo origen.</p>		
3	Completamente Compatible	Los flujos son perfectamente compatibles e intercambiables sin necesidad de actuar sobre ellos o de cambiar sus condiciones físicas o químicas.
2	Flujos Similares	Es necesario adecuar el flujo saliente en la entidad de origen al de destino mediante un tratamiento previo que asegure la compatibilidad del flujo entre las entidades de origen y las de referencia. Este tratamiento ha de ser simple y de un único paso previo realizado en origen o en la entrada de destino. Puede ser realizado también durante la etapa de flujo compartido.
1	Flujos de Baja Compatibilidad	Las características físicas o químicas del flujo de origen hacen necesario realizar varios tratamientos hasta conseguir las características requeridas en la entidad de destino. Son necesarios varios pasos/procesos previos a su transporte para el intercambio y a su llegada a la entidad de destino. Estos procesos pueden ser realizados también durante la etapa de flujo compartido.
0	Incompatible	Los flujos son de la misma naturaleza, pero son muy diferentes en composición por lo que los tratamientos son muy complejos hasta conseguir purezas aceptables por el flujo de destino (se necesita tecnología muy específica) y no es posible realizar la adecuación en las propias compañías de origen y destino.

Infraestructura, Instalaciones y Servicios Necesarios para la Creación del Flujo entre Empresas		
<p>Necesidades y existencia de entidades capaces de proporcionar los servicios e infraestructuras necesarias para realizar el transporte del flujo durante las diferentes etapas. Se contemplan aspectos como la preexistencia de la infraestructura a utilizar o la facilidad para la creación de la misma, así como la propiedad de los espacios implicados en las nuevas instalaciones requeridas.</p> <p><i>Ejemplos de ellos son la necesidad de depósitos nuevos para recibir o enviar flujos líquidos, infraestructura y almacenes para recepción de transporte por carretera, adquisición de nuevos espacios para acopio de material entre otros.</i></p>		
3	Infraestructura y Servicios Disponibles	No es necesaria la creación de una infraestructura nueva para el transporte del flujo, sino que el transporte se realiza de forma compartida por las compañías con las instalaciones preexistentes. Se considera que las compañías disponen de la infraestructura necesaria para dar servicio a las instalaciones y servicios de transporte.
2	Infraestructura y Servicios de Creación Compartida	Existe la necesidad de una infraestructura para el transporte del flujo debido al carácter continuo del mismo, lo que hace que sea imprescindible la creación, en las compañías, de instalaciones de servicio al transporte específicas. En el caso que se plantea la infraestructura necesaria que hay que crear se encuentra en la fase de flujo compartido, por lo que los costes y su gestión se realizan de forma compartida por las empresas implicadas en la sinergia.
1	Necesidad individual de Infraestructura y Servicios de Creación Simple	Las compañías necesitan de la creación de una infraestructura propia para poder adecuar sus instalaciones y dar servicio al sistema de transporte del flujo a crear de manera individual, ya sea en origen o en destino. Esta infraestructura es sencilla (Sólo se requiere la creación de una única nueva instalación) y asumible en espacio por las compañías (pues ya disponen de espacio en propiedad para dichas instalaciones).
0	Necesidad individual de Infraestructura y Servicios de Creación Compleja	Es necesario la creación de nueva infraestructura en las compañías implicadas de manera individual, ya sea en la parte de flujo en origen o bien en la de flujo en destino. En esta situación, la infraestructura y la tecnología que precisan las compañías es compleja y voluminosa (se requiere la creación de al menos dos nuevas instalaciones o la adecuación de las existentes), y exigirá un proceso costoso tanto en términos técnicos como volumen de espacio utilizado para su implantación (adquisición, por la compañía, de suelo o espacio nuevo).

Previsión de Inversión Tecnológica e Industrial para el tratamiento y transporte del flujo		
<p>Para la creación de cada uno de los flujos, será necesario en determinados casos el tratamiento del flujo bien en origen o destino, o bien durante la fase de flujo compartido de manera que se adapte a las necesidades de composición, transporte y continuidad exigidos en cada fase para la creación de la sinergia. A su vez se precisa de infraestructura que de servicio al transporte del flujo en cada una de las fases. Todo el conjunto de necesidades particulares de cada caso suponen una inversión inicial que es conveniente considerar de manera cualitativa. Se ha de estudiar la complejidad de la inversión técnica requerida para la implantación de la sinergia, así como el carácter compartido de dicha inversión o la necesidad individual de cada compañía de soportar, por separado, la inversión inicial requerida</p>		
3	Inversión Baja o Inexistente	La inversión previa a la creación del flujo es baja o inexistente, ya que las necesidades técnicas y de espacio para la creación del flujo y los servicios para su transporte son asumidos por las compañías con sus instalaciones actuales sin necesidad de adquirir equipamiento o espacios nuevos.
2	Inversión Tecnológica y Adquisición de Espacio Compartida	El procesado del flujo para su adecuación a las infraestructuras necesarias para su transporte e intercambio es realizable en las propias instalaciones de las compañías, pero exige una inversión en tecnología que permita realizar los procesos necesarios y su posterior adecuación para su transporte. La inversión exigida se refiere al flujo compartido, por lo que habrá de ser asumida por todas las entidades implicadas en la sinergia.
1	Adquisición de Nuevos Espacios de Manera Colectiva	La sinergia a implantar requiere de no sólo de equipamiento para la realización de los procesos implicados, sino también de nuevos espacios e instalaciones donde realizar dichos procesos y albergar la tecnología a utilizar. La inversión asociada a la nueva actividad creada es compartida de manera equitativa por las compañías implicadas en la sinergia.
0	Inversión Individual	Las necesidades para la creación de la sinergia están asociadas sólo a una parte del flujo, bien en origen o bien en destino, por lo que la inversión a realizar será solo soportada individualmente por cada entidad, y según sus necesidades de adecuación y servicio al transporte del flujo. Esta situación hace que sea el escenario menos favorable en el aspecto inversor.

Existencia de Tecnología disponible		
<p>Según la naturaleza del flujo y la complejidad en su transporte y tratamiento, puede existir la posibilidad de que no exista tecnología disponible para el proyecto que se contempla, así como la posibilidad de que aun existiendo, ésta se encuentre en un estado de madurez tal que no garantice el buen funcionamiento del proceso. Se ha de investigar el estado de desarrollo en que se encuentra la tecnología que se va a utilizar en la creación del flujo entre compañías así como las posibilidades de uso de servicios externos según la complejidad de la misma.</p>		
3	Tecnología madura de fácil aplicación	La tecnología existente está en un alto estado de madurez y su uso es habitual, existiendo numerosas alternativas y opciones para proceder a su implantación.
2	Tecnología madura y compleja	Se cuenta con una tecnología madura, contrastada por experiencias de trabajo previas tanto a nivel internacional como nacional, pudiendo contrastar los resultados en publicaciones o en datos comprobables. Es una tecnología compleja y costosa de implantar y para su instalación se necesita de servicios externos especializados.
1	Tecnología de baja madurez	Existe tecnología desarrollada, pero de penetración incipiente en el mercado por lo que las experiencias de trabajo previas son de casos puntuales a nivel internacional sin publicación de resultados , y las empresas que trabajan con ella son muy singulares y específicas.
0	Tecnología en desarrollo	No existe tecnología desarrollada en ese ámbito o está en estado de prototipo y en desarrollo. Su implantación exige desarrollo previo y no existen referencias o experiencias anteriores.

Capacidad de Suministro		
<p>Se ha de considerar el porcentaje de las necesidades de cada una de las compañías que es cubierto por el intercambio realizado en los flujos, ya que puede darse el caso de que la creación de un flujo suponga una complejidad añadida que no cubra un mínimo de las necesidades, o que no suponga un beneficio técnico para el suministro o en la cobertura de la demanda.</p>		
3	Cobertura semi o completa	75 - 100 %
2	Alta cobertura de suministro	50 - 75 %
1	Cobertura media de suministro	25 - 50 %
0	Baja cobertura de suministro	0 - 25 %
Coeficiente de Peso Específico del Flujo Intercambiado sobre la Producción		
<p>Es importante considerar dentro del flujo creado, no sólo la cantidad total intercambiada dentro del flujo, sino aspectos de caudal o de cantidad intercambiada por unidad de tiempo, de manera que quede representada su importancia sobre la producción de la compañía (Productividad relativa al flujo estudiado).</p> <p>La productividad relativa de un factor de la producción sobre la producción final de una compañía demuestra la relevancia de ese factor sobre la producción final de la compañía, mostrando por tanto el interés que tendrá la implantación de dicha sinergia/flujo en el conjunto del proceso productivo. En el caso de que el flujo sea de un factor importante en el funcionamiento de la empresa, los beneficios económicos y la reducción de impacto ambiental serán grandes y si es un factor de baja importancia estos beneficios económicos y medioambientales serán más reducidos o insignificantes, restando interés para la empresa su implantación.</p> <p>Los valores relativos obtenidos se normalizan para cada flujo, de manera que se pueda observar cuales son los valores más interesantes dentro del mismo flujo y priorizar la creación de dichas sinergias sobre el resto. El coeficiente se calcula mediante las expresiones 4.1 y 4.2.</p>		
3	Flujo Clave	$0.75 < CPE \leq 1$
2	Alta Prioridad de Creación de Flujo	$0.5 < CPE \leq 0.75$
1	Prioridad de Creación de Flujo Moderada	$0.25 < CPE \leq 0.5$
0	Baja Prioridad de Creación de Flujo	$CPE \leq 0.25$

El último criterio de selección es el coeficiente de peso específico del flujo intercambiado sobre la producción total. Se refiere a la relevancia que tendrá la implementación de una sinergia o flujo en particular para las empresas implicadas, comparando la cantidad de flujo a intercambiar con la actividad global de la empresa en términos de toneladas por año.

El coeficiente se calcula por la ecuación 4.1:

$$CPE_j = \frac{Q_j}{Pr_j} \quad (4.1)$$

Donde  $CPE$  es el coeficiente de peso específico,  $Q$  la cantidad de flujo intercambiado y  $Pr$  la producción total de la empresa, medidas en las mismas unidades.

Los valores del coeficiente se normalizan a partir de la ecuación 4.2 con el fin de simplificar la comparación entre empresas realizándola en términos relativos. Se divide el coeficiente de peso específico particular de cada sinergia entre el valor máximo obtenido tras estudiar los resultados en toda la lista de sinergias.

$$CPE = \frac{CPE_j}{maxCPE} \quad (4.2)$$

Las sinergias elegidas serán aquellas con la puntuación más alta de entre las identificadas en estudios anteriores. La puntuación final de cada sinergia en la selección se calcula mediante la ecuación 4.3:

$$S_j = \sum_i w_j r_{ij} \quad (4.3)$$

Donde  $S$  es la puntuación final de cada sinergia,  $w$  la ponderación de cada criterio

siendo en este caso 1 para todos ellos, y  $r$  la puntuación de cada una de las opciones establecidas para cada criterio.

La ponderación de los criterios es idéntica en todos los casos (1 punto), utilizando una escala de puntuación para cada una de las cuatro alternativas de 0 a 3 puntos, siendo 0 el caso que menos cumple con la descripción de cada criterio y 3 para el caso que mejor se adapte a sus especificaciones.

De esta manera la puntuación esperada tras el análisis para una sinergia será de una puntuación entre 0 y 18 puntos. La escala de valoración global será por tanto:

- Sinergias de bajo interés (entre 0 y 10 puntos)
- Sinergias secundarias (entre 10 y 14 puntos)
- Sinergias Prioritarias (entre 14 y 18 puntos)

Las 24 sinergias detectadas en el estudio preliminar de *INGEPRO* [6] se evalúan a partir de los criterios de selección diseñados, permitiendo dar prioridad a los más relevantes y dejando abierta la posibilidad de ulteriores procesos de evaluación para el análisis de prioridades en futuros diseños. Una vez obtenida la calificación de cada sinergia, se ha de proceder a evaluar la viabilidad técnica de las sinergias seleccionadas. Esta evaluación ha de incluir un estudio económico y uno medioambiental, lo que garantiza un enfoque de sostenibilidad de la red de sinergias a diseñar.

Las sinergias clasificadas como prioritarias serán aquellas que pasen a la siguiente fase de análisis para formar parte de la red de sinergias de simbiosis industrial que se implante.

### 4.1.2. Viabilidad Económica de la Red de Sinergias

La evaluación de la viabilidad económica de la implementación de cada una de las sinergias individualmente y del conjunto de la red, se basa en la estimación en orden de magnitud de los costes de capital y de operación y mantenimiento que supone implantar la nueva sinergia en cada caso, calculando el ahorro que supondrá la nueva gestión del flujo implicado en la sinergia en comparación con la realizada previamente a su implantación. A partir de los ahorros anuales definidos, se puede estimar el tiempo de recuperación de la inversión inicial que las empresas involucradas tendrán que afrontar.

#### Clasificación de la Estimación de Costes

Según *AACE International's Recommended Practice No. 18R-97 Cost estimate classification system* [46] se identifican cinco clases diferentes de estimación de costes, que son designadas como Clase 1, 2, 3, 4 y 5, y desarrolladas en la Tabla 4.2. El nivel más bajo de definición o precisión en la estimación es la Clase 5, mientras que es la Clase 1 la que logra un mayor grado de exactitud.

**Tabla 4.2:** Clasificación de las Clases de Estimación de Costes [46]

Estimate Class	Level of Project Definition (% of Complete Definition)	Propósito de Estimación	Range Accuracy (Inferior y Superior)
Clase 1	0 - 2 %	Viabilidad y Orden de Magnitud	S: 30-100 % I: -20 to -50 %
Clase 2	1 - 15 %	Estudio Conceptual	S: 20-50 % I: -15 to -30 %
Clase 3	10 - 40 %	Diseño Preliminar y Aprobación Presupuestaria	S: 10-30 % I: -10 to -20 %
Clase 4	30 - 70 %	Control Definitivo de Presupuesto	S: 5-20 % I: -5 to -15 %
Clase 5	50 - 100 %	Estudio de Detalle	S: 3-15 % I: -3 to -10 %

En este trabajo se realiza una estimación de costes con una precisión de orden de magnitud, lo que se corresponde con una estimación de clase 5, según la clasificación presentada. Este tipo de estimación, también conocida como de viabilidad o de ratio, se basa en la información de costes recogida en experiencias previas similares o equivalentes. Esta información es ajustada mediante los factores de escalas apropiados en cada caso de manera que quede contemplado el paso del tiempo en materias como la inflación, para que la estimación realizada sea lo más acorde posible al momento actual [47].

Para la estimación de los costes asociados a la implementación de una sinergia, se propone realizar un estudio en dos fases diferenciadas: una primera fase de procesamiento o tratamiento del flujo de la sinergia que contempla los costes asociados a la adquisición de nuevos equipos e instalaciones necesarios para el proceso y los costes de operación, y una segunda fase, en la que se aborden los costes de transporte y transferencia del flujo entre cada una de las entidades involucradas.

En la primera fase, se utiliza la *Técnica de Módulo de Coste*, desarrollada por Turton et al. [48] a partir de trabajos anteriores como los de Guthrie [49, 50], Ulrich [51] y Navarrete [52], para la estimación de costes. Su uso es común en la estimación de costes de nuevas plantas químicas y posibles ampliaciones. Actualmente es considerado el mejor método para establecer estimaciones preliminares de costes en palabras de Turton [48]. A partir de este técnica, se obtienen tanto los costes de inversión inicial como los costes de operación y mantenimiento de las nuevas instalaciones.

En el caso de la evaluación del coste inicial de inversión, el método contempla tanto los costes directos como los costes indirectos asociados a la construcción de las nuevas instalaciones como factores asociados. Los costes directos están formados por los costes de compra del equipo al proveedor, el coste de los materiales necesarios para la instalación (tuberías, electrónica, electricidad, etc.) y los costes de mano de obra necesarios. Los costes indirectos considerados incluyen desde los costes de transporte, seguros e impuestos,

gastos generales de personal (vacaciones, imprevistos, etc.) y el coste de los honorarios del contratista.

A partir de estas consideraciones, para el cálculo de los costes iniciales por módulo, el método utiliza la ecuación 4.4, teniendo en cuenta los costes directos e indirectos previos.

$$C_{BM} = C_p^0 F_{BM} \quad (4.4)$$

Donde  $C_{BM}$  es el coste base de cada módulo de equipamiento,  $C_p^0$  es el coste de cada módulo para las condiciones base consideradas (Acero al carbono como material y condiciones de presión ambiental),  $F_{BM}$  el factor de módulo de base que corrige el coste en condiciones base para conseguir el coste final.

Para estimar los costes finales totales tanto en el caso de una instalación construida de cero (Costes de Raíz) como en el de una ampliación o alteración de una existente (Costes Totales de Módulo), es necesario tener en cuenta otros costes, además de los costes directos e indirectos. Estos costes adicionales se pueden dividir en dos grupos.

En el caso de los Costes Totales de Módulo ( $C_{TM}$ ), se debe modificar el coste base de cada módulo mediante un factor que le adecue tras tener en cuenta los costes y honorarios de contingencia no contemplados. Este factor se incluye en la evaluación de los costes como una protección contra posibles descuidos e información defectuosa. Se considera un 15 % y un 3 % para los costes y los honorarios de contingencia respectivamente, utilizándose un factor de 1,18 por lo tanto tal y como se expresa en la ecuación 4.5.

$$C_{TM} = \sum_{i=1}^n C_{TM,i} = 1,18 \sum_{i=1}^n C_{Bm,i} \quad (4.5)$$

Donde  $n$  representa el número total de equipos adquiridos.

Los Costes de Raíz ( $C_{GR}$ ) contemplan además los costes de instalaciones auxiliares necesarias. En ellos están incluidos los costes de terrenos, construcciones auxiliares y uso de servicios públicos durante la instalación. Estos costes se estiman del 50% de los costes de módulo de base para las condiciones base. Añadiendo los costes de instalaciones auxiliares a los costes de módulo totales, obtenemos los Costes de Raíz del proyecto (ecuación 4.6).

$$C_{GR} = C_{TM} + 0,5 \sum_{i=1}^n C_{BM,i}^0 \quad (4.6)$$

Donde  $n$  representa el número total de equipos adquiridos.

Los costes de operación también se calculan mediante el método de módulo de coste. Estos costes ( $COM_d$ ) se determinan a partir de la ecuación 4.7.

$$COM_d = 0,180 FCI + 2,73 C_{OL} + 1,23 (C_{UT} + C_{WT} + C_{RM}) \quad (4.7)$$

Donde  $FCI$  es el capital inicial fijo de inversión (bien  $C_{TM}$  o  $C_{GR}$  según corresponda),  $C_{OL}$  son los costes de mano de obra,  $C_{UT}$  son los costes en servicios públicos,  $C_{WT}$  son los costes de tratamiento de aguas y  $C_{RM}$  los costes de materias primas.

En la segunda fase, la de estimación de los costes de transporte, se han considerado dos posibles tipos de flujo, flujo fluido y flujo sólido. Para la estimación de costes del transporte de fluidos en tuberías, simplificaremos el cálculo considerando el conjunto del transporte formado por dos partes diferenciadas, la tubería y las estaciones de bombeo. En primer lugar, para la estimación de los costes de construcción de las tuberías por donde se realizará el transporte ha sido estudiado por Parker [53]. Asimismo, el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de los EEUU (*The U.S. Army Corps of Engineers*) [54]

estima el coste inicial del montaje de una nueva estación de bombeo. Para el cálculo de los costes de operación y mantenimiento de esta infraestructura de transporte nos apoyaremos, en el estudio del *Miriam Vale Shire Council* [55], cuyo valor se estima para tuberías y estaciones de bombeo como un porcentaje del coste inicial del 1% y 2,5%, respectivamente. En segundo lugar, en el caso del transporte de sólidos, los costes se estiman para el caso de transporte por carretera, basando el cálculo en los precios que se aportan en el software *ACOTRAM* (Datos del 2008), un asistente de cálculo de costes de transporte que ofrece el Ministerio de Fomento del Gobierno de España.

En el caso de generación de una nueva actividad asociada con la implantación de la sinergia, actividad no prevista en la técnica de cálculo de módulo de coste, los costes asociados a esta nueva actividad deben ser estimados de una manera específica. Un ejemplo es la generación de una EDAR para el tratamiento de las aguas residuales urbanas. En este caso, el *Barnstable County Wastewater Cost Task Force* [56] estima tanto el coste de inversión inicial como los costes de operación y mantenimiento para el caso de una estación de tratamiento de aguas residuales a partir del análisis de casos anteriores.

Como resultado de este análisis económico se descartarán de la metodología aquellas sinergias que no cumplan los requisitos de rentabilidad. Por el contrario aquellas que demuestran ser económicamente viables continuarán siendo analizadas con el fin de determinar su impacto ambiental.

### 4.1.3. Viabilidad Ambiental de la Red de Sinergias

El objetivo de este análisis es comparar el impacto ambiental que supondrá la implantación de una sinergia dentro del complejo industrial. Este impacto se comparará con el que se daba en el escenario previo a la implantación. El análisis ambiental se realiza sobre las sinergias que han superado el análisis económico. De esta manera finalmente se podrá

comprobar que la implementación de dichas sinergias supondrá un desarrollo sostenible, aportando no sólo un beneficio económico sino también ambiental. Para este fin se lleva a cabo un análisis del ciclo de vida de la operación en el caso de la aplicación de sinergia y se compara con un análisis del ciclo de vida de la hipótesis de base en la que no se ha implementado la sinergia. Dichos análisis se llevan a cabo mediante la herramienta *SimaPro* [57] que cuenta con todas las características necesarias para llevarle a cabo en las condiciones que se contemplan en este caso.

Para la interpretación del resultado del análisis, es necesaria la utilización de un indicador ambiental que permita cuantificar el impacto en el medioambiente de cada caso contemplado.

En este trabajo se utiliza el indicador de huella de carbono para comparar ambos escenarios. Es una medida de la cantidad total de emisiones de  $CO_2$  y de otros gases de efecto invernadero (en adelante GEI), causados de forma directa e indirecta, por un individuo, actividad, organización o producto a lo largo del ciclo de vida del mismo. Estos datos se obtienen mediante la medición de las emisiones de GEI que se generan en la cadena de producción, desde la obtención de materias primas hasta el tratamiento de residuos, pasando por la manufactura y el transporte.

El cálculo de las emisiones totales de gases de una entidad o de un proceso asociadas a un flujo es imposible en la práctica debido a la gran cantidad de variables que deben ser contempladas y los datos que son necesarios para este fin. A estas dificultades se añade el hecho de que el dióxido de carbono se puede crear naturalmente dentro de una actividad sin la necesidad de factores humanos. Wright et al. [58] han propuesto una definición más práctica y factible de la huella de carbono: 'Una medida de la cantidad total de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y metano ( $CH_4$ ) procedentes de una población, sistema o actividad definida, teniendo en cuenta todas las fuentes, sumideros y almacenamiento pertinentes dentro del territorio y límite temporal de la población, sistema o actividad

de interés; calculado como dióxido de carbono equivalente ( $CO_{2e}$ ), utilizando el potencial de calentamiento atmosférico de 100 años correspondiente ( $GWP_{100}$ )<sup>1</sup>.

La elección de este indicador en esta metodología se debe a razones de representatividad de la huella de carbono a la hora de analizar el impacto de una actividad o la generación de bienes. Actualmente, casi todas las actividades que realizamos (movilidad, alimentación, transporte...) y bienes que poseemos y utilizamos (bienes de consumo, hogar...) conllevan consumo de energía, lo que significa una contribución indirecta a las emisiones de GEI.

Es por ello que la huella de carbono representa un indicador orientado a conseguir una mayor contribución de las organizaciones a ser entidades socialmente responsables y un elemento más de concienciación para la asunción entre los ciudadanos de prácticas más sostenibles en su vida diaria.

La medición de la huella de carbono de un producto es capaz de identificar las fuentes de emisiones de GEI de un producto. Esto, por lo tanto, permite definir mejores objetivos, promover políticas de reducción de emisiones más efectivas y desarrollar iniciativas de ahorro de costes mejor dirigidas, todo ello a partir de un mejor conocimiento de los puntos críticos de impacto ambiental. Como añadido a una mejor conservación del medio ambiente, la reducción de costes y mejora de su proceso productivo, la reducción de la huella de carbono por parte de una entidad o empresa contribuye a dejar patente su compromiso con la responsabilidad social y ambiental, lo que contribuye a mejorar su reputación y su imagen de marca dentro del mercado.

A partir de los resultados del análisis de ciclo de vida realizados, expresados en el indicador elegido, cualquier sinergia sería ambientalmente viable cuando la huella de carbono de la nueva gestión del flujo después de la implantación de la sinergia sea razonablemente inferior a la que posee la gestión del flujo en el escenario previo.

Es importante tener en cuenta la huella de carbono del proceso de construcción de las nuevas instalaciones y su ciclo de vida, de manera que se pueda cuantificar el tiempo de recuperación del impacto ambiental inicial de esta nueva infraestructura (medido en huella de carbono) a partir del ahorro en impacto medioambiental que supone la aplicación de la sinergia en el proceso productivo.

Finalmente, después de superar todo el análisis, las sinergias que garanticen la sostenibilidad del conjunto y a nivel individual, pasarán a formar parte de la red preliminar de sinergias que será implementada en una fase inicial.

## **4.2. Análisis y selección preliminar técnica-económica y ambiental de sinergias**

### **4.2.1. Análisis cualitativo técnico**

Siguiendo la metodología desarrollada se analiza la lista de sinergias preliminares identificadas por INGEPRO [6] se ha de llegar a un diseño de un prototipo de red de sinergias de simbiosis industrial con las sinergias que superen los análisis planteados.

Este diseño será el que se utilice para analizar el comportamiento de la red de sinergias desde el punto de vista de una cadena de suministro, implementando por computador el modelo de la misma en un software de análisis de *Supply Chain*. Mediante este análisis se busca demostrar que los resultados obtenidos tanto con el enfoque de red de simbiosis industrial como el de una cadena de suministro son iguales, y que existe por tanto una analogía directa entre el comportamiento de una Red de SI y una *supply chain* Sostenible.

Inicialmente se parte de 24 sinergias, aunque existen 5 sinergias que son: SP1, SP2, SP3, SP4, SP5, cuyo estudio queda fuera de los límites de mi sistema tal y como se definió

anteriormente. Estas sinergias plantean las oportunidades de colaboración existentes con un entorno de empresas fuera de los límites prefijados, por lo que su aplicación no va a suponer ninguna ventaja medioambiental y no fomentan ningún cierre de ciclos dentro del sistema, sino que extiende el alcance de la red de simbiosis industrial buscando posibles aprovechamientos fuera del sistema industrial. Por lo tanto se va a trabajar con 19 sinergias.

Previamente se realiza el análisis cualitativo de las sinergias mediante una selección multicriterio de manera que podamos filtrar del conjunto las sinergias más interesantes para facilitar la implantación de la red.

Las sinergias seleccionadas pasarán a ser analizadas para comprobar su viabilidad económica, verificando la rentabilidad que supondrá su implantación respecto al caso inicial sin la sinergia en funcionamiento.

Finalmente las sinergias que sean rentables económicamente pasarán por un análisis ambiental que consistirá en un análisis de ciclo de vida que indique una reducción del impacto ambiental en la actividad del sistema tras la implantación de cada una de las sinergias.

La Tabla 4.3 refleja el listado de sinergias preliminares sobre las que se va a trabajar, cuyas características y propiedades están detalladas en el estudio ya comentado de INGEPRO [6].

### **Selección Multicriterio**

En primer lugar se realiza el análisis cualitativo de las sinergias mediante una selección multicriterio de manera que podamos filtrar del conjunto las sinergias más interesantes para facilitar la implantación de la red.

Siguiendo los criterios planteados en el apartado 6.1 de la metodología se analizan las 19 primeras sinergias de la Tabla 4.3 relativa al sistema de estudio. Los resultados del análisis se presentan en la Tabla 4.4 tras valorar la puntuación de cada sinergia para cada uno de los criterios establecidos y obtener la suma total. Se remarca con un símbolo de afirmación aquellas sinergias con la mayor puntuación, las cuáles cumplen con la denominación de sinergias prioritarias en la escala de clasificación global superando por tanto los 14 puntos. Los detalles sobre el estudio realizado para cada sinergia se encuentra en el Anexo A, donde se especifica el análisis realizado para la puntuación de cada sinergia y su posterior selección.

En el gráfico comparativo de la Figura 4.3, cada una de las sinergias está representada en el eje de abscisas por su código de sinergia, expresando cada barra la puntuación total que ha obtenido. Las líneas rojas representan los valores límite de la escala de valoración global que permite visualizar los resultados del análisis multicriterio. Aquellas sinergias que alcancen los 14 puntos (la línea roja superior) se corresponden con las sinergias prioritarias. Las sinergias que alcanzan la línea roja inferior pero no llegan a alcanzar la línea roja superior son las denominadas como sinergias secundarias (entre 10 y 14 puntos), y finalmente las sinergias por debajo de la línea roja inferior (10 puntos) son las de menor interés para la red inicial de sinergias a diseñar.

Tabla 4.3: Listado de Sinergias Identificadas

LISTADO DE SINERGIAS						
FLUJO	TIPO	CÓDIGO	SINERGIA	COMPAÑÍA 1 C1	COMPAÑÍA 2 C2	COMPAÑÍA 3 C3
	Sustitución	SM1	Aprovechamiento de Residuo de CaCO <sub>3</sub> de C3 en C2		✓	✓
		SM2	Distribución de CO <sub>2</sub> de C1 y C2 a C3	✓	✓	✓
		SM3	Aprovechamiento de Residuo de aceite de C2 a C1	✓	✓	✓
	MATERIA	Mutualidad	MM1	Proveedor común de materia SAP	✓	✓
MM2			Almacenamiento común de materia SAP	✓	✓	✓
MM3			Gestión conjunta de residuos peligrosos	✓	✓	✓
MM4			Gestión conjunta de residuos no peligrosos	✓	✓	✓
	Génesis	GM1	Secuestro de CO <sub>2</sub>	✓	✓	✓
		GM2	Combustión de residuos orgánicos	✓	✓	✓
	Mutualidad	MA1	C3 abastece a C2 de agua desmineralizada	✓	✓	✓
		MA2	C3 abastece a C2 de agua clarificada	✓	✓	✓
		MA3	Captación común de agua de río	✓	✓	✓
AGUA	Génesis	GA1	EDAR común que trata todas las aguas residuales asimilables a urbanas (ARUs)	✓	✓	✓
		GA2	Estación de Pretratamiento de agua desmineralizada		✓	✓
		GA3	Estación de Pretratamiento de agua clarificada		✓	✓
VAPOR	Mutualidad	MV1	Suministro de Vapor de C3 a C2		✓	✓
ELECTRICIDAD	Mutualidad	GE1	Suministro eléctrico conjunto a partir de una instalación común adicional de generación de energía eléctrica	✓	✓	✓
AIRE COMPRIMIDO	Mutualidad	MAC1	Suministro de Aire Comprimido de C3 a las empresas C1 y C2	✓	✓	✓
NITRÓGENO	Génesis	GN1	Suministro conjunto de nitrógeno	✓	✓	✓
RESIDUOS CON ENTORNO EXTENDIDO	Sustitución	SF1	Valorización material en industria cementera	✓	✓	✓
		SF2	Valorización material en sector de la construcción			✓
		SF3	Valorización material en industria de impresión gráfica	✓		✓
		SF4	Valorización energética en planta de incineración	✓	✓	✓
		SF5	Valorización energética en planta de biomasa	✓	✓	✓

Tabla 4.4: Puntuaciones totales en análisis multicriterio

PUNTUACIONES TOTALES EN ANÁLISIS MULTICRITERIO																			
CRITERIO	SM1	SM2	SM3	MM1	MM2	MM3	MM4	GM1	GM2	MA1	MA2	MA3	GA1	GA2	GA3	MV1	GE1	MAC1	GNI
Pureza del Flujo	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	3	2	2
Infrestructura	1	1	3	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	2	1	1	1
Inversión Industrial	2	2	3	3	3	3	3	1	1	3	3	3	1	3	3	3	1	3	1
Tecnología Disponible	2	1	3	3	3	3	3	1	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2
Capacidad de Suministro	3	0	0	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
CPE	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TOTAL	10	7	12	15	15	15	15	10	12	14	14	14	17	13	13	12	13	13	9

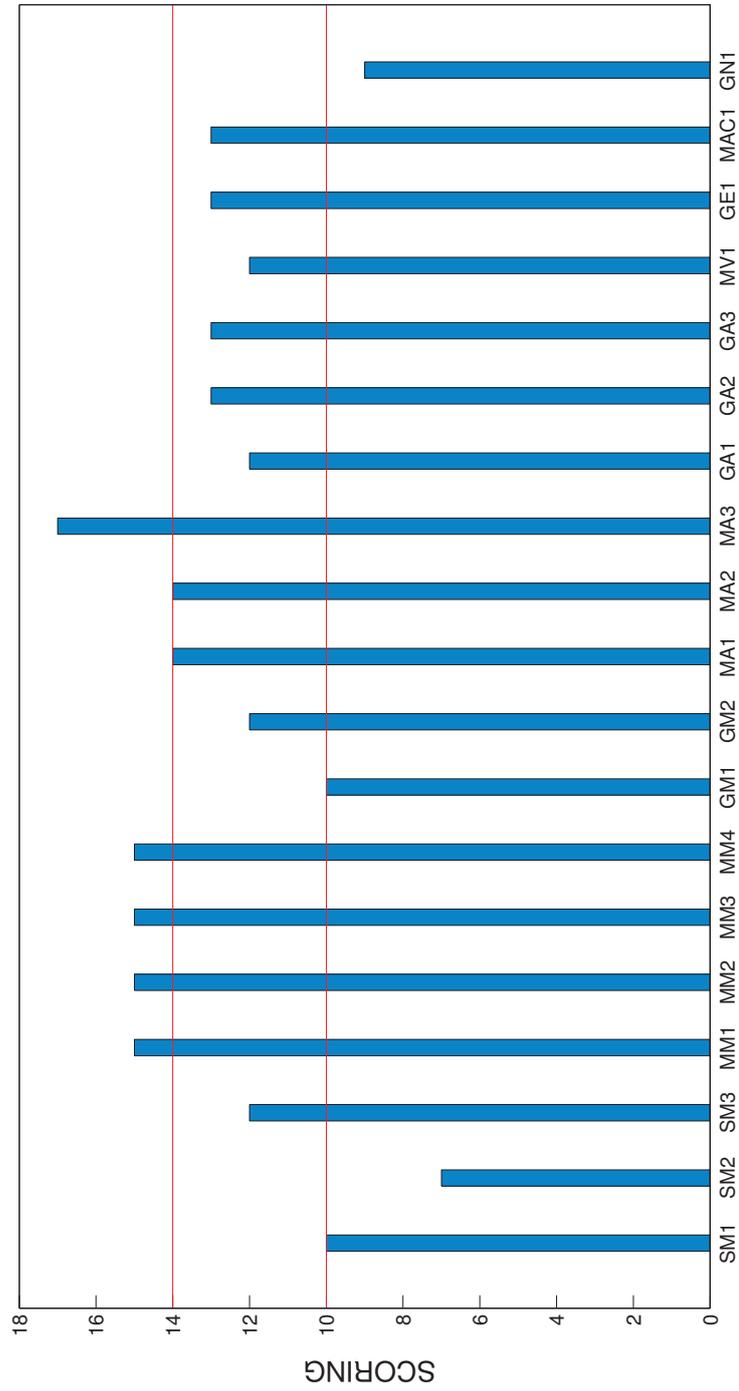


Figura 4.3: Comparativa gráfica de puntuaciones de las sinergias en análisis multicriterio

Por lo tanto tal y como se expone en el capítulo que describe la metodología, se van a considerar para el diseño de la red prototipo aquellas sinergias clasificadas como prioritarias, que se reflejan a continuación en la Tabla 4.5.

Estas sinergias serán las analizadas en el siguiente paso para comprobar su viabilidad económica.

**Tabla 4.5:** Sinergias seleccionadas mediante análisis multicriterio

CÓDIGO	SINERGIAS	TIPO
MM1	Proovedor común de materia SAP	Mutualidad
MM2	Almacenamiento común de materia SAP	Mutualidad
MM3	Gestión conjunta de residuos peligrosos	Mutualidad
MM4	Gestión conjunta de residuos no peligrosos	Mutualidad
MA1	C3 abastece a C2 de agua desmineralizada	Mutualidad
MA2	C3 abastece a C2 de agua clarificada	Mutualidad
MA3	Captación Común de Agua de Río	Mutualidad

### 4.2.2. Análisis Económico y Ambiental

#### Análisis de viabilidad económica

Ante la falta de datos económicos por no haber sido facilitados por las empresas participantes en el proyecto por motivos de confidencialidad, los datos sobre los costes asociados a cada flujo en el escenario previo a la implantación de la red serán estimados a partir de datos bibliográficos ante la imposibilidad de acceder a datos económicos particulares de las empresas implicadas por considerarse estratégicos.

Para analizar la viabilidad de la inversión a realizar para la implantación de la sinergia, se utiliza el indicador de eficiencia de costes (IEC) cuya expresión se muestra es la ecuación 4.8. Representa la rentabilidad en términos de operación de la nueva sinergia implantada en comparación con el escenario inicial.

$$IEC = \frac{\text{NuevosCostesdeOperación}}{\text{CostesdeOperaciónIniciales}} \quad (4.8)$$

Según el valor del IEC se considerará la viabilidad económica de la inversión. La tabla 4.6 muestra los valores del IEC para los cuales la inversión será aceptable o inaceptable, así como el valor crítico para el que la inversión deja de serlo.

**Tabla 4.6:** Clasificación de las Clases de Estimación de Costes [46]

<i>IEC</i>	Grado de aceptación
$IEC > 1$	No Aceptable
$IEC = 1$	Crítico (Aceptable)
$IEC < 1$	Aceptable

### Análisis de viabilidad ambiental

Comprobada la viabilidad económica de las sinergias, se ha de comprobar que también se trata de una sinergia ambientalmente beneficiosa, es decir, que pueda garantizar una rentabilidad al conjunto del complejo industrial y que también suponga una reducción del impacto ambiental del mismo. De esta manera se conseguiría un desarrollo sostenible de la actividad industrial.

Para este proceso de análisis vamos a utilizar herramientas de análisis del ciclo de vida que permiten evaluar el impacto ambiental de la implantación de la sinergia y compararle con el escenario inicial. Como indicador de este impacto usaremos la huella de carbono. El término 'huella de carbono' suele utilizarse para describir el potencial de calentamiento global (GWP) de un determinado producto. Las huellas suelen expresarse en *kg* o en *tCO<sub>2e</sub>* (equivalente de dióxido de carbono), siendo:

$$tCO_{2e} = a \cdot b \quad (4.9)$$

Donde *a* son las toneladas de gas emitidas y *b* el GWP del gas.

El GWP de un gas es su efecto para el calentamiento global en relación a una unidad equivalente de dióxido de carbono durante un plazo de tiempo determinado (normalmente 100 años). Por definición, el dióxido de carbono tiene un GWP de 1, lo que significa que un producto que emite cinco toneladas de *CO<sub>2</sub>* produce una huella de cinco toneladas por GWP 1 *CO<sub>2e</sub>*. De igual manera, un producto que emita dos toneladas de metano (que tiene un GWP de 25 *CO<sub>2e</sub>*) produce una huella igual a dos toneladas por GWP 25 *CO<sub>2e</sub>* o 50 toneladas de *CO<sub>2e</sub>*.

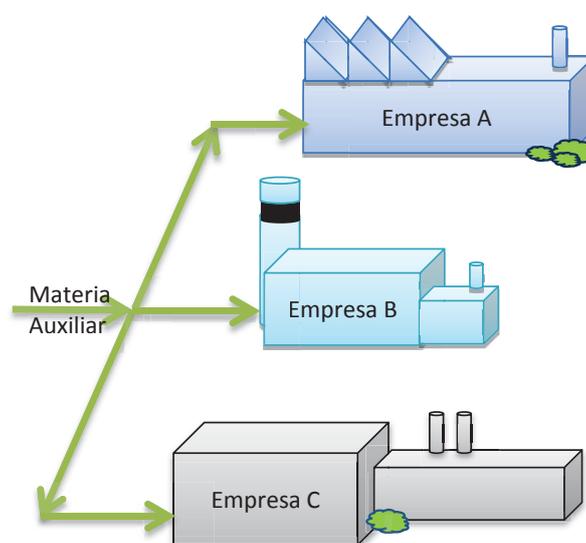
El panel intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC) [59] ha definido y vuelto a definir los GWP de los gases atmosféricos como parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC). Es por esto que suelen

utilizarse los GWP a cien años de la IPCC para los análisis de ciclo de vida; además, se recomienda su uso en las directrices sobre emisiones. En este trabajo se va a utilizar este indicador para calcular mediante SimaPro [57] el impacto ambiental.

### MM1. Proveedor común de materia SAP

#### Descripción de la sinergia

Se trata de una sinergia de mutualización. Para el planteamiento de esta sinergia se han analizado los diferentes consumos de materias de servicios auxiliares de producción (SAP) y los proveedores que suministran a cada empresa. Una vez realizado este análisis, se han detectado los flujos de materia coincidentes dentro de las empresas, detectando así las diferentes materias afines entre empresas. Se han detectado 6 sustancias comunes entre diferentes empresas.



**Figura 4.4:** Representación gráfica de la sinergia MM1 [6]

Se persigue una propuesta de proveedores comunes para conseguir mejoras económicas en el abastecimiento, así como mejoras ambientales en la logística de distribución. En la

Figura 4.4 se observa gráficamente la estructura de funcionamiento de la sinergia de forma genérica para tres empresas cualquiera denominadas A, B y C.

### **Flujos Implicados**

A continuación se detallan las particularidades de cada una de los flujos identificados, nombrando a las empresas como C1, C2 y C3 por motivos de confidencialidad.

#### **- BIOCIDA O HIPOCLORITO C1-C3**

Se comprueba que tanto C1 como C3 consumen biocida en sus sistemas auxiliares. C1 consume 3,38 T/año suministradas por Nalco y C3 589 T/año generadas en las propias instalaciones de C3, en ambos casos es utilizado para la depuración de agua. La cantidad total a suministrar es de 592,38 T/año.

Como conclusiones obtenidas en [6], complementariamente, se plantea que C3 suministre a C1 por tener su propia generación de biocida (Hipoclorito) en sus instalaciones.

#### **- ÁCIDO CLORHÍDRICO C2-C3**

Se comprueba que tanto C2, como C3 consumen ácido clorhídrico en sus sistemas auxiliares. La empresa C2 consume 180 T/año suministradas por Brenntag y C3 4.850 T/año generadas en las propias instalaciones de C3. En los dos casos se utiliza para la disminuir el pH del agua cuando es necesario. La cantidad total a suministrar es de 5.030 T/año.

Como en el caso anterior, se plantea que C3 suministre a la otra empresa por tener generación propia de ácido clorhídrico en sus instalaciones.

#### **- CLORO C1-C2**

Se comprueba que tanto la empresa C1, como C2 consumen cloro en sus sistemas

auxiliares. La empresa C1 consume 0,5 T/año suministradas por Nalco, y C2 consume 3,8 T/año suministradas por Brenntag; en los dos casos se utiliza para la el tratamiento del agua. La cantidad total a suministrar es de 4,3 T/año.

Complementariamente, se plantea que C3 suministre al resto de empresas por tener generación propia de cloro en sus instalaciones.

- SOSA CAÚSTICA C1-C2-C3

Se comprueba que C1, C2 y C3 consumen sosa cáustica en sus sistemas auxiliares. C1 consume 1,2 T/año suministradas por Acideka, C2 consume 25,3 T/año suministradas por Brenntag y C3 25.552 T/año generadas en las propias instalaciones de C3. En C1, C2 y C3 se utiliza para la depuración de agua. La cantidad total a suministrar es de 25.578,5 T/año. Complementariamente, se plantea que C3 suministre al resto de empresas por tener generación propia de sosa cáustica en sus instalaciones.

- OXÍGENO C1-C2 -C3

Se comprueba que C1, C2, y C3 consumen oxígeno en sus sistemas auxiliares. La empresa C1 consume 1 T/año suministradas por Carburos Metálicos, C2 consume 3,6 T/año desconociendo el suministrador, y C3 tiene subcontratado el suministro de este servicio, desconociéndose tanto la cantidad suministrada como el suministrador.

- ACEITES HIDRÁULICOS C1-C2-C3

Se comprueba que C1, C2 y C3 consumen aceites hidráulicos en sus sistemas auxiliares. La empresa C1 consume 4 T/año suministradas por Repsol YPF y Petronas Lubricant, C2 consume 6,6 T/año suministradas por SIGAUS y C3 consume más de 25 T/año teniendo varios suministradores (se aproxima a 26 T/año considerando un margen de error). En todas las empresas se utiliza en maquinaria.

En el caso del Hipoclorito (Biocida), el ácido clorhídrico y el cloro y la sosa cáustica, es la empresa C3 la que puede suministrar un flujo que cubra las necesidades de las otras dos, evitando la entrada de un flujo externo al sistema. Esto implicaría únicamente un aumento de la producción de C3 para proveer al propio sistema. En los otros dos flujos restantes, de oxígeno y aceites hidráulicos, se trabajará con un proveedor común externo, buscando mejoras económicas por el aprovechamiento de economías de escala, y una mejor logística que produzca ahorros económicos y un menor impacto ambiental.

## ANÁLISIS ECONÓMICO

### Costes iniciales e inversión necesaria

La Tabla 4.7 refleja la comparativa de costes anuales entre el caso inicial de gestión de cada uno de los flujos implicados, y el caso posterior a la implantación de la sinergia, tanto a nivel individual como para el conjunto de la red.

Los costes estimados que aparecen en la tabla para cada uno de los flujos en el caso inicial de gestión sin implantación de sinergia, se estiman a partir de fuentes bibliográficas, dada la imposibilidad de conseguir estos datos de manos de las empresas por motivos de confidencialidad y ser datos estratégicos. Estas fuentes ofrecen los datos de precios de adquisición de los flujos implicados a modo de estimación de manera que se disponga de un orden de magnitud, como es el caso de [60, 61]. En estas referencias estos datos se ofrecen a partir de precios de venta al público en productos a granel como es el caso de [60] o de precios considerados como típicos y estimativos a partir de proveedores del material que se considere, como en el caso de [61]. En otros casos los datos se ofrecen como guía para estudiantes o investigadores, como en el caso de [62], de manera que tengan valores aproximados que les permitan realizar estimaciones en orden de magnitud. Los valores se ofrecen en las unidades de precio por cada tonelada de producto, ya que es la unidad del sistema internacional más utilizada en el ámbito productivo para evaluar precios y cantidades de flujo.

El nuevo coste del flujo tras la implantación de la sinergia se estimará a partir del coste de producción estimado en el caso inicial. Para la empresa C3 el aumento de su producción en una cantidad pequeña en comparación con su volumen normal de producción supondrá un aumento en costes pequeño debido al aprovechamiento que se realizaría por las economías de escala y podrá ofrecer ese flujo a las otras dos empresas a un precio más competitivo que el precio habitual de mercado, estimado en este caso para el caso inicial. Para cuantificar el efecto de la economía de escala sobre el aumento de producción de C3 utilizaremos un planteamiento que estima que la empresa C3 podrá ofrecer el flujo intercambiado con una reducción de precio igual al margen de ganancia habitual en el sector productivo de la empresa C3, ofreciendo un precio muy atractivo a las otras dos empresas por debajo del precio habitual del mercado, y manteniendo la empresa C3 un beneficio económico igualmente, que dependerá en este caso de las condiciones particulares de la propia empresa. Ante la imposibilidad de cuantificar este beneficio, en este trabajo se considera el caso más desfavorable en el cual C3 ofrece el flujo a las otras dos empresas al mismo precio que le cuesta producirle.

Un margen de ganancia industrial apropiado para amplios volúmenes de negocio en el sector industrial está estimado en un 8,90% de margen sobre el precio de mercado, basando esta estimación en estudios estadísticos de la consultoría *Butler Consultants* [63]. Ese será el porcentaje de reducción de precio estimado para el flujo que ofrece C3 cuando hace de proveedor a C1 y C2, para el caso de implantación de sinergia.

En el caso del oxígeno y los aceites hidráulicos se hace difícil estimar el alcance que tendrá en el precio la unificación del suministro debido a las economías de escala y la falta de información por parte de las empresas suministradoras que no facilitan datos. En ningún caso el coste sería mayor, pero ante la imposibilidad de cuantificar la reducción se contempla el caso más desfavorable que mantiene el mismo precio. La logística de distribución si que será diferente, por lo que en caso de ser necesario se estudiará esta situación en el análisis de viabilidad ambiental.

En todos los casos para esta sinergia, los costes de transporte desde el proveedor hasta los clientes se consideran dentro del precio que se abona por cada una de las mercancías, por lo que no se contemplan ahorros o diferencias en los costes en los que se incurrirá por el transporte de las mercancías.

### **Beneficio Económicos Esperados**

La Tabla 4.7 refleja en primer lugar empezado por la parte izquierda las cantidades individuales y totales de cada uno de los flujos implicados en la sinergia. En la parte central se realiza la exposición de los costes de cada una de las empresas y según flujos para el caso inicial, basando los mismos en los precios estimados tal y como se explica anteriormente a partir de las referencias bibliográficas. En último lugar se expresan los costes por empresas según los flujos para el caso de implantación de la sinergia y utilizando los precios con la reducción equivalente al margen de ganancia estimado por *Butler Consultants* [63]. Todos los costes están reflejados tanto para los casos individuales de cada flujo y los totales por empresa, como los totales del conjunto de la red en casa caso (inicial o tras implantación), para terminar con el ahorro estimado a nivel individual para cada empresa y para la red como conjunto.

Por lo tanto tal y como refleja la Tabla 4.7, considerándose una diferencia negativa en los costes como un ahorro, se espera un ahorro en el caso más desfavorable tras la implantación de la sinergia, de 2.544,44€/año para el conjunto de la red empresarial. A nivel particular, la empresa C1 obtiene un ahorro de 70,69€/año, la empresa C2 ahorra 2.474,75€/año y la empresa C3 mantiene sus costes exactamente iguales.

$$IEC_{MM1} = \frac{\text{Nuevos Costes de Operación}_{MM1}}{\text{Costes de Operación Iniciales}_{MM1}} = \frac{108,257,39 \text{ €}}{110,801,83 \text{ €}} = 0,97 < 1 \quad (4.10)$$

El Indicador de Eficiencia de Costes calculado en la Ecuación 4.10 tiene un valor menor que 1, por lo que la implantación de la nueva sinergia es rentable en términos de costes de operación. Es necesario evaluar también el indicador para los casos individuales de cada empresa.

$$IEC_{C1} = \frac{\text{Nuevos Costes de Operación}_{C1}}{\text{Costes de Operación Iniciales}_{C1}} = \frac{9,763,26 \text{ €}}{9,833,95 \text{ €}} = 0,99 < 1 \quad (4.11)$$

$$IEC_{C2} = \frac{\text{Nuevos Costes de Operación}_{C2}}{\text{Costes de Operación Iniciales}_{C2}} = \frac{40,415,33 \text{ €}}{42,889,08 \text{ €}} = 0,94 < 1 \quad (4.12)$$

$$IEC_{C3} = \frac{\text{Nuevos Costes de Operación}_{C3}}{\text{Costes de Operación Iniciales}_{C3}} = \frac{58,078,80 \text{ €}}{58,078,80 \text{ €}} = 1 \quad (4.13)$$

El Indicador de Eficiencia de Costes calculado a nivel individual para cada empresa del sistema en las Ecuaciones 4.11, 4.12 y 4.13 tiene un valor menor que 1 en el caso de la empresa C1 y C2, por lo que la implantación de la nueva sinergia es rentable en términos de costes de operación para estas dos empresas. En el caso de la empresa C3, el valor del IEC es igual a 1, por lo que estamos ante un caso crítico. En este caso será aceptable, ya que se está estudiando el caso más desfavorable, por lo que en cualquier otro escenario, el IEC será menor que 1 mostrando la rentabilidad individual en términos de costes de operación para la empresa C3.

Tal y como se explica anteriormente estos ahorros provienen de la ventaja competitiva que supone que la empresa C3 ejerza de proveedora del resto e empresas en cuatro de los

seis flujos implicados. El aprovechamiento de las economías de escala y evitar la entrada de flujos externos realizando un suministro interno en el sistema suponen un beneficio económico para el conjunto del sistema. En el caso de la empresa C3, no se contempla un beneficio económico por considerarse en el cálculo el caso más desfavorable, pero la nueva gestión del flujo y el aumento de producción también ofrecerá un beneficio económico para la empresa aunque en este trabajo sea difícilmente cuantificable con exactitud. Por esta razón se trabaja con el caso más desfavorable posible.

La garantía de ahorros económicos en los costes de operación a nivel individual y como red de empresas, y al no ser necesario recuperar ninguna inversión inicial por parte del sistema, se demuestra como la **implantación de la sinergia MM1 es económicamente viable**.

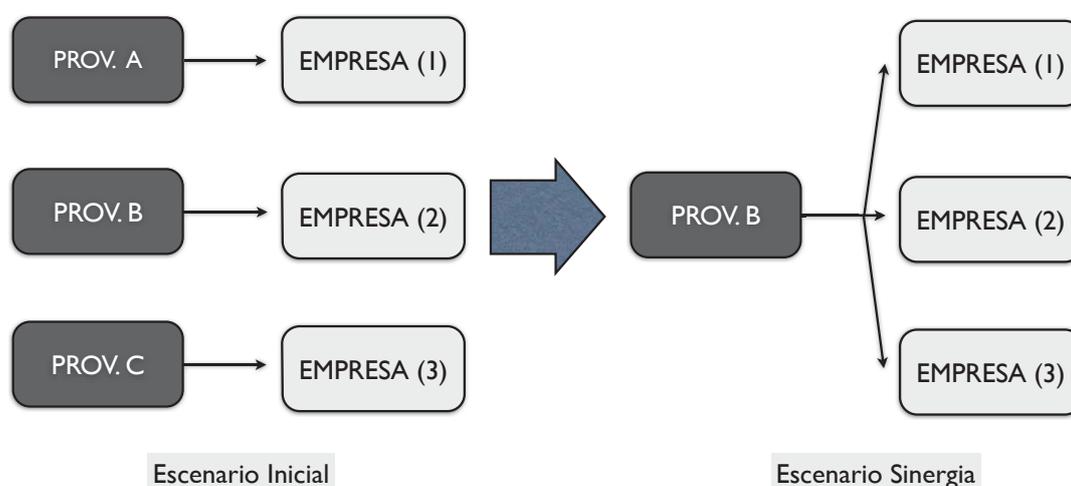
**Tabla 4.7:** Cantidades de flujo implicadas, costes iniciales y costes en escenario inicial y tras la aplicación de la sinergia MMI [6]

SINERGIA MMI: Proveedor Común de Materia SAP													
FLUJO	CANTIDADES FLUJO T/año			COSTES €/año CASO INICIAL			COSTES €/año CASO SINERGIA						
	C1	C2	C3	COSTES	C1	C2	C3	COSTES*	C1	C2	C3		
Hipoclorito	3,38	-	589	174,04 €/T [60]	588,25 €	-	-	158,55 €/T	535,89 €	-	-		
Ácido Clorhídrico	-	180	4.850	137,5 €/T [62]	-	24.750€	-	125,25 €/T	-	22.545€	-		
Cloro	0,5	3,8	-	195€/T [62]	97,5€	741€	-	177,54€/T	88,77€	674,65€	-		
Sosa Cáustica	1,2	25,3	25.552	90€/T [62]	108€	2.277€	-	82€/T	98,4€	2.074,6€	-		
Oxígeno	1	3,6	-	105€/T [62]	105€	378€	-	105€/T	105€	378€	-		
Aceites Hidráulicos	4	6,6	26	2.233,8 €/T [61]	8.935,2€	14.743,08€	58.078,8€	2.233,8€/T	8.935,2€	14.743,08€	58.078,8€		
<b>TOTAL</b>	<b>10,08</b>	<b>219,3</b>	<b>31.017</b>		<b>9.833,95€</b>	<b>42.889,08€</b>	<b>58.078,8€</b>		<b>9.763,20€</b>	<b>40.415,33€</b>	<b>58.078,8€</b>		
	<b>TOTAL RED</b>		<b>31.246,38</b>		<b>TOTAL RED</b>		<b>110.801,83</b>		<b>TOTAL RED</b>		<b>108.257,39€</b>		
					DIFERENCIA DE COSTES INDIVIDUALES						<b>-70,69€</b>	<b>-2.473,75€</b>	
					DIFERENCIA DE COSTES RED						<b>0€</b>	<b>-2.544,44€</b>	

## ANÁLISIS AMBIENTAL

Para el análisis ambiental de la sinergia, dada la estructura que sigue el flujo descrita en la Figura 4.4, se van a estudiar dos escenarios. En el primero de ellos se plantea la situación de aprovisionamiento previamente a la implantación de la sinergia MM1. En este caso existe tres proveedores para cada flujo para las tres empresas diferentes. En el segundo escenario de MM1 se plantea el aprovisionamiento de las tres empresas a través de un proveedor común que aproveche las economías de escala que puedan producirse.

Como se puede comprobar el flujo de materia que entraba al sistema en el caso inicial sigue entrando tras la creación de la sinergia, por lo que no se consigue cerrar ningún ciclo y evitar la existencia del *input*, no produciéndose por tanto ningún beneficio ni cambio en materia de impacto ambiental. Será el ámbito logístico el que aporte el beneficio ambiental al nuevo escenario.



**Figura 4.5:** Estructura de flujo de caso inicial y final de la sinergia MM1

Tal y como muestra la Figura 4.5 la nueva estructura de proveedor común evita el desplazamiento del proveedor o del transporte que realiza el aprovisionamiento desde el origen del mismo hasta cada una de las empresas, ya que la actividad puede realizarse mediante un sólo transporte al complejo, y el posterior transporte interno desde una

empresa a otra. Mediante un análisis de ciclo de vida de este proceso de transporte podemos evaluar la reducción de impacto ambiental que tendrá esta nueva logística de aprovisionamiento.

En este caso de la sinergia MM1 será la empresa C3 la que haga de proveedor común en los flujos de Hipoclorito, Ácido Clorhídrico, Cloro y Sosa, por ser capaz de asumir el suministro al resto de empresas a partir de su propia producción.

En el caso del flujo de Aceites Hidráulicos se utilizará al proveedor más cercano como proveedor común al ser el caso ambientalmente más favorable que cumple con las consideraciones económicas planteadas previamente. En el caso de la empresa C3 no se disponen datos de sus proveedores, por lo que su cálculo se desestima y no se considera relevante en la comparativa de impacto ambiental

Al no disponer de datos sobre proveedores de la empresa C2 y C3 para el flujo de Oxígeno, el cálculo para este flujo no se contempla y permanece inalterado a nivel de cálculo. Por lo tanto, la empresa C3 queda fuera del cálculo de impacto ambiental al no poder cuantificar las diferencias entre el caso inicial y el caso tras la implantación de la sinergias por no disponer de datos sobre sus proveedores.

Las distancias entre el complejo y los proveedores implicados en esta sinergia aparecen en la Tabla 4.8.

**Tabla 4.8:** Distancias entre el complejo industrial y los diferentes proveedores de Materia SAP

Proveedor de Materia SAP	Distancia (km)
Nalco	96,6
Brenntag	120
Acideka	116
Carbueros Metálicos	128
Repsol YPF	105
SIGAUS	22,9

Por lo tanto a raíz de estas distancias, y la tabla de cantidades de cada uno de los flujos, podemos conocer la distancia recorrida en cada caso para realizar el transporte de la materia SAP entre compañías. La tabla 4.9 indica de forma estructurada las cantidades asociadas a cada compañía y flujo y las distancias a recorrer tanto en el caso inicial previo, como al caso posterior a la implantación de la sinergia tal y como se ha planteado el nuevo orden de aprovisionamiento.

### **Escenario Inicial**

En la Figura 4.6 se incluye el árbol del ciclo de vida del proceso de aprovisionamiento en el caso inicial, definiendo como proceso de transporte la entrega del flujo a las empresas del complejo. Se considera constante el impacto ambiental de la producción del flujo, con independencia de cual sea el productor.

En este caso se va a considerar el impacto ambiental de los tres procesos de transporte entre proveedores y compañías que se realizan para el caso inicial. La importancia en el impacto ambiental de cada uno de los procesos se observa mediante el grosor de las flechas de forma equivalente a un diagrama Sankey. Se comprueba como el peso del impacto es para los procesos de transporte, siendo el reparto el correspondiente a la Figura 4.7, donde cada color corresponde a cada uno de los procesos de transporte del flujo a las empresas. El color azul corresponde al total de transportes desde el proveedor hasta la compañía C1 y el color amarillo para el total de transportes entre los proveedores hasta la compañía C2.

El impacto ambiental parcial sobre el total de cada uno de los procesos aparece en la Figura 4.7. Ahí se comprueba como debido a la mayor cantidad de toneladas transportadas y de kilómetros recorridos, el sector amarillo tiene un predominio claro sobre el azul que indica que el mayor peso sobre el total del impacto ambiental del caso inicial recae sobre el proceso de aprovisionamiento de la compañía C2.

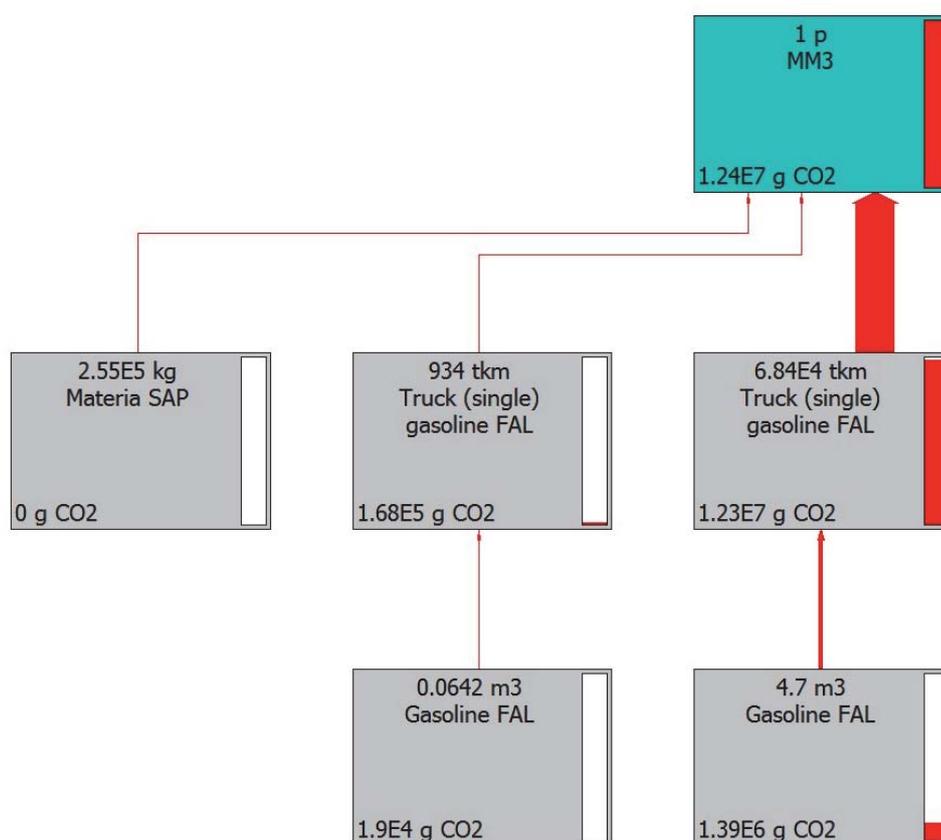
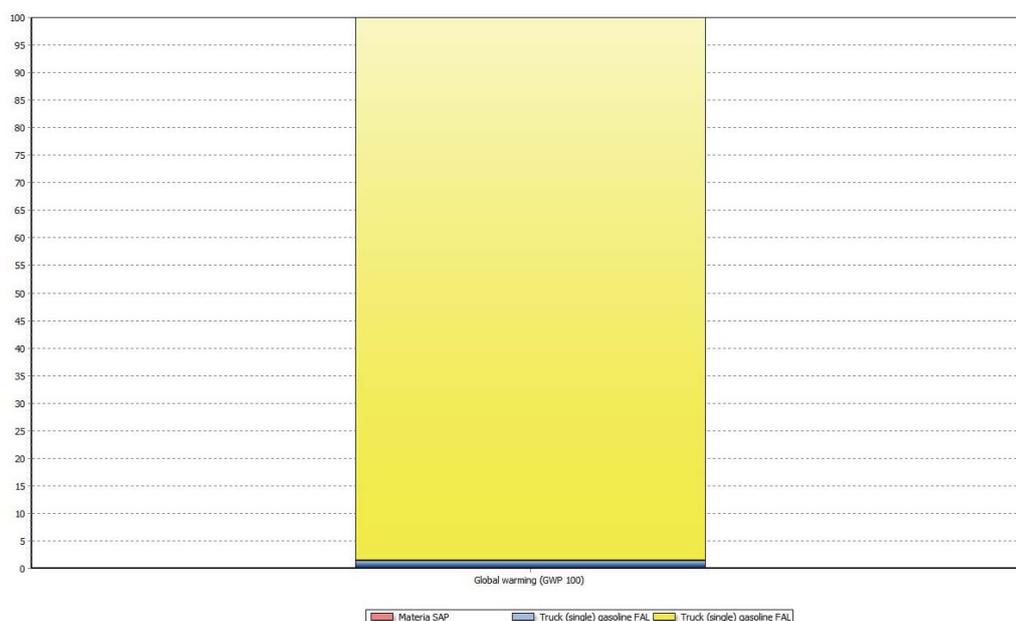


Figura 4.6: Árbol del ciclo de vida del flujo conjunto de materia SAP en escenario inicial de la sinergia MM1

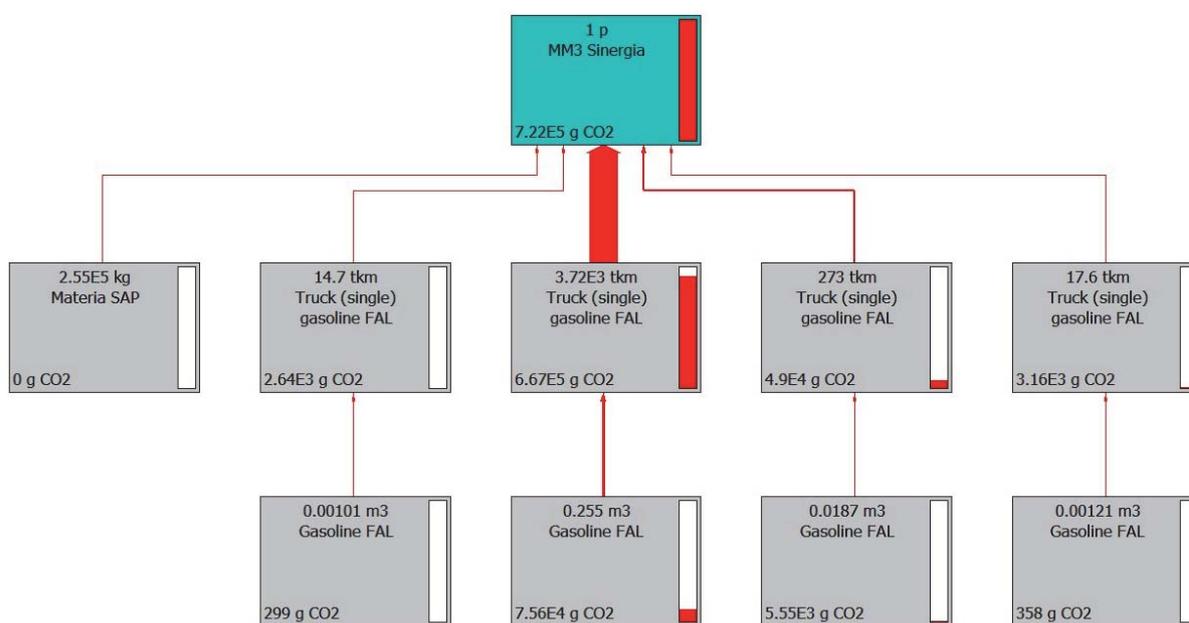
### Escenario con Sinergia Implantada

Este escenario cuenta con un proveedor común para cada flujo implicando a las 3 empresas implicadas, por lo que ambientalmente el árbol de ciclo de vida para este caso tendrá una distribución diferente al caso inicial. La Figura 4.8 muestra como en este caso no todos los transportes suponen el mismo peso en el impacto ambiental final que en el caso inicial, ya que la distancia de los mismos se ha reducido por el beneficio de optar por un proveedor común a una menor distancia. En los flujos donde se disponga de proveedor común, el flujo total entra en el sistema una única vez, redistribuyendo posteriormente las cantidades necesarias por cada empresa dentro del sistema de forma local, evitando así transportes innecesarios. Cabe la posibilidad incluso de que ese nuevo proveedor común sea una de las compañías del sistema, como es el caso actual, siendo



**Figura 4.7:** Relación de pesos de cada proceso sobre el impacto ambiental en escenario inicial de la sinergia MM1

mucho más importante en ese caso la reducción de impacto ambiental.

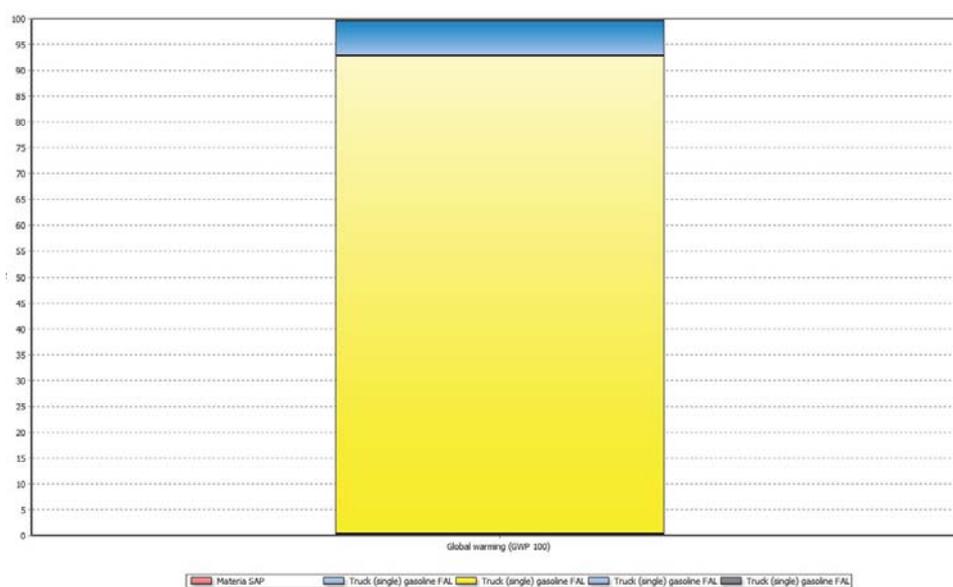


**Figura 4.8:** Árbol del ciclo de vida de la sinergia MM1 tras la implantación de la misma

Dentro de la figura, cada uno de las ramas representa un proceso de transporte di-

ferente. Comenzando por la derecha cada columna corresponde al transporte interno de aceites hidráulicos entre la compañía C1 y C2. La siguiente columna corresponde al transporte de aceites hidráulicos entre el proveedor de los mismos SIGAUS, y la compañía C1. La siguiente columna corresponde al transporte interno entre la compañía C3 como nuevo proveedor de la compañía C2, y la última columna el mismo caso pero como proveedor de la compañía C1.

De nuevo el formato de diagrama Sankey, permite ver como el transporte interno entre la compañía C3 y la compañía C2 es el que absorbe un mayor impacto ambiental debido a la gran cantidad de ácido clorhídrico a transportar. El siguiente proceso de transporte de mayor impacto ambiental es entre el proveedor y la compañía C1, ya que aunque las cantidades son menores, la distancia recorrida es mayor. Los otros dos transportes internos, tienen una relevancia despreciable en materia de impacto ambiental en comparación con los otros casos comentados.



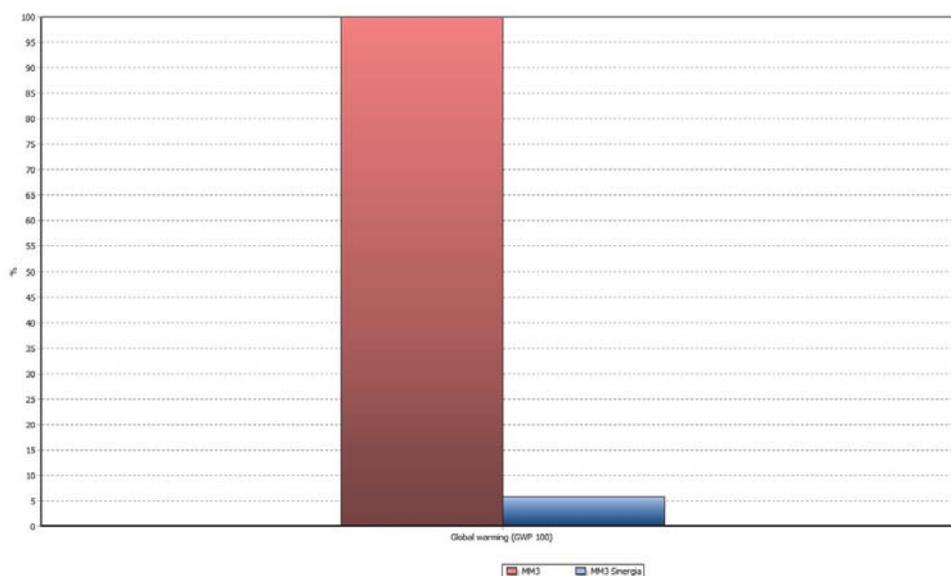
**Figura 4.9:** Relación de pesos de cada proceso sobre el impacto ambiental en escenario de implantación de la sinergia MM1

En la Figura 4.9 se ve de forma clara esta diferencia de pesos sobre el impacto en este escenario de implantación de la sinergia. La parte amarilla del gráfico corresponde

al proceso de transporte entre las compañías C3 y C2 y la parte azul corresponde al transporte entre proveedores y compañía C1. Los otros dos colores apenas distinguibles corresponden a los otros dos trasnportes internos confirmando su baja relevancia sobre el total.

Como en el caso inicial, la Tabla 4.9 en su parte inferior expresa los valores de huella de carbono cuantificados mediante el análisis de ciclo de vida en SimaPro. En este caso se expresa también la diferencia entre el total del impacto del caso inicial y el total del impacto tras la implantación de la sinergia.

La comparativa muestra como se produce el ahorro de **-611.678 tCO<sub>2e</sub>** expresado en la Tabla 4.9, un 94,17% de reducción de la huella de carbono.



**Figura 4.10:** Comparativa de impacto ambiental de los escenarios iniciales y tras implantación de sinergia para la sinergia MM1

De forma gráfica, el análisis de ciclo de vida nos aporta una comparativa de impactos expresada en porcentajes de un escenario sobre el otro y reflejada en la Figura 4.10. El escenario inicial corresponde al color rojo y el escenario de la sinergia al color azul. Confirmada la reducción de impacto ambiental que supone la creación de la sinergia MM1, ésta **formará parte de la red de simbiosis industrial.**

**Tabla 4.9:** Cantidades de flujo implicadas, distancias entre compañías e impacto ambiental asociado en el caso de la sinergia MMI para los escenarios iniciales y con implantación de sinergia

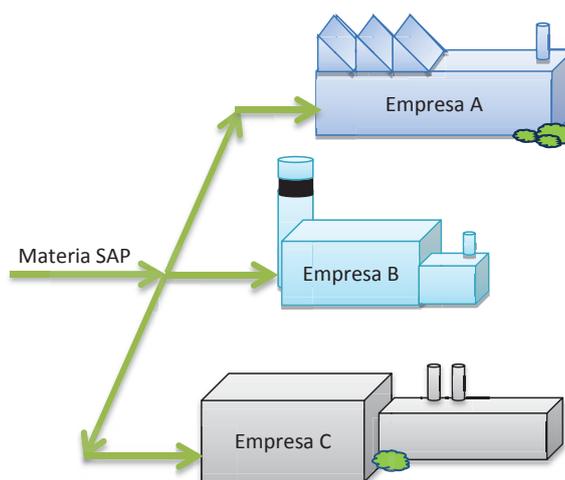
DATOS SOBRE CANTIDADES DE FLUJO Y DISTANCIAS ENTRE COMPAÑÍAS EN LA SINERGA MMI									
FLUJO	CANTIDADES FLUJO T/año			Km de Transporte en Caso Inicial		Km de transporte en Caso con Sinergia			Proveedor-C2
	C1	C2	C3	Proveedor-C1	Proveedor-C2	C3-C1	C3-C2	Proveedor-C1	
Hipoclorito	3,38	-	589	1 x Nalco = 96,6 km.	-	1 Viaje = 2,7 km.	-	-	-
Ácido Clorhídrico	-	180	4.850	-	3xBrenntag = 360 km.	-	5 Viajes = 20 km.	-	-
Cloro	0,5	3,8	-	1 x Nalco = 96,6 km.	1xBrenntag = 120km	1 Viaje = 2,7 km	1 Viaje = 4 km.	-	-
Sosa Cáustica	1,2	25,3	25.552	1xAcideka = 116 km.	1xBrenntag = 120km	1 Viaje = 2,7 km.	1 Viaje = 4 km.	-	-
Oxígeno	1	3,6	-	-	-	-	-	-	-
Aceites Hidráulicos	4	6,6	26	1xRepsol = 105 km.	1xSIGAUS = 22,9 km.	-	-	1xSIGAUS = 22,9 km	1xSIGAUS = 22,9 km
<b>TOTAL</b>	<b>10,08</b>	<b>219,3</b>	<b>31.017</b>	<b>414,2 km.</b>	<b>622,9 km.</b>	<b>8,1 km.</b>	<b>28 km.</b>	<b>22,9 km.</b>	<b>22,9 km.</b>
	<b>TOTAL RED</b>	<b>31.246,38</b>	<b>TOTAL RED</b>	<b>1.037,1 km.</b>	<b>TOTAL RED</b>	<b>TOTAL RED</b>	<b>TOTAL RED</b>	<b>TOTAL RED</b>	<b>81,9 km.</b>
		<b>TOTAL IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>TOTAL IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>12,4 tCO<sub>2e</sub></b>	<b>12,4 tCO<sub>2e</sub></b>	<b>TOTAL IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>TOTAL IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>TOTAL IMPACTO AMBIENTAL</b>	<b>0.722 tCO<sub>2e</sub></b>
									<b>-11.67 tCO<sub>2e</sub></b>

## MM2. Almacenamiento común de materia SAP

### Descripción de la sinergia

Para el planteamiento de esta sinergia se han analizado los diferentes consumos de materias de servicios auxiliares de producción (SAP) y los proveedores que suministran a cada empresa. Una vez realizado este análisis, se han detectado los flujos de materia coincidentes dentro de las empresas, detectando así la afinidad existente. Se han detectado 6 sustancias comunes entre diferentes empresas. Para analizar esta sinergia de mutualidad se comprueban las capacidades de almacenamiento de esas materias y se analizan las empresas que tienen margen suficiente para ofrecer su almacén.

Para conseguir mejoras económicas en el abastecimiento derivadas de la mejor ocupación del suelo, así como mejoras ambientales en la logística de distribución, se persigue una propuesta de almacenamiento común para abastecer la demanda normal y puntual de las empresas involucradas en cada sinergia, la centralización de flujos de materia y la optimización logística para conseguir mejoras económicas en la distribución (habría que suministrar a un punto en vez de a varios). En la Figura 4.11 se observa gráficamente la estructura de funcionamiento de la sinergia



**Figura 4.11:** Representación gráfica de la sinergia MM2 [6]

### **Flujos Implicados**

A continuación se detallan las particularidades de cada una de las sustancias identificadas:

#### **- BIOCIDA O HIPOCLORITO C1-C3**

Se comprueba que tanto C1 como C3 consumen biocida en sus sistemas auxiliares. C1 consume 3,38 T/año suministradas por Nalco y C3 589 T/año generadas en las propias instalaciones de C3, en ambos casos se utiliza para la depuración de agua. La cantidad total a suministrar es de 592,38 T/año.

Analizando las capacidades de los depósitos de almacenamiento de ambas empresas se llega a la conclusión de que C1 no es capaz de almacenar las 592,38 T/año, mientras que sí es posible en C3.

#### **- ÁCIDO CLORHÍDRICO C2-C3**

Se comprueba que tanto C2 como C3 consumen ácido clorhídrico en sus sistemas auxiliares. C2 consume 180 T/año suministradas por Brenntag y C3 4.850 T/año generadas en las propias instalaciones de C3 (Derivados del cloro). En ambos casos se utiliza para disminuir el pH del agua cuando es necesario. La cantidad total a suministrar es de 5.030 T/año.

Analizando las capacidades de los depósitos de almacenamiento de las empresas se llega a la conclusión de que C2 no es capaz de almacenar las 5.030 T/año y C3 podría almacenar este flujo.

#### **- CLORO C1-C2**

Se comprueba que tanto C1, como C2 consumen cloro en sus sistemas auxiliares. C1

consume 0,5 T/año suministradas por Nalco y C2 consume 3,8 T/año suministradas por Brenntag, en los dos casos se utiliza para la el tratamiento del agua. La cantidad total a suministrar es de 4,3, T/año. Analizando las capacidades de los depósitos de almacenamiento de las empresas se llega a la conclusión de que C1 no es capaz de almacenar las 4,3 T/año y que C2 podría hacerlo.

- SOSA CAÚSTICA C1-C2-C3

Se comprueba que C1, C2 y C3 consumen sosa cáustica en sus sistemas auxiliares. C1 consume 1,2 T/año suministradas por Acideka, C2 consume 25,3 T/año suministradas por Brenntag y C3 25.552 T/año generadas en las propias instalaciones de C3. En C1, C2 y C3 se utiliza para la depuración de agua. La cantidad total a suministrar es de 25.578,5 T/año.

Analizando las capacidades de los depósitos de almacenamiento de las empresas se llega a la conclusión de que C1 y C2 no son capaces de almacenar las 25.578,5 T/año y que C3 podrían hacerlo.

- OXÍGENO C1-C2

Se comprueba que C1, C2 y C3 consumen oxígeno en sus sistemas auxiliares. C1 consume 1 T/año suministradas por Carburos Metálicos, C2 consume 3,6 T/año desconociendo el suministrador y C3 tiene subcontratado el suministro de este servicio, desconociéndose tanto la cantidad suministrada como el suministrador.

Al analizar las capacidades de los depósitos de almacenamiento de las empresas, se ha excluido a C3 por faltar datos sobre el consumo y el almacenamiento. Además se llega a la conclusión de que C1 no es capaz de almacenar las 4,6 T/año, que C2 podría almacenarlo.

- ACEITES HIDRÁULICOS C1-C2-C3

Se comprueba que C1, C2 y C3 consumen aceites hidráulicos en sus sistemas auxiliares. C1 consume 4 T/año suministradas por Repsol YPF y Petronas Lubricant, C2 consume 6,6 T/año suministradas por SIGAUS y C3 consume más de 25 T/año teniendo varios suministradores (aproximadamente 26 T/año). En todas las empresas se utiliza en maquinaria.

Al analizar las capacidades de los depósitos de almacenamiento de las empresas. Además se llega a la conclusión de que C1 no es capaz de almacenar las 35,6 T/año y que tanto C2 como C3 podrían hacerlo.

En la Tabla 4.11 se presentan las cantidades de flujo implicadas expresadas en T/año en la sinergia MM2, que debido a que los flujos implicados son los mismos que en la sinergia MM1, son idénticas al caso anterior.

En el caso de los flujos de Hipoclorito (Biocida), el ácido clorhídrico, la sosa cáustica y Aceites Hidráulicos, que llamaremos flujos de **TIPO 1** es la empresa C3 la que puede ejercer de almacén para las otras dos, siendo la empresa C2 la que ejercería de almacén en el caso del cloro y del oxígeno, flujos que llamaremos de **TIPO2** para la empresa C1.

**TIPO 1:** Hipoclorito, Ácido Clorhídrico, Sosa Cáustica y Aceites Hidráulicos.

**TIPO 2:** Oxígeno y Cloro

## ANÁLISIS ECONÓMICO

### Costes iniciales e inversión necesaria

En los informes previos realizados sobre las empresas incluidas en este trabajo [6], se reflejan las capacidades de almacenamiento para cada uno de los flujos implicados, de cada una de las empresas para las materias incluidas en la sinergia MM2 que se recogen a su vez en la Tabla 4.11. Los almacenamientos donde no se aportan datos particulares de

las empresas son casos en los que las empresas no han accedido a aportar datos numéricos, pero han confirmado, en caso de requerirse, la capacidad de asumir los almacenamientos conjuntos que se plantean si fuera necesario.

El hecho de ahorrar espacio de almacenamiento, libera activos a utilizar en otras líneas de producción y puede evitar costes desde dos puntos de vista: En primer lugar en los alquileres de espacios para almacenaje de mercancías y en segundo lugar desde una mejor reordenación de los planes de distribución de las mercancías almacenadas.

Dados los datos de almacenamiento de las empresas C1 y C2, las diferencias enormes entre almacenes de una y otra empresa y la falta de datos acerca de los almacenamientos en algunos casos, es difícil cuantificar los ahorros que se van a producir en las empresas que dejen de utilizar espacio para almacenamiento de determinadas sustancias y el aumento en costes de la empresa que pase a guardar esos elementos, ya que las empresas no aportan datos sobre sus costes de almacenamiento. Por esta razón se contempla el caso más desfavorable donde los costes de almacenamiento se mantendrán constantes tras la implantación de la sinergia.

Por otro lado el hecho de plantear un almacenamiento común de sustancias en una de las empresas del sistema, en este caso C3 y C2 que son aquellas capaces de ejercer esa labor, pueden provocar ahorros logísticos en cuanto a transporte, ya que se evitaría realizar tres viajes de suministro para el sistema, siendo sólo necesario uno y la posterior distribución interna dentro del propio sistema.

### **Beneficios Económicos Esperados**

A partir del nuevo planteamiento de organización logística del suministro de materia SAP al sistema se realiza el cálculo estimativo del ahorro que producirá la nueva reorganización en el conjunto del sistema

La herramienta ACOTRAM es un asistente de cálculo de costes de transporte de mercancías por carretera que ofrece el Ministerio de Fomento del Gobierno de España de manera gratuita a partir del Observatorio de Costes del Transporte que realiza el propio Ministerio de Fomento para la estimación de costes de operación por parte de profesionales del transporte. A partir de esta herramienta, se ofrecen datos estimativos sobre el coste unitario por kilómetro de un transporte por carretera dependiendo del vehículo utilizado para dicho transporte. En este caso se han utilizado datos de costes del 2008 para estimar los costes de transporte en los que se incurrirá para realizar el transporte de materia SAP. En el caso particular de la sinergia MM2, se ha considerado el uso de vehículos cisterna para químicos de 35 toneladas de capacidad como medio de transporte más desfavorable. Estos vehículos son totalmente apropiados para el transporte de líquidos por carretera, estado en el que se encuentran los flujos considerados para su transporte. Como distancia estándar entre los proveedores del complejo y la empresas del complejo se ha considerado 50 kilómetros, estimando por tanto un suministro a nivel regional, que permita el cálculo de posibles ahorros en la logística de transporte para el caso más desfavorable de cercanía al proveedor.

El coste unitario estimado por kilómetro obtenidos con datos de 2008 se actualiza a partir del índice de precios para transporte intermunicipal ofrecido por el Ministerio de Fomento del Gobierno de España. El índice más actual que se indica es para el año 2012, por lo que será el precio que se utilizará en este trabajo. El cálculo final de coste unitario medio por kilómetro estimado por el Ministerio de Fomento está reflejado en la parte superior de la Tabla 4.10. A partir de este precio unitario se calculan los costes de transporte por viaje realizado para el escenario inicial y posterior a la implantación de la sinergia MM2. En el escenario con aplicación de sinergia, se hace necesario distinguir entre los dos tipos de flujos que se estudian, llegando a dos costes diferentes según las empresas implicadas en cada uno de los tipos de flujos.

A partir del cálculo de los costes de transporte por viaje realizado, se calcula la estima-

ción de los costes totales de transporte para cada uno de los escenarios considerados. Este cálculo se refleja en la Tabla 4.11, donde a partir de los viajes estimados para cada flujo teniendo en cuenta el vehículo y cantidades necesarias según sea necesario su suministro, se obtiene un subtotal del coste anual de transporte del conjunto de mercancías SAP. A este coste se le añade el porcentaje de beneficio industrial de la empresa que realiza el transporte y el porcentaje de impuesto sobre el valor añadido. Finalmente se obtiene el coste total anual del transporte para el conjunto de los flujos para ambos escenarios posibles y se realiza la diferencia entre el escenario final tras la implantación de la sinergia MM2 y el escenario inicial previo al estudio. Si la diferencia obtenida es negativa, se prueba la rentabilidad económica de los nuevos costes de operación de la nueva logística de transporte. Al no existir inversión inicial para la implantación de la sinergia MM2, queda probada a su vez la rentabilidad económica final del nuevo escenario de trabajo.

$$IEC_{MM2} = \frac{\text{Nuevos Costes de Operación}}{\text{Costes de Operación Iniciales}} = \frac{696,75 \text{ €}}{2732,2 \text{ €}} = 0,255 < 1 \quad (4.14)$$

El Indicador de Eficiencia de Costes calculado en la Ecuación 4.14 tiene un valor menor que 1, por lo que la implantación de la nueva sinergia es rentable en términos de costes de operación. Como se puede comprobar en la Tabla 4.11 se obtiene un ahorro global en la red de 2.035,25€ al año, un 74,5 % en los costes anuales de transporte del suministro de materia SAP al sistema formado por las empresas, demostrando, al no existir inversión inicial que recuperar, que **la sinergia MM2 es viable económicamente**.

**Tabla 4.10:** Cálculo de Costes de Transporte por Viaje Según Escenario para la Sinergia MM2 [6]

PRECIO MEDIO POR KM. SEGÚN DISTANCIA RECORRIDA		
Transporte intermunicipal. Índice: 1º trimestre de 1999 = 100	< 50km	51 – 100km
2012	140,8	136,8
2008	143,2	144,20
Precio por Km estimado en 2008 por el Ministerio de Fomento		€/km
Carga Completa		1,594
Descargado		1,116
Precio por Km estimado mediante Índice de Precio Medio por Km (2012)		€/km
Carga Completa		1,621
Descargado		1,135
COSTE POR VEHÍCULO EN ESCENARIO INICIAL		
CÁLCULO DE COSTES DE TRANSPORTE POR VIAJE (Flujos TIPO 1 y 2)		
Proveedor - Empresa C1	km	Coste
Carga Completa	50	81,05 €
Desplazamiento sin Carga	50	55,8 €
SUBTOTAL		136,85 €
Proveedor - Empresa C2	km	Coste
Carga Completa	50	81,05 €
Desplazamiento sin Carga	50	55,8 €
SUBTOTAL		136,85 €
Proveedor - Empresa C3	km	Coste
Carga Completa	50	81,05 €
Desplazamiento sin Carga	50	55,8 €
SUBTOTAL		136,85 €
COSTES POR VEHÍCULO EN ESCENARIO DE SINERGIA MM2		
CÁLCULO DE COSTES DE TRANSPORTE POR VIAJE (Flujos TIPO 1)		
Empresa C3 - Empresa C1	km	Coste
Carga Completa	2,7	4,37 €
Desplazamiento sin Carga	2,7	3,01 €
SUBTOTAL		7,38 €
Empresa C3 - Empresa C2	km	Coste
Carga Completa	4	6,48 €
Desplazamiento sin Carga	4	4,46 €
SUBTOTAL		10,94 €
Proveedor - Empresa C3	km	Coste
Carga Completa	50	81,05 €
Desplazamiento sin Carga	50	55,8 €
SUBTOTAL		136,85 €
CÁLCULO DE COSTES DE TRANSPORTE (Flujos TIPO 2)		
Empresa C2 - Empresa C1	km	Coste
Carga Completa	2,6	4,21 €
Desplazamiento sin Carga	2,6	2,90 €
SUBTOTAL		7,11 €
Proveedor - Empresa C2	km	Coste
Carga Completa	50	81,05 €
Desplazamiento sin Carga	50	55,8 €
SUBTOTAL		136,85 €

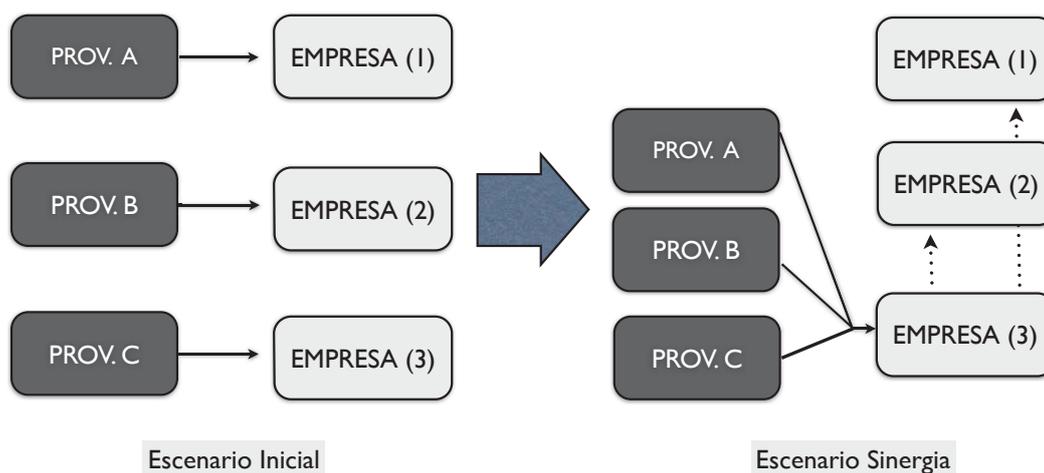
**Tabla 4.11:** Cálculo de Costes Totales de Transporte de Flujos en Escenario Inicial y tras la Implantación de la Sinergia MM2 [6]

SINERGIA MM2: Almacenamiento Común de Materia SAP															
ESCENARIO INICIAL															
FLUJO	CANTIDADES DE FLUJO IMPLICADAS T/año			CAPACIDAD DE ALMACENAJE EN T.			Nº DE TRANSPORTES EN ESCENARIO INICIAL (Vehículo articulado de carga general de 40 Ton.)			Proveedor - C2			Proveedor - C3		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	Proveedor - C1	C2 - C1	C3 - C1	C2 - C1	C3 - C1	C2 - C1	C3 - C1	Provedor - C3	
Hipoclorito	3,38	-	589	0,4	-	S.D.	1	-	-	-	-	-	-	-	
Ácido Clorhídrico	-	180	4.850	-	14.000	S.D.	-	5	-	-	-	-	-	-	
Cloro	0,5	3,8	-	S.D.	S.D.	S.D.	1	-	1	-	-	-	-	-	
Sosa Cáustica	1,2	25,3	25.552	0,4	10.000	S.D.	1	-	1	-	-	-	-	-	
Oxígeno	1	3,6	-	0,3	-	S.D.	1	-	1	-	-	-	-	-	
Aceites Hidráulicos	4	6,6	26	2	20.000	S.D.	1	-	1	-	-	-	-	1	
<b>TOTAL</b>	<b>10,08</b>	<b>219,3</b>	<b>31.017</b>	<b>2</b>	<b>20.000</b>	<b>S.D.</b>	<b>5</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>1</b>	
<b>TOTAL RED</b>			<b>31.246,38</b>			<b>COSTES INDIVIDUALES</b>			<b>684,25 €</b>			<b>1.231,65 €</b>			<b>136,85 €</b>
<b>SUBTOTAL DE COSTES DE TRANSPORTE ANUAL EN ESCENARIO INICIAL</b>															
Beneficio Industrial															
Impuesto sobre el Valor Añadido															
<b>2.052,75 €</b>															
<b>474,18 €</b>															
<b>2.732,2 €</b>															
ESCENARIO TRAS IMPLANTACIÓN DE SINERGIA MM2															
FLUJO	CANTIDADES DE FLUJO IMPLICADAS T/año			CAPACIDAD DE ALMACENAJE EN T.			TIPO 1 (Vehículo articulado de carga general de 40 Ton.)			TIPO 2					
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C3 - C1	C3 - C2	Prov. - C3	C3 - C1	Prov.-C2	Prov.-C3			
Hipoclorito	3,38	-	589	0,4	-	S.D.	1	-	-	-	-	-			
Ácido Clorhídrico	-	180	4.850	-	14.000	S.D.	-	5	-	-	-	-			
Cloro	0,5	3,8	-	S.D.	S.D.	S.D.	1	-	1	-	-	-			
Sosa Cáustica	1,2	25,3	25.552	0,4	10.000	S.D.	1	-	1	-	-	-			
Oxígeno	1	3,6	-	0,3	-	S.D.	1	-	1	-	-	-			
Aceites Hidráulicos	4	6,6	26	2	20.000	S.D.	1	-	1	-	-	-			
<b>TOTAL</b>	<b>10,08</b>	<b>219,3</b>	<b>31.017</b>	<b>2</b>	<b>20.000</b>	<b>S.D.</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	<b>2</b>			
<b>TOTAL RED</b>			<b>31.246,38</b>			<b>COSTES INDIVIDUALES</b>			<b>22,14 €</b>			<b>136,85 €</b>			<b>14,22 €</b>
<b>SUBTOTAL DE COSTES DE TRANSPORTE ANUAL CON SINERGIA MM2</b>															
Beneficio Industrial															
Impuesto sobre el Valor Añadido															
<b>523,49 €</b>															
<b>52,34 €</b>															
<b>120,92 €</b>															
<b>696,75 €</b>															
<b>-2.035,45 €</b>															

S.D. = Sin Datos

## ANÁLISIS AMBIENTAL

La Figura 4.12 representa los dos escenarios, inicial y posterior a la implementación de la sinergia MM2, que se dan en el caso del almacenamiento común de materia SAP.



**Figura 4.12:** Estructura de flujos de caso inicial y final de la sinergia MM2

La sinergia MM1 y MM2 son sinergias complementarias ya que la sinergia plantea un suministro común de materia SAP, que implica un escenario de transportes equivalente al que se plantea en la sinergia MM2 con un almacenamiento común de materia SAP. Por lo tanto se considera que la sinergia MM2 a nivel ambiental se encuentra integrada dentro de la sinergia MM1. Por esta razón, identificada la viabilidad técnica de la sinergia MM1, y estando la sinergia MM2 integrada en ella, la implementación de MM1 incluirá los efectos tanto ambientales como económicos de la implementación de MM2.

### MM3. Gestión conjunta de residuos peligrosos

#### Descripción de la Sinergia

Para el planteamiento de esta sinergia se han analizado los diferentes flujos de residuos peligrosos que se generan en las empresas, así como las formas de gestión de cada residuo. Una vez realizado este análisis, se han detectado los flujos de residuos peligrosos coincidentes dentro de las empresas, detectando así la afinidad entre ellas. Se han identificado 9 flujos residuales comunes entre diferentes empresas. Se persigue una propuesta de gestión común de los residuos peligrosos para conseguir mejoras económicas, así como mejoras ambientales debido a mejoras en la organización y la gestión del transporte de los flujos implicados. En la Figura 4.13 se observa gráficamente la estructura de funcionamiento de la sinergia

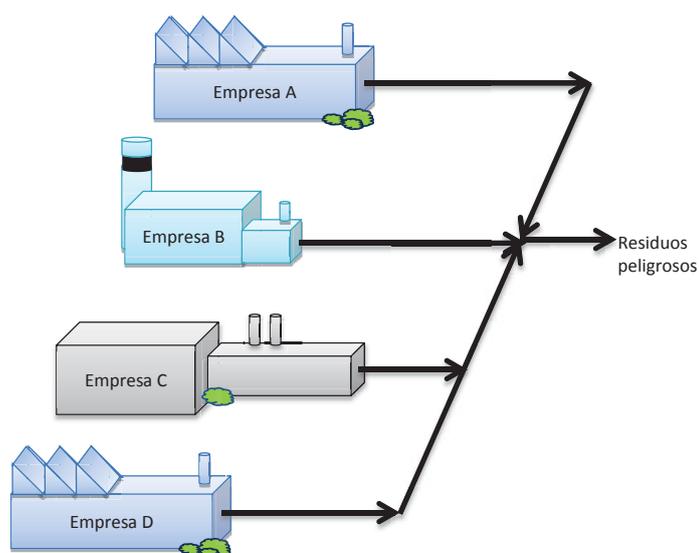


Figura 4.13: Representación gráfica de la sinergia MM3 [6]

#### Flujos Implicados

A continuación se detallan las particularidades de cada una de las sustancias identificadas:

- AGUAS CON HIDROCARBUROS C1-C3

Se comprueba que tanto C1 como C3 generan aguas con hidrocarburos en sus instalaciones. C1 genera 3,8 T/año gestionadas por Agrisa S.L. y C3 33,5 T/año gestionadas por Lunagua S.L. El flujo total a tratar es de 37,3 T/año.

- ENVASES METÁLICOS Y PLÁSTICOS CON SUSTANCIAS PELIGROSAS C1-C3

Se comprueba que tanto C1 como C3 generan envases metálicos y plásticos con sustancias peligrosas en sus instalaciones. C1 genera 60,2 T/año gestionadas por Sercontrol y Elmet y C3 3,5 T/año gestionadas por Lunagua S.L. El flujo total a tratar es de 63,7 T/año.

- SÓLIDOS IMPREGNADOS EN RESIDUO OLEOSO C2-C3

Se comprueba que tanto C2 como C3 generan sólidos impregnados en residuos oleosos en sus instalaciones. C2 genera 7,8 T/año gestionadas por Lunagua S.L. y C3 5,1 T/año gestionadas por Lunagua S.L. El flujo total a tratar es de 12,9 T/año.

- FILTROS DE ACEITE C1-C2-C3

Se comprueba que tanto C1, como C2 y C3 generan residuos de filtros de aceite en sus instalaciones. C1 genera 0,1 T/año gestionadas por Agrisa S.L., C2 genera 0,2 T/año gestionadas por Agrisa S.L. y C3 13,2 T/año gestionadas por Lunagua S.L. El flujo total a tratar es de 13,9 T/año.

- EQUIPOS CON COMPONENTES PELIGROSOS C1-C3

Se comprueba que tanto C1 y C3 generan residuos de equipos con componentes peligrosos en sus instalaciones. C1 genera 0,5 T/año gestionadas por Agrisa S.L. y C3 1,6

T/año gestionadas por Lunagua S.L. El flujo total a tratar es de 2,1 T/año.

- DISOLVENTE ORGÁNICO NO HALOGENADO C1-C2-C3

Se comprueba que tanto C1, como C2 y C3 generan residuo de disolvente orgánico no halogenado en sus instalaciones. C1 genera 0,4 T/año gestionadas por Safety Kleen, C2 genera 0,9 T/año gestionadas también por Safety Kleen y C3 0,1 T/año gestionadas por Lunagua S.L. El flujo total a tratar es de 1,4 T/año.

- BATERIAS C1-C2-C3

Se comprueba que tanto C1, como C2, como C3 generan residuo de baterías en sus instalaciones. C1 genera 0,4 T/año gestionadas por Hoyve, C2 genera 2 T/año gestionadas por A. Berrio y C3 0,1 T/año gestionadas por Cespa Contén. El flujo total a tratar es de 2,9 T/año.

- TUBOS FLUORESCENTES (C1-C2-C3)

Se comprueba que tanto C1, como C2, como C3 generan residuo de tubos fluorescentes en sus instalaciones. C1 genera 0,2 T/año gestionadas por Recypilas S.A., C2 genera 0,6 T/año gestionadas por Recypilas S.A. y C3 0,5 T/año gestionadas por Cespa Contén. El flujo total a tratar es de 1,3 T/año.

- ACEITES USADOS C1-C2-C3

Se comprueba que C1, C2 y C3 generan residuo de aceites en sus instalaciones. La empresa C1 genera 2,2 T/año, C2 genera 26,2 T/año y C3 24,7 T/año, gestionadas todas ellas por Lunagua S.L. gratuitamente. El flujo total a tratar es de 53,1 T/año.

## **ANÁLISIS ECONÓMICO**

### **Costes iniciales e inversión necesaria**

Existen dos puntos en los que estudiar el impacto de la implantación de la sinergia MM3. El primero de ellos sería en el nuevo coste que supondrá la gestión por terceros del nuevo flujo unificado, y por otro lado el efecto que supondrá a nivel logístico la nueva reordenación de los flujos individuales en un único flujo para el sistema.

El hecho de plantear una gestión común de residuos peligrosos entre las empresas del sistema, puede provocar ahorros en los costes de gestión debido a las economías de escala que se generen a partir de la unificación de los flujos. Ante la imposibilidad de cuantificar los efectos sobre el coste de gestión de los residuos a través de los gestores debido a las economías de escala, se considera el caso más desfavorable en el que los costes de gestión del flujo unificado de residuos peligrosos permanecen igual a los costes de gestión individual de cada flujo previos a la implantación de la sinergia MM3.

La implementación de un flujo unificado de residuos peligrosos para su gestión, produce a su vez cambios en el sistema logístico de transporte. Estos cambios pueden suponer ahorros en los costes asociados al transporte de dichos residuos hasta el gestor pertinente, ya que se evitarán viajes directos entre sistema y gestor, pudiendo aprovechar la unificación del flujo dentro del propio sistema para posteriormente realizar un único transporte que conecte el sistema y el gestor de los residuos peligrosos.

### **Beneficios Económicos Esperados**

Dado que se ha considerado el caso más desfavorable para los costes de gestión del flujo unificado, no se producirá reducción de costes a considerar para la rentabilidad de la sinergia.

Por otro lado la reorganización de la logística de distribución del nuevo flujo unificado

si que provocará cambios en los costes asociados al transporte del flujo, que han de ser estimados para garantizar la rentabilidad de la implantación de la sinergia MM3. La herramienta ACOTRAM es un asistente de cálculo de costes de transporte de mercancías por carretera que ofrece el Ministerio de Fomento del Gobierno de España de manera gratuita a partir del Observatorio de Costes del Transporte que realiza el propio Ministerio de Fomento para la estimación de costes de operación por parte de profesionales del transporte. A partir de esta herramienta, se ofrecen datos estimativos sobre el coste unitario por kilómetro de un transporte por carretera dependiendo del vehículo utilizado para dicho transporte. En este caso se han utilizado datos de costes del 2008 para estimar los costes de transporte en los que se incurrirá para realizar el transporte de residuos peligrosos del sistema de empresas hasta el gestor del flujo. En el caso particular de la sinergia MM3, se ha considerado el uso de vehículos articulados de carga general de 40 toneladas de capacidad, totalmente apropiados para el transporte por carretera de los residuos peligrosos en caso de cumplirse la normativa establecida para el caso de materias peligrosas. Las distancias por carretera desde el complejo industrial hasta cada uno de los gestores se expresan en la Tabla 4.12. Éstas serán las distancias a considerar para el cálculo de los costes en transporte previos y posteriores a la implantación de la sinergia.

**Tabla 4.12:** Distancias entre el complejo industrial y los diferentes gestores de residuos peligrosos

Gestor de Residuos Peligrosos	Distancia (km)
Sercontrol	143
Lunagua	28,2
Agrisa	22
Safety Kleen	169
Hoyve	2
Cespa Conten	136
Recypilas	117
A. Berrio	4,8

El coste unitario estimado por kilómetro obtenidos con datos de 2008 se actualiza

a partir del índice de precios para transporte intermunicipal ofrecido por el Ministerio de Fomento del Gobierno de España. El índice más actual que se indica es para el año 2012, por lo que será el precio que se utilizará en este trabajo. El cálculo final de coste unitario medio por kilómetro estimado por el Ministerio de Fomento está reflejado en la parte superior de la Tabla 4.13. A partir de este precio unitario se calculan los costes de transporte por viaje realizado para el escenario inicial y posterior a la implantación de la sinergia MM3. Se considera en este caso que la unificación del flujo se realizará en la empresa C3, por ser la empresa que mayor cantidad de residuos peligrosos aporta al flujo unificado, y que servirá a modo de parada final donde llenar la carga del transporte para su traslado al gestor. De la misma manera se utilizará como gestor final para el flujo unificado aquel que sea más cercano al complejo industrial.

A partir del cálculo de los costes de transporte por viaje realizado entre empresa y gestor, se calcula la estimación de los costes totales de transporte para cada uno de los escenarios considerados. Este cálculo se refleja en la Tabla 4.14, donde a partir de los viajes estimados para unificar el flujo teniendo en cuenta el vehículo y cantidades a entregar al gestor, se obtiene un subtotal del coste anual de transporte del conjunto de residuos peligrosos. A este coste se le añade el porcentaje de beneficio industrial de la empresa que realiza el transporte y el porcentaje de impuesto sobre el valor añadido. Finalmente se obtiene el coste total anual del transporte para ambos escenarios posibles y se realiza la diferencia entre el escenario final tras la implantación de la sinergia MM3 y el escenario inicial previo al estudio. Si la diferencia obtenida es negativa, se prueba la rentabilidad económica de los nuevos costes de operación de la nueva logística de transporte. Al no existir inversión inicial para la implantación de la sinergia MM3, queda probada a su vez la rentabilidad económica final del nuevo escenario de trabajo.

$$IEC_{MM3} = \frac{\text{Nuevos Costes de Operación}_{MM3}}{\text{Costes de Operación Iniciales}_{MM3}} = \frac{1,123,66 \text{ €}}{3,619,42 \text{ €}} = 0,31 < 1 \quad (4.15)$$

El Indicador de Eficiencia de Costes calculado en la Ecuación 4.15 tiene un valor menor que 1, por lo que la implantación de la nueva sinergia es rentable en términos de costes de operación. Como se puede comprobar en la Tabla 4.14 se obtiene un ahorro global en la red de 2.495,76€ al año, un 68,95% en los costes anuales de transporte del flujo unificado de residuos peligrosos del conjunto del sistema al gestor pertinente, demostrando, al no existir inversión inicial que recuperar, que **la sinergia MM3 es viable económicamente.**

**Tabla 4.13:** Cálculo de Costes de Transporte por Viaje Según Escenario para la Sinergia MM3 [6]

PRECIO MEDIO POR KM. SEGÚN DISTANCIA RECORRIDA					
Transporte intermunicipal. Índice: 1º trimestre de 1999 = 100		< 50km	51 – 100km		
2012		140,8	136,8		
2008		143,2	144,20		
Precio por Km estimado en 2008 por el Ministerio de Fomento				€/km	
Carga Completa				1,016	
Descargado				1,196	
Precio por Km estimado mediante Índice de Precio Medio por Km (2012)				€/km	
Carga Completa				0,998	
Descargado				1,176	
COSTE POR VEHÍCULO EN ESCENARIO INICIAL					
CÁLCULO DE COSTES DE TRANSPORTE POR VIAJE (Residuos Peligrosos)					
Complejo - Sercontrol	km	Coste	Complejo - Safety Kleen	km	Coste
Carga Completa	143	142,71	Carga Completa	169	168,66 €
Desplaz. sin Carga	143	168,16	Desplaz. sin Carga	169	198,74 €
SUBTOTAL		310,87 €	SUBTOTAL		367,4 €
Complejo - Lunagua	km	Coste	Complejo - Hoyve	km	Coste
Carga Completa	28,2	28,14	Carga Completa	2	1,99 €
Desplaz. sin Carga	28,2	33,16	Desplaz. sin Carga	2	2,35 €
SUBTOTAL		61,3 €	SUBTOTAL		4,34 €
Complejo - Agrisa	km	Coste	Complejo - Cespa Conten	km	Coste
Carga Completa	22	21,95	Carga Completa	136	135,72 €
Desplaz. sin Carga	22	25,87	Desplaz. sin Carga	136	159,93 €
SUBTOTAL		47,82 €	SUBTOTAL		295,65 €
Complejo - A.Berrio	km	Coste	Complejo - Recyplas	km	Coste
Carga Completa	4,8	4,79	Carga Completa	117	116,76 €
Desplaz. sin Carga	4,8	5,64	Desplaz. sin Carga	117	137,59 €
SUBTOTAL		10,43 €	SUBTOTAL		274,15 €
COSTES POR VEHÍCULO EN ESCENARIO DE SINERGIA MM3					
CÁLCULO DE COSTES DE TRANSPORTE POR VIAJE (Residuos Peligrosos)					
Empresa C1 - Empresa C3		km	Coste		
Carga Completa		2,7	2,69 €		
Desplazamiento sin Carga		2,7	3,17 €		
SUBTOTAL		5,86 €			
Empresa C2 - Empresa C3		km	Coste		
Carga Completa		4	1,86 €		
Desplazamiento sin Carga		4	4,70 €		
SUBTOTAL		6,56 €			
Complejo - Agrisa	km	Coste	Complejo - Lunagua	km	Coste
Carga Completa	22	21,95	Carga Completa	28,2	28,14 €
Desplaz. sin Carga	22	25,87	Desplaz. sin Carga	28,2	33,16 €
SUBTOTAL		47,82 €	SUBTOTAL		61,3 €
Complejo - A.Berrio	km	Coste	Complejo - Recyplas	km	Coste
Carga Completa	4,8	4,79	Carga Completa	117	116,76 €
Desplaz. sin Carga	4,8	5,64	Desplaz. sin Carga	117	137,59 €
SUBTOTAL		10,43 €	SUBTOTAL		274,15 €

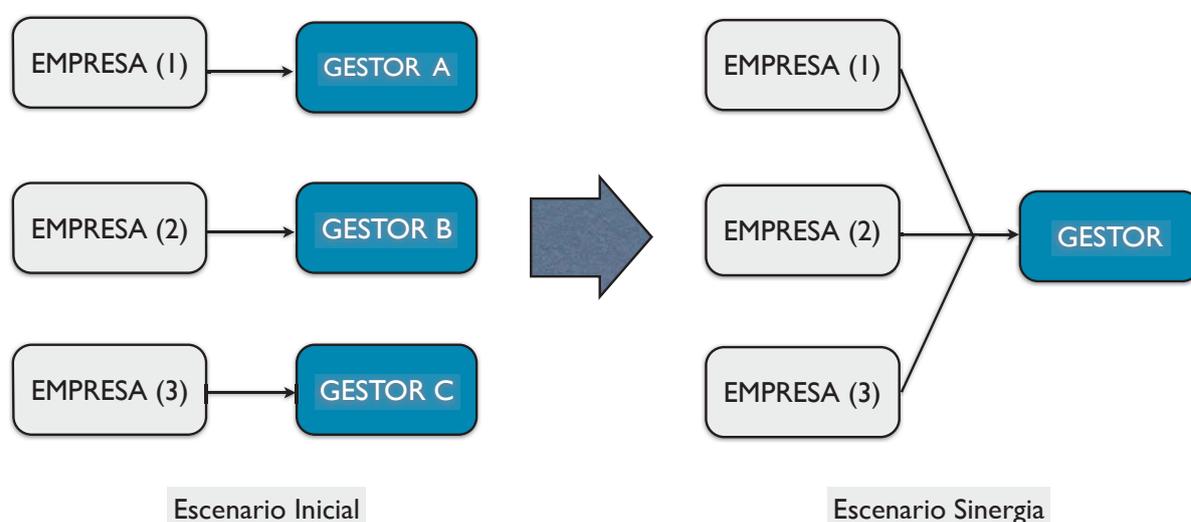
Tabla 4.14: Cálculo de Costes Totales de Transporte de Flujos en Escenario Inicial y con Sinergia MM3 [6]

SINERGIAS MM3: Gestor Común de Residuos Peligrosos						
ESCENARIO INICIAL						
FLUJO	CANT. FLUJO IMPLICADAS T/año		Nº DE TRANSPORTES EN ESCENARIO INICIAL (Vehículo articulado de carga general de 40 Ton.)			
	C1	C2	C3	C1- Gestor	C2- Gestor	C3- Gestor
Aguas con Hidrocarburos	3,8	-	33,5	1 x Agrisa = 47,82 €	-	1 x Lunagua = 61,3 €
Envases con Sustancias Peligrosas	60,2	-	3,5	2 x Sercontrol = 336,32 €	-	1 x Lunagua = 61,3 €
Sólidos Impregnados en Residuo Oleoso	-	7,8	5,1	-	1 x Lunagua = 61,3 €	1 x Lunagua = 61,3 €
Filtros de Aceite	0,5	-	1,6	1 x Agrisa = 47,82 €	-	1 x Lunagua = 61,3 €
Equipos con Componentes Peligrosos	0,1	0,2	13,2	1 x Agrisa = 47,82 €	1 x Agrisa = 47,82 €	1 x Lunagua = 61,3 €
Disolvente Orgánico Halogenado	0,4	0,9	0,1	1 x S. Kleen = 367,4 €	1 x S. Kleen = 367,4 €	1 x Lunagua = 61,3 €
Baterías y Tubos Fluorescentes	0,6	2,6	0,6	1 x Recypilas = 274,15 €	1 x Recypilas = 274,15 €	1 x Cespa C. = 295,65 €
Aceites Usados	2,2	26,2	24,7	1 x Lunagua = 61,3 €	1 x Lunagua = 61,3 €	1 x Lunagua = 61,3 €
TOTAL	67,8	37,7	82,3			
TOTAL RED	187,8			1.182,63 €	811,97 €	724,75 €
SUBTOTAL DE COSTES DE TRANSPORTE ANUAL EN ESCENARIO INICIAL						
				Beneficio Industrial	+10 %	271,93 €
				Impuesto sobre el Valor Añadido	+21 %	628,14 €
						3.619,42 €
TOTAL DE COSTES DE TRANSPORTE ANUAL EN ESCENARIO INICIAL						
ESCENARIO TRAS IMPLANTACIÓN DE LA SINERGIAS MM3						
FLUJO	CANT. FLUJO IMPLICADAS T/año		Nº DE TRANSPORTES EN ESCENARIO CON SINERGIAS (Vehículo articulado de carga general de 40 Ton.)			
	C1	C2	C3	C1 - C3	C2 - C3	C3 - Gestor
Aguas con Hidrocarburos	3,8	-	33,5	1	-	1 x Lunagua = 61,3 €
Envases con Sustancias Peligrosas	60,2	-	3,5	2	-	2 x Lunagua = 122,6 €
Sólidos Impregnados en Residuo Oleoso	-	7,8	5,1	-	1	1 x Lunagua = 61,3 €
Filtros de Aceite	0,5	-	1,6	1	-	1 x Lunagua = 61,3 €
Equipos con Componentes Peligrosos	0,1	0,2	13,2	1	1	1 x Lunagua = 61,3 €
Disolvente Orgánico Halogenado	0,4	0,9	0,1	1	1	1 x Lunagua = 61,3 €
Baterías y Tubos Fluorescentes	0,6	2,6	0,6	1	1	1 x Recypilas = 274,15 €
Aceites Usados	2,2	26,2	24,7	1	1	2 x Lunagua = 122,6 €
TOTAL	67,8	37,7	82,3	8	5	
TOTAL RED	187,8			46,88 €	32,8 €	825,82 €
SUBTOTAL DE COSTES DE TRANSPORTE ANUAL EN ESCENARIO CON SINERGIAS						
				Beneficio Industrial	+10 %	90,55 €
				Impuesto sobre el Valor Añadido	+21 %	209,18 €
						1.414,44 €
DIFERENCIA DE COSTES ENTRE ESCENARIO INICIAL Y TRAS IMPLANTACIÓN DE SINERGIAS MM3						
						<b>-2.204,98 €</b>

S.D. = Sin Datos

## ANÁLISIS AMBIENTAL

El análisis ambiental de la sinergia tiene una estructura descrita en la Figura 4.14, donde el flujo de residuos pasa de ser gestionado por tres entidades distintas a ser unificado para su gestión conjunta. El flujo de residuos que sale del sistema en este caso permanece constante, no habiendo aprovechamientos de algún residuo en alguna actividad dentro del sistema, pero si que se producen diferencias de impacto ambiental en la nueva distribución logística que plantea la sinergia.

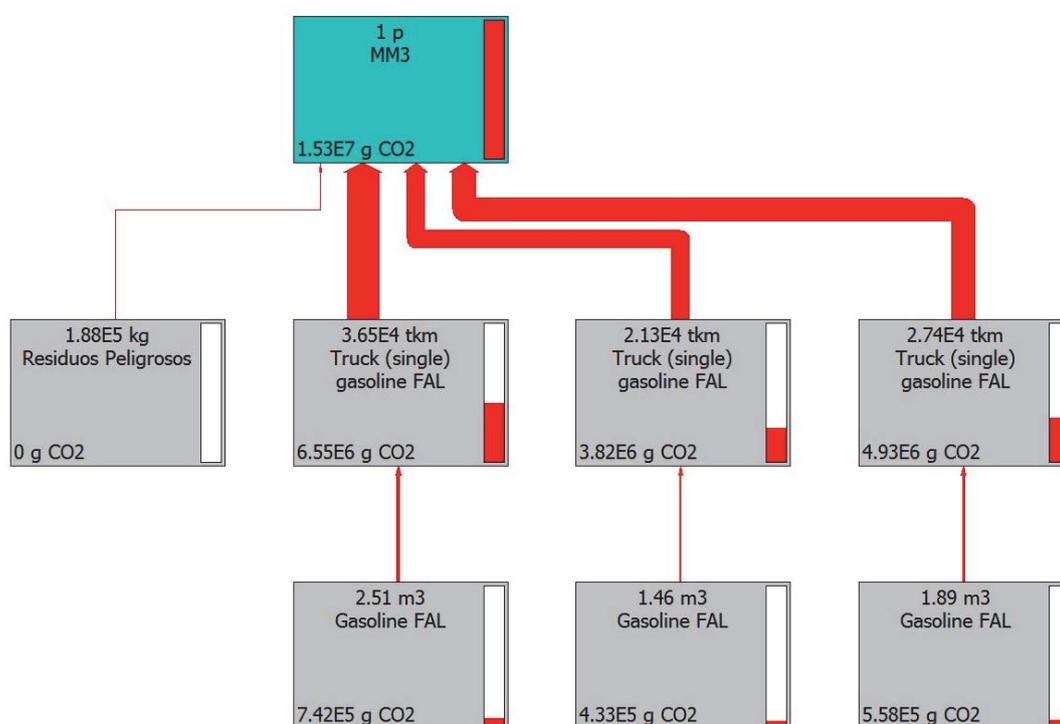


**Figura 4.14:** Estructura de flujo de caso inicial y final de la sinergia MM3

Como se puede comprobar en la Figura 4.14 la nueva estructura de gestión común evita el transporte de los residuos desde el sistema hasta cada gestor individual, ya que puede realizarse mediante un sólo transporte que lleve el flujo de residuos hasta el gestor común unificando previamente los flujos de todas las compañías implicadas de forma interna. Mediante un análisis de ciclo de vida de este proceso de transporte podemos evaluar la reducción de impacto ambiental que tendrá esta nueva logística de gestión de residuos peligrosos.

### Escenario Inicial

En la Figura 4.15 se incluye el árbol del ciclo de vida del proceso de transporte del flujo de residuos en el caso inicial. Está formado por el flujo de residuos a transportar, que no tiene relevancia en cuanto a reducción de impacto, por ser siempre la misma cantidad, y por los tres procesos de transporte que se realizan en el caso inicial. La importancia en el impacto ambiental de cada uno de los procesos se observa mediante el grosor de las flechas de forma equivalente a un diagrama Sankey.



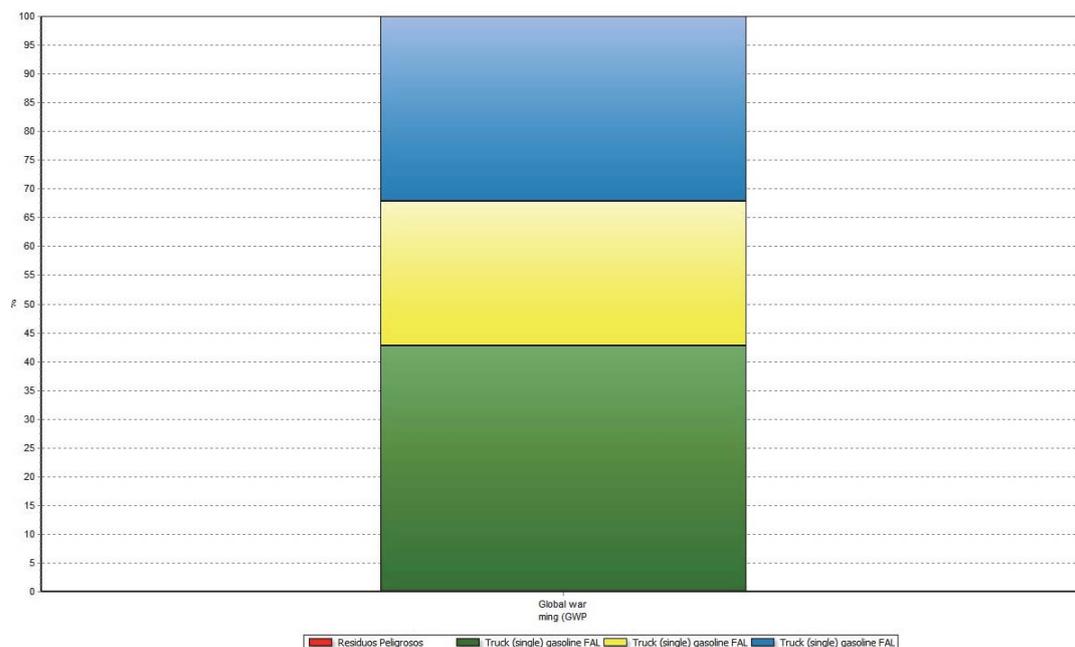
**Figura 4.15:** Árbol del ciclo de vida del Flujo en escenario inicial de la sinergia MM3

La Figura 4.16, donde cada color corresponde a cada uno de los procesos de transporte del flujo a las empresas, representa para cada trayecto de transporte, el porcentaje sobre el total del impacto ambiental asociado al conjunto de la sinergia.

El color verde representa el impacto ambiental asociado a la compañía C1, el color amarillo a la compañía C2 y el color azul a la compañía C3, para el total de desplaza-

mientos hasta los gestores correspondientes.

El impacto parcial y total queda expresado de forma numérica en la Tabla 4.15. Allí se expresan las distancias a recorrer según los viajes que se realizará a cada uno de los gestores y el total de kilómetros a recorrer con el correspondiente impacto ambiental que provocará.



**Figura 4.16:** Relación de pesos de cada proceso sobre el impacto ambiental en escenario inicial de la sinergia MM3

### Escenario con Sinergia Implantada

Este escenario cuenta con un gestor común, en cada caso, para cada uno de los flujos unificados de residuos peligrosos de las tres empresas del sistema, por lo que ambientalmente el árbol de ciclo de vida tendrá una distribución diferente al caso inicial. la Figura 4.17 muestra como, aunque la distribución del árbol sigue reflejando tres procesos de transporte del flujo, no todos los transporte suponen el mismo peso en el impacto ambiental final, ya que la distancia de los mismos se ha reducido por el beneficio de optar por un gestor común. Tras la aplicación de la sinergia, el flujo abandona el sistema mediante

**Tabla 4.15:** Impacto ambiental parcial y total de los procesos de transporte iniciales de la sinergia MM3

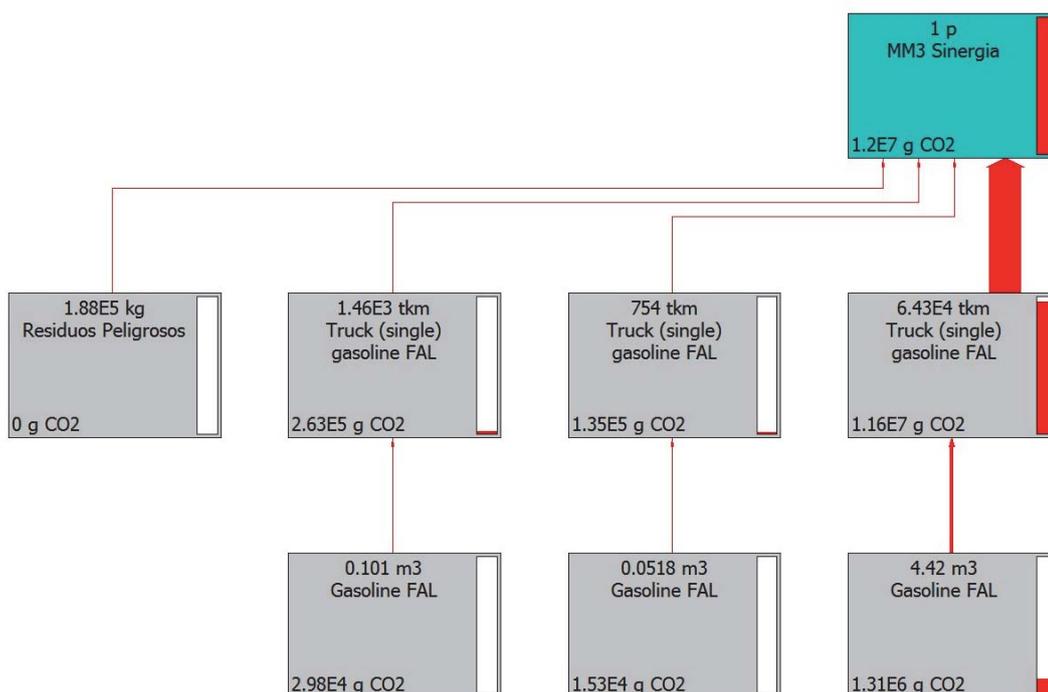
PROCESO	KM	IMPACTO (GWP) en $tCO_{2e}$
Impacto ambiental Transporte C1 - Gestores		
3 x Agrisa	66 km	
2 x Sercontrol	286 km	
1 x Kleen	169 km	
1 x Recypilas	117 km	
<b>SUBTOTAL</b>	538 km	<b>6,55 <math>tCO_{2e}</math></b>
Impacto ambiental Transporte C2 - Gestores		
2 x Lunagua	56,4 km	
1 x Agrisa	22 km	
1 x Kleen	169 km	
1 x Recypilas	117 km	
<b>SUBTOTAL</b>	564,4 km	<b>3,82 <math>tCO_{2e}</math></b>
Impacto ambiental Transporte C3 - Gestores		
7 x Lunagua	197,4 km	
1 x Cespa	136 km	
<b>SUBTOTAL</b>	333,4 km	<b>4,93 <math>tCO_{2e}</math></b>
<b>TOTAL</b>		<b>15,3 <math>tCO_{2e}</math></b>

un transporte único, habiendo sido unificado mediante transportes internos previamente, evitando así transportes innecesarios entre el sistema y los gestores.

El primero de los procesos representados empezando por la derecha será el correspondiente al transporte del flujo unificado entre la compañía C3 y el gestor de cada flujo. El siguiente proceso corresponde al transporte entre la compañía C2 y la compañía C3, y el tercero de los procesos será entre la compañía C1 y la compañía C3.

De nuevo el formato de diagrama Sankey, permite ver como el transporte principal desde el sistema hasta el gestor de residuos es el proceso que absorbe un mayor impacto ambiental, quedando como procesos de impacto mucho menor los procesos de transportes internos en el sistema que tienen flechas de menor grosor proporcionales a su menor impacto.

En la Figura 4.18 se ve de forma clara esta diferencia de pesos sobre el impacto en este escenario de implantación de la sinergia. La parte azul del gráfico corresponde al



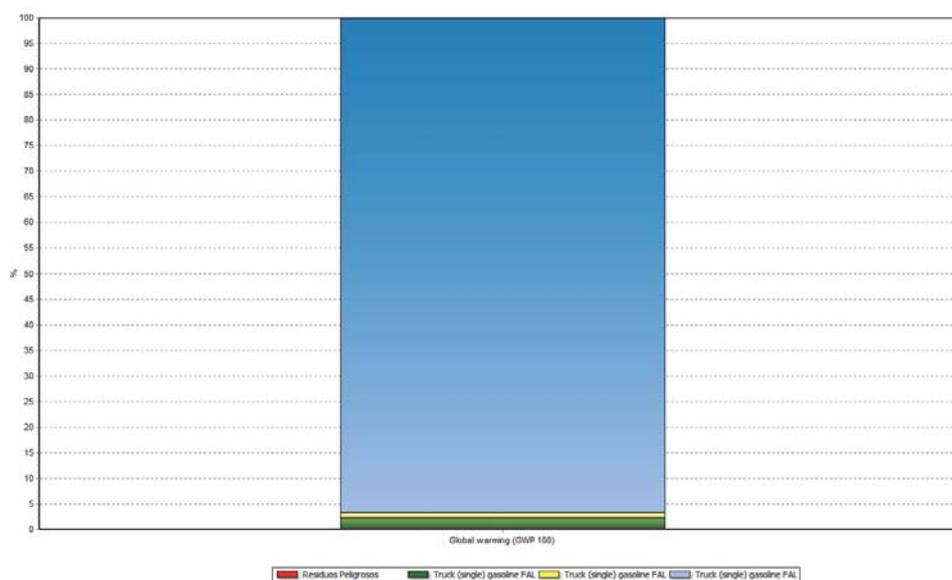
**Figura 4.17:** Árbol del ciclo de vida del Flujo de la sinergia MM3 tras la implantación de la misma

proceso de transporte entre sistema y gestor y la parte verde y amarillo a los procesos de transporte interno.

Como en el caso inicial, la Tabla 4.16 expresa los valores exactos de huella de carbono cuantificados mediante el análisis de ciclo de vida en SimaPro. En este caso se expresa también la diferencia entre el total del impacto del caso inicial y el total del impacto tras la implantación de la sinergia.

La comparativa de impacto ambiental entre escenarios muestra como se produce un ahorro de **3,3 tCO<sub>2e</sub>**, un 21,56 % de disminución de la huella de carbono.

De forma gráfica, el análisis de ciclo de vida nos aporta una comparativa de impactos expresada en porcentajes de un escenario sobre el otro y reflejada en la Figura 4.19. El escenario inicial corresponde al color rojo y el escenario de la sinergia al color azul. Confirmada la reducción de impacto ambiental que supone la creación de la sinergia

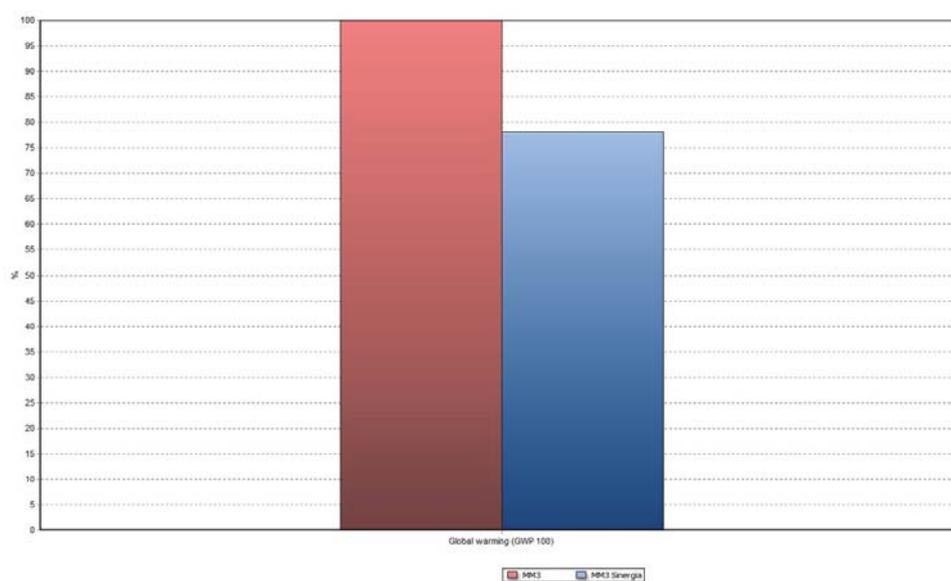


**Figura 4.18:** Relación de pesos de cada proceso sobre el impacto ambiental en escenario de implantación de la sinergia MM3

**Tabla 4.16:** Impacto ambiental parcial y total de los procesos de transporte con transporte de la sinergia MM3

PROCESO	KM	IMPACTO (GWP) en $tCO_{2e}$
Impacto ambiental Transporte C1 - C3		
8 viajes	21,6 km	
<b>SUBTOTAL</b>	21,6 km	<b>0,263 <math>tCO_{2e}</math></b>
Impacto ambiental Transporte C2 - C3		
5 viajes	20 km	
<b>SUBTOTAL</b>	20 km	<b>0,135 <math>tCO_{2e}</math></b>
Impacto ambiental Transporte C3 - Gestores		
8 x Lunagua	225,6 km	
1 x Recypilas	117 km	
<b>SUBTOTAL</b>	342,6 km	<b>11,6 <math>tCO_{2e}</math></b>
<b>TOTAL</b>		<b>12 <math>tCO_{2e}</math></b>
Diferencia entre Escenarios		<b>-3,3 <math>tCO_{2e}</math></b>

MM3, ésta formará parte de la red de simbiosis industrial.



**Figura 4.19:** Comparativa de impacto ambiental de los escenarios iniciales y tras implantación de sinergia para la sinergia MM3

#### MM4. Gestión conjunta de residuos no peligrosos

##### Descripción de la Sinergia

Para el planteamiento de esta sinergia se han analizado los diferentes flujos de residuos no peligrosos que se generan en las empresas, así como los gestores de cada residuo. Una vez realizado este análisis, se han detectado 6 flujos de residuos no peligrosos coincidentes dentro de las empresas. Se han detectado 3 sustancias comunes entre diferentes empresas. Con esta sinergia se persigue una propuesta de gestión común de los residuos no peligrosos para conseguir mejoras económicas, así como mejoras ambientales en la logística implicada en su gestión. En la Figura 4.20 se observa gráficamente la estructura de funcionamiento de la sinergia.

##### Flujos Implicados

A continuación se detallan las particularidades de cada una de las sustancias identificadas:

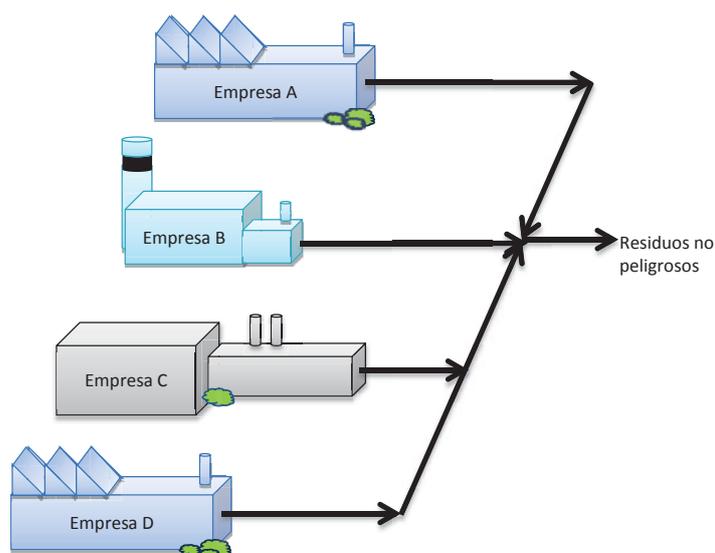


Figura 4.20: Representación gráfica de la sinergia MM4 [6]

#### PAPEL Y CARTÓN C1-C2

Se comprueba que tanto C1 como C2 generan residuos de papel y cartón en sus instalaciones. C1 genera 227,1 T/año recogidas gratuitamente por Paruvi y C2 genera 42,5 T/año también recogidas gratuitamente por Paruvi. El flujo total a tratar es de 269,6 T/año.

#### CHATARRA C1-C2

Se comprueba que tanto C1 como C2 generan chatarra en sus instalaciones. C1 genera 85,6 T/año que vende a Femusan, y C2 genera 249,6 T/año que vende a Berrio. El flujo total a tratar es de 335,2 T/año.

#### PLÁSTICOS C1-C2

Se comprueba que tanto C1 como C2 generan residuo de plásticos en sus instalaciones. C1 genera 5.046 T/año vendidas a Anviplas y C2 genera 126,6 T/año recogidas gratuitamente por Paruvi. El flujo total a tratar es de 5.172,6 T/año.

### **Costes iniciales e inversión necesaria**

Existen dos puntos en los que estudiar el impacto de la implantación de la sinergia MM4. El primero de ellos sería en el nuevo coste que supondrá la gestión por terceros del nuevo flujo unificado, y por otro lado el efecto que supondrá a nivel logístico la nueva reordenación de los flujos individuales en un único flujo para el sistema.

El hecho de plantear una gestión común de residuos no peligrosos entre las empresas del sistema, puede provocar ahorros en los costes de gestión debido a las economías de escala que se generen a partir de la unificación de los flujos. Ante la imposibilidad de cuantificar los efectos en coste de las economías de escala, se considera el caso más desfavorable en el que los beneficios asociados a la gestión de los flujos unificados de residuos no peligrosos permanecen idénticos tras la implantación de la sinergia MM4.

La implementación de un flujo unificado de residuos peligrosos para su gestión, produce a su vez cambios en el sistema logístico de transporte. Estos cambios pueden suponer ahorros en los costes asociados al transporte de dichos residuos hasta el gestor pertinente, ya que se evitarán viajes directos entre sistema y gestor, pudiendo aprovechar la unificación del flujo dentro del propio sistema para posteriormente realizar un único transporte que conecte el sistema y el gestor de los residuos no peligrosos.

## **ANÁLISIS ECONÓMICO**

### **Beneficios Económicos Esperados**

Dado que se ha considerado el caso más desfavorable para los beneficios obtenidos de la gestión del flujo unificado, no se producirán cambios a considerar para la rentabilidad de la sinergia a través de la venta de los residuos.

Por otro lado la reorganización de la logística de distribución del nuevo flujo unificado si que provocará cambios en los costes asociados al transporte del flujo, que han de ser

estimados para garantizar la rentabilidad de la implantación de la sinergia MM4. De nuevo a partir de los precios basados en el Observatorio de Costes del Transporte que realiza el Ministerio de Fomento para la estimación de costes de operación por parte de profesionales del transporte, se estima el coste unitario por kilómetro de un vehículo articulado de carga general de 40 toneladas de capacidad, totalmente apropiados para el transporte por carretera de los residuos no peligrosos. Las distancias por carretera desde el complejo industrial hasta cada uno de los gestores se expresan en la Tabla 4.17. Éstas serán las distancias a considerar para el cálculo de los costes en transporte previos y posteriores a la implantación de la sinergia.

**Tabla 4.17:** Distancias entre el complejo industrial y los diferentes gestores de residuos peligrosos

Gestor de Residuos No Peligrosos	Distancia (km)
Femusan	24,4
Lunagua	4,7
Anviplas	682
Paruvi	10,6

El coste unitario estimado por kilómetro obtenidos con datos de 2008 se actualiza a partir del índice de precios para transporte intermunicipal ofrecido por el Ministerio de Fomento del Gobierno de España. El índice más actual que se indica es para el año 2012, por lo que será el precio que se utilizará en este trabajo. El cálculo final de coste unitario medio por kilómetro estimado por el Ministerio de Fomento está reflejado en la parte superior de la Tabla 4.18.

A partir de este precio unitario se calculan los costes de transporte por viaje realizado para el escenario inicial y posterior a la implantación de la sinergia MM4. El flujo de papel y cartón, puede ser unificado para reducir el impacto ambiental de su transporte, pero no existirá reducción de costes ya que el flujo se recoge gratuitamente por parte del gestor. El flujo de chatarra permite plantear una unificación para su venta a un único

gestor. Siendo muy difícil calcular el beneficio de unificar esa venta y aprovechar posibles economías de escala, se estima el caso más desfavorable en el que la venta se mantendrá al mismo precio, y por tanto el ahorro económico provendrá de la reducción del número de transportes necesarios para la entrega del flujo. En el caso del flujo de plásticos, se unificará el transporte de manera que ambas compañías puedan vender sus residuos al correspondiente gestor, consiguiendo un beneficio para la empresa C2 que previamente les cedía gratuitamente. Al ser muy difícil calcular el precio de venta, se considera el caso más desfavorable en el que sólo se considera el ahorro del impacto ambiental de unificar el transporte del flujo reduciendo el número de viajes necesarios.

Se considera en el caso del flujo de chatarra que la unificación del flujo se realizará en la empresa C2, por ser la empresa que mayor cantidad aporta al flujo unificado, y que servirá a modo de parada final donde llenar la carga del transporte para su traslado al gestor. En los otros dos casos, será la empresa C1 donde se realice dicha unificación.

A partir del cálculo de los costes de transporte por viaje realizado entre empresa y gestor, se calcula la estimación de los costes totales de transporte para cada uno de los escenarios considerados. Este cálculo se refleja en la Tabla 4.19, donde a partir de los viajes estimados para unificar el flujo teniendo en cuenta el vehículo y cantidades a entregar al gestor, se obtiene un subtotal del coste anual de transporte del conjunto de residuos no peligrosos. A este coste se le añade el porcentaje de beneficio industrial de la empresa que realiza el transporte y el porcentaje de impuesto sobre el valor añadido. Finalmente se obtiene el coste total anual del transporte para ambos escenarios posibles y se realiza la diferencia entre el escenario final tras la implantación de la sinergia MM4 y el escenario inicial previo al estudio. Si la diferencia obtenida es negativa, se prueba la rentabilidad económica de los nuevos costes de operación de la nueva logística de transporte. Al no existir inversión inicial para la implantación de la sinergia MM4, queda probada a su vez la rentabilidad económica final del nuevo escenario de trabajo.

$$IEC_{MM4} = \frac{\text{Nuevos Costes de Operación}_{MM4}}{\text{Costes de Operación Iniciales}_{MM4}} = \frac{189,86 \text{ €}}{306,9 \text{ €}} = 0,618 < 1 \quad (4.16)$$

El Indicador de Eficiencia de Costes calculado en la Ecuación 4.16 tiene un valor menor que 1, por lo que la implantación de la nueva sinergia es rentable en términos de costes de operación. Como se puede comprobar en la Tabla 4.19 se obtiene un ahorro global en la red de 117,04€ al año, un 38,13 % en los costes anuales de transporte del flujo unificado de residuos peligrosos del conjunto del sistema al gestor pertinente, demostrando, al no existir inversión inicial que recuperar, que **la sinergia MM4 es viable económicamente**.

**Tabla 4.18:** Cálculo de Costes de Transporte por Viaje Según Escenario para la Sinergia MM4 [6]

PRECIO MEDIO POR KM. SEGÚN DISTANCIA RECORRIDA		
Transporte intermunicipal. Índice: 1º trimestre de 1999 = 100	< 50km	51 – 100km
2012	140,8	136,8
2008	143,2	144,20
Precio por Km estimado en 2008 por el Ministerio de Fomento		€/km
Carga Completa		1,016
Descargado		1,196
Precio por Km estimado mediante Índice de Precio Medio por Km (2012)		€/km
Carga Completa		0,998
Descargado		1,176
COSTE POR VEHÍCULO EN ESCENARIO INICIAL		
CÁLCULO DE COSTES DE TRANSPORTE POR VIAJE (Residuos No Peligrosos)		
Empresa C1 - Femusan	km	Coste
Carga Completa	24,4	24,35 €
Desplazamiento sin Carga	24,4	28,69 €
SUBTOTAL		53,04 €
Empresa C2 - Berrio	km	Coste
Carga Completa	4,7	4,69 €
Desplazamiento sin Carga	4,7	5,52 €
SUBTOTAL		10,21 €
COSTES POR VEHÍCULO EN ESCENARIO DE SINERGIA MM4		
CÁLCULO DE COSTES DE TRANSPORTE POR VIAJE (Residuos No Peligrosos)		
Empresa C1 - Empresa C2	km	Coste
Carga Completa	2,6	2,59 €
Desplazamiento sin Carga	2,6	3,05 €
SUBTOTAL		5,64 €
Empresa C2 - Berrio	km	Coste
Carga Completa	4,7	4,69 €
Desplazamiento sin Carga	4,7	5,52 €
SUBTOTAL		10,21 €

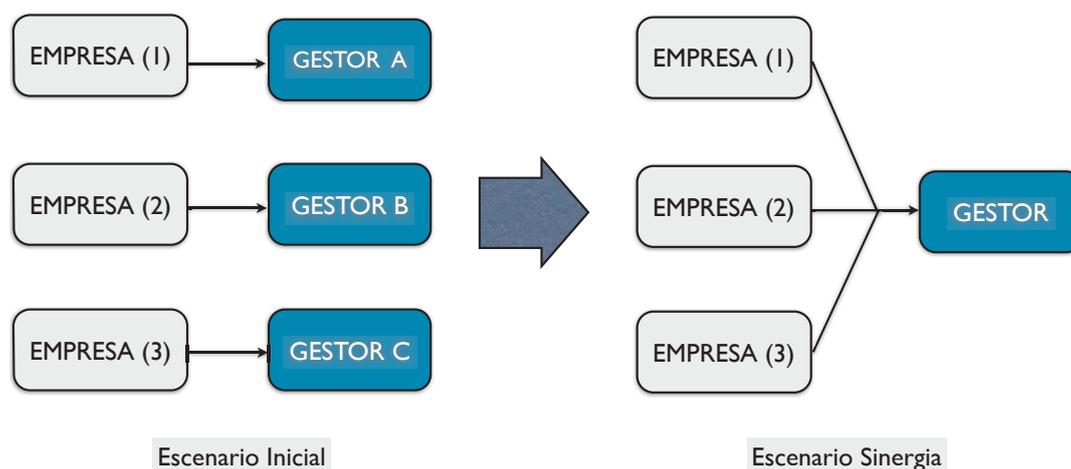
**Tabla 4.19:** Cálculo de Costes Totales de Transporte de Flujos en Escenario Inicial y con Sinergia MM4 [6]

SINERGIA MM4: Gestor Común de Residuos No Peligrosos						
<b>ESCENARIO INICIAL</b>						
FLUJO	CANT. DE FLUJO IMPLICADAS T/año			Nº DE TRANSPORTES EN ESCENARIO INICIAL (Vehículo articulado de carga general de 40 Ton.)		
	C1	C2	C3	C1- Gestor	C2- Gestor	C3 - Gestor
Papel y Cartón	227,1	42,5	-	-	-	-
Chatarra	85,6	249,6	-	3 x Femusan = 159,12 €	7 x Berrio = 71,47 €	
Plásticos	5.046	126,6	-	-	-	
<b>TOTAL</b>	<b>5.358,70</b>	<b>418,70</b>	<b>-</b>			
<b>TOTAL RED</b>	<b>5.777,40</b>	<b>COSTES INDIVIDUALES</b>		159,12 €	71,47 €	
<b>SUBTOTAL DE COSTES DE TRANSPORTE ANUAL EN ESCENARIO INICIAL</b>						
Beneficio Industrial						
Impuesto sobre el Valor Añadido						
Beneficio Industrial						
Impuesto sobre el Valor Añadido						
<b>TOTAL DE COSTES DE TRANSPORTE ANUAL EN ESCENARIO INICIAL</b>						
<b>306,9 €</b>						
<b>ESCENARIO TRAS IMPLANTACIÓN DE SINERGIA MM4</b>						
FLUJO	CANT. DE FLUJO IMPLICADAS T/año			Nº DE TRANSPORTES EN ESCENARIO CON SINERGIA (Vehículo articulado de carga general de 40 Ton.)		
	C1	C2	C3	C2 - Gestor	C1 - C2	C3 - Gestor
Papel y Cartón	227,1	42,5	-	-	-	
Chatarra	85,6	249,6	-	9 x Berrio = 91,89 €	3	
Plásticos	5.046	126,6	-	-	-	
<b>TOTAL</b>	<b>5.358,70</b>	<b>418,70</b>	<b>-</b>		3	
<b>TOTAL RED</b>	<b>5.777,40</b>	<b>COSTES INDIVIDUALES</b>		91,89 €	16,92 €	
<b>SUBTOTAL DE COSTES DE TRANSPORTE ANUAL EN ESCENARIO CON SINERGIA</b>						
Beneficio Industrial						
Impuesto sobre el Valor Añadido						
Beneficio Industrial						
Impuesto sobre el Valor Añadido						
<b>TOTAL DE COSTES DE TRANSPORTE ANUAL EN ESCENARIO CON SINERGIA</b>						
<b>108,81</b>						
<b>DIFERENCIA DE COSTES ENTRE ESCENARIO INICIAL Y TRAS IMPLANTACIÓN DE SINERGIA MM4</b>						
<b>Beneficio Industrial</b>						
<b>Impuesto sobre el Valor Añadido</b>						
<b>Beneficio Industrial</b>						
<b>Impuesto sobre el Valor Añadido</b>						
<b>TOTAL DE COSTES DE TRANSPORTE ANUAL EN ESCENARIO CON SINERGIA</b>						
<b>144,82 €</b>						
<b>-162,08 €</b>						

S.D. = Sin Datos

## ANÁLISIS AMBIENTAL

El caso de la sinergia MM4 es totalmente equivalente al de la sinergia MM3, pero cambiando el flujo sobre el que se trabaja. En este caso el flujo son residuos no peligrosos. El análisis ambiental de la sinergia tiene una estructura descrita en la Figura 4.21, donde el flujo de residuos pasa de ser gestionado por tres entidades distintas a ser unificado para su gestión conjunta. El flujo de residuos que sale del sistema en este caso permanece constante, no habiendo aprovechamiento de algún residuo en alguna actividad dentro del sistema, pero habiendo diferencias en el impacto ambiental de la nueva distribución a los gestores que plantea la sinergia.

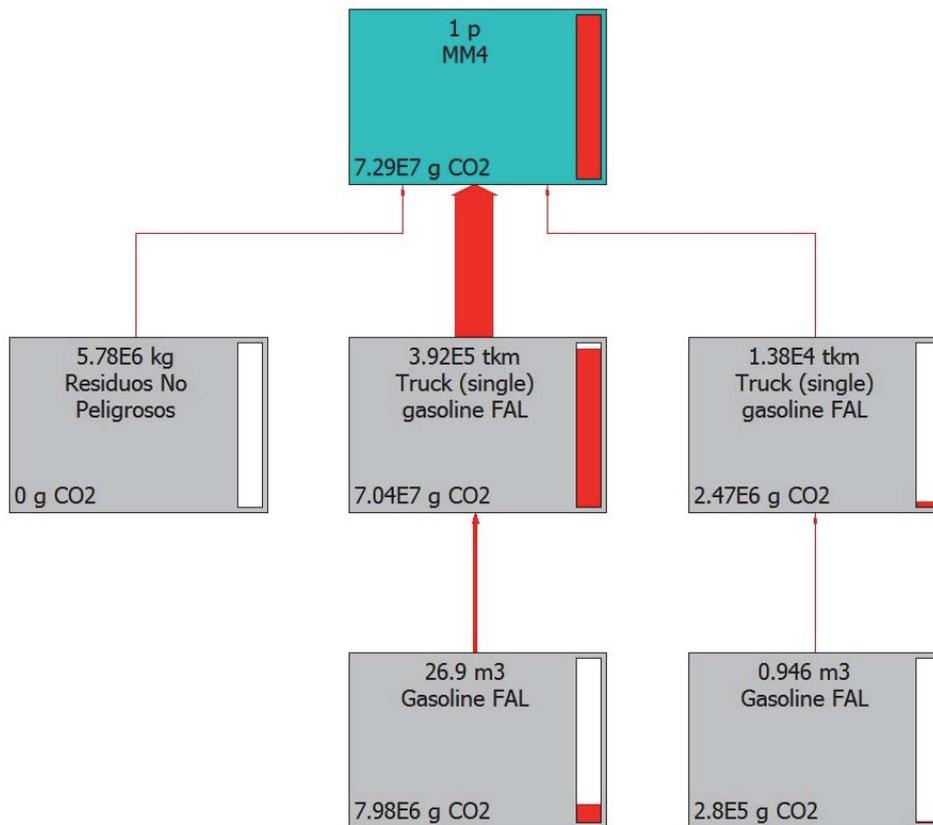


**Figura 4.21:** Estructura de flujo de caso inicial y final de la sinergia MM4

Como se puede comprobar en la Figura 4.21 la nueva estructura de gestión común evita el transporte de los residuos desde el sistema hasta cada gestor individual, ya que puede realizarse mediante un sólo transporte que lleve el flujo de residuos hasta el gestor común, y el transporte interno previo desde una empresa a otra para unificar el flujo. Mediante un análisis de ciclo de vida de este proceso de transporte podemos evaluar la reducción de impacto ambiental que tendrá esta nueva logística de gestión de residuos.

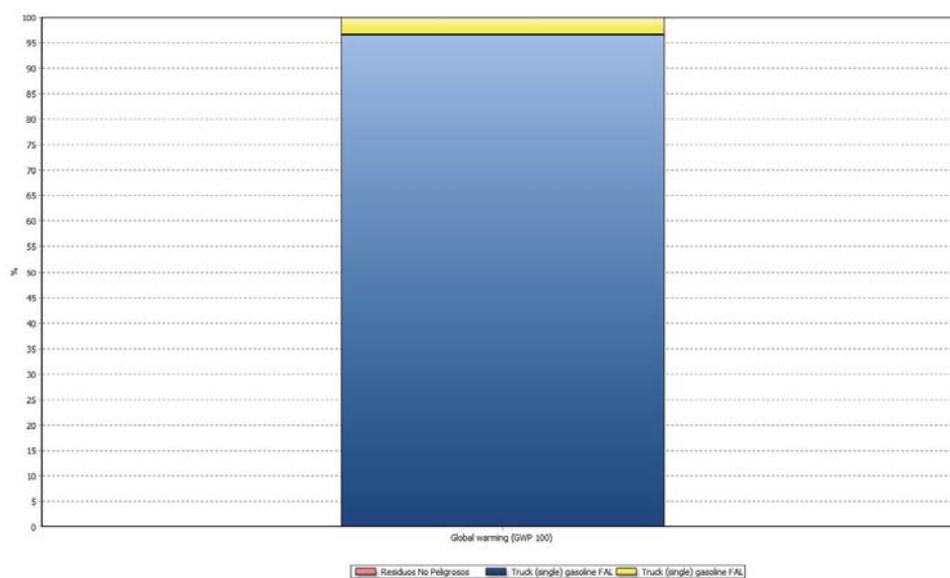
### Escenario Inicial

En la Figura 4.22 se incluye el árbol del ciclo de vida del proceso de transporte del flujo de residuos en el caso inicial, definiendo como producto la entrega del flujo a los gestores correspondientes. Está formado por los dos procesos de transporte que se realizan en el caso inicial, estando únicamente implicadas las compañías C1 y C2.



**Figura 4.22:** Árbol del ciclo de vida del Flujo en escenario inicial de la sinergia MM4

La importancia en el impacto ambiental de cada uno de los procesos se observa mediante el grosor de las flechas de forma equivalente a un diagrama Sankey. Se comprueba como el peso del impacto es diferente en cada uno de los procesos de transporte, siendo el reparto de pesos equivalente a la proporción en el grosor de las líneas de unión en el árbol, y que se refleja en porcentaje en la Figura 4.23, donde el color azul corresponde al conjuntos de procesos de transporte de cada flujo hasta el gestor de la compañía C1 y el color amarillo de la compañía C2.



**Figura 4.23:** Relación de pesos de cada proceso sobre el impacto ambiental en escenario inicial de la sinergia MM4

El impacto parcial y total de este escenario queda expresado de forma numérica en la Tabla 4.20. Allí se expresan las distancias a recorrer según los viajes que se realizará a cada uno de los gestores y el total de kilómetros a recorrer con el correspondiente impacto ambiental que provocará.

**Tabla 4.20:** Impacto ambiental parcial y total de los procesos de transporte iniciales de la sinergia MM4

PROCESO	KM	IMPACTO (GWP) en $tCO_{2e}$
Impacto ambiental Transporte C1 - Gestores		
3 x Femusa	73,2 km	
<b>SUBTOTAL</b>	73,2 km	<b>70,4 <math>tCO_{2e}</math></b>
Impacto ambiental Transporte C2 - Gestores		
7 x Berrio	32,9 km	
<b>SUBTOTAL</b>	32,9 km	<b>2,47 <math>tCO_{2e}</math></b>
<b>TOTAL</b>		<b>72,9 <math>tCO_{2e}</math></b>

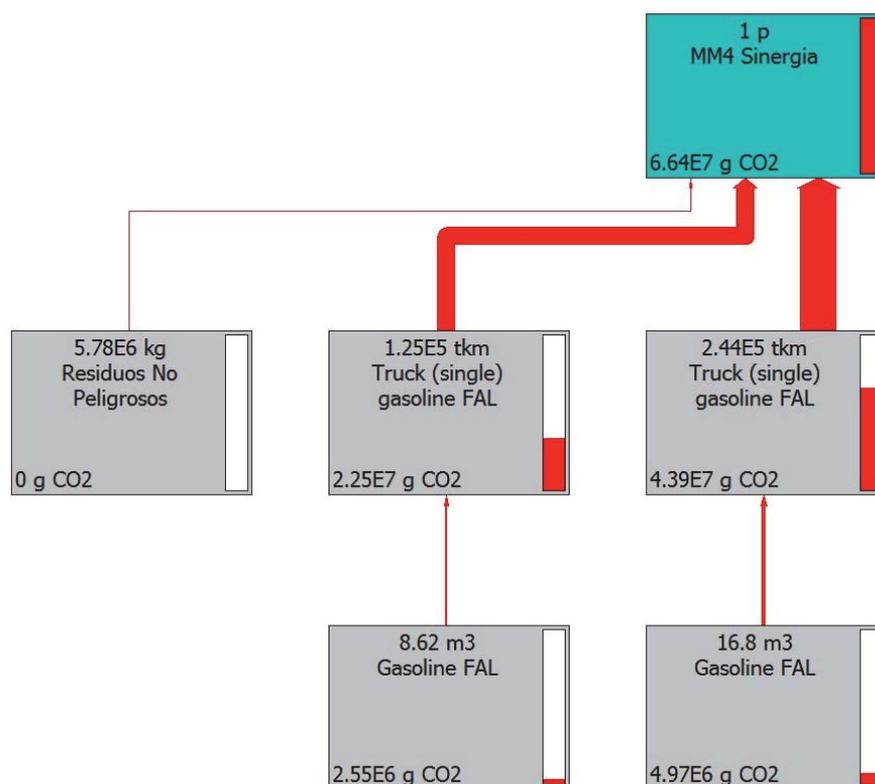
### Escenario con Sinergia Implantada

Este escenario cuenta con un gestor común para el flujo unificado de cada uno de los tipos de residuos de las dos empresas del sistema, por lo que ambientalmente el árbol de ciclo de vida para este caso tendrá una distribución diferente al caso inicial. La Figura 4.24 muestra como en este caso, el grosor de las líneas del diagrama Sankey de unión en el árbol ha cambiado respecto del caso inicial, repartiendo más equitativamente la proporción del total del impacto ambiental producido en la sinergia. En este caso, debido a la gran cantidad de toneladas a transportar, la reducción de kilómetros a recorrer se nota de forma más sustancial en el impacto ambiental que en otros casos con una menor carga a desplazar. Con la nueva distribución de transporte unificado, el flujo abandona el sistema mediante un transporte único, juntándose mediante transportes internos previamente, evitando así transportes innecesarios entre el sistema y los gestores.

De nuevo el formato de diagrama Sankey, permite ver como el transporte principal desde el sistema (Compañía C2) hasta el gestor de residuos es el proceso que absorbe un mayor impacto ambiental, quedando con un impacto mucho menor los procesos de transportes internos en el sistema representados con flechas de menor grosor proporcionales a su menor impacto. En la Figura 4.25 se ve de forma clara esta diferencia de pesos sobre el impacto en este escenario con sinergia. La parte amarilla del gráfico corresponde al proceso de transporte entre la compañía C2 y el gestor y la parte azul al proceso de transporte interno entre las compañías C1 y C2.

Como en el caso inicial, la Tabla 4.21 expresa los valores exactos de huella de carbono cuantificados mediante el análisis de ciclo de vida en SimaPro y las distancias a recorrer en cada caso para cumplir con los transportes de flujo necesarios. En este caso se expresa también la diferencia entre el total del impacto del caso inicial y el total del impacto tras la implantación de la sinergia.

La comparativa muestra como se produce un ahorro de **6,5 tCO<sub>2e</sub>**, un 8,91 % de



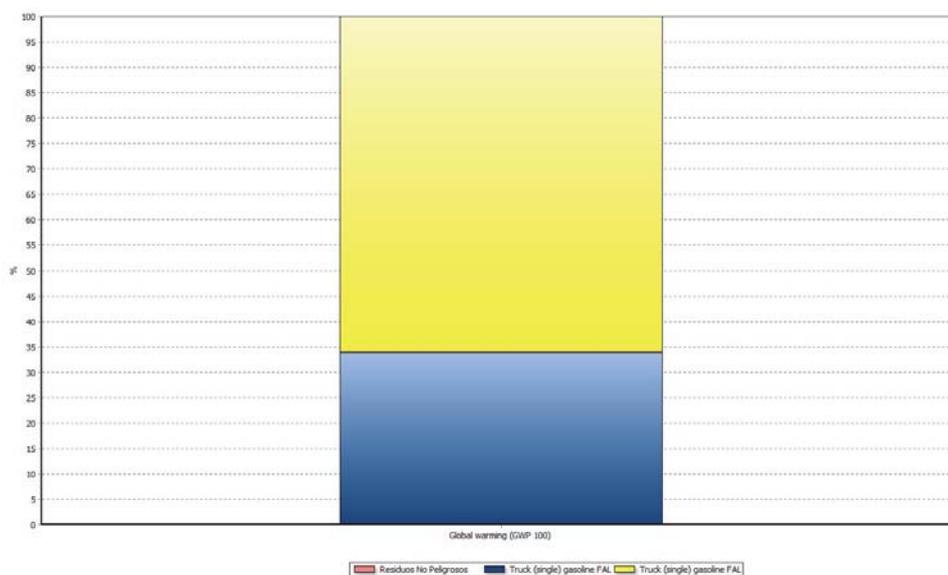
**Figura 4.24:** Árbol del ciclo de vida del Flujo de la sinergia MM4 tras la implantación de la misma

**Tabla 4.21:** Impacto ambiental parcial y total de los procesos de transporte con transporte de la sinergia MM4

PROCESO	KM	IMPACTO (GWP) en $tCO_{2e}$
Impacto ambiental Transporte C1 - C2		
9 viajes	23,4 km	
<b>TOTAL</b>	23,4 km	<b>22,5 <math>tCO_{2e}</math></b>
Impacto ambiental Transporte C2 - Gestores		
9 x Berrio	42,3 km	
<b>TOTAL</b>	42,3 km	<b>43,9 <math>tCO_{2e}</math></b>
<b>TOTAL</b>		<b>66,4 <math>tCO_{2e}</math></b>
Diferencia entre Escenarios		<b>-6,5 <math>tCO_{2e}</math></b>

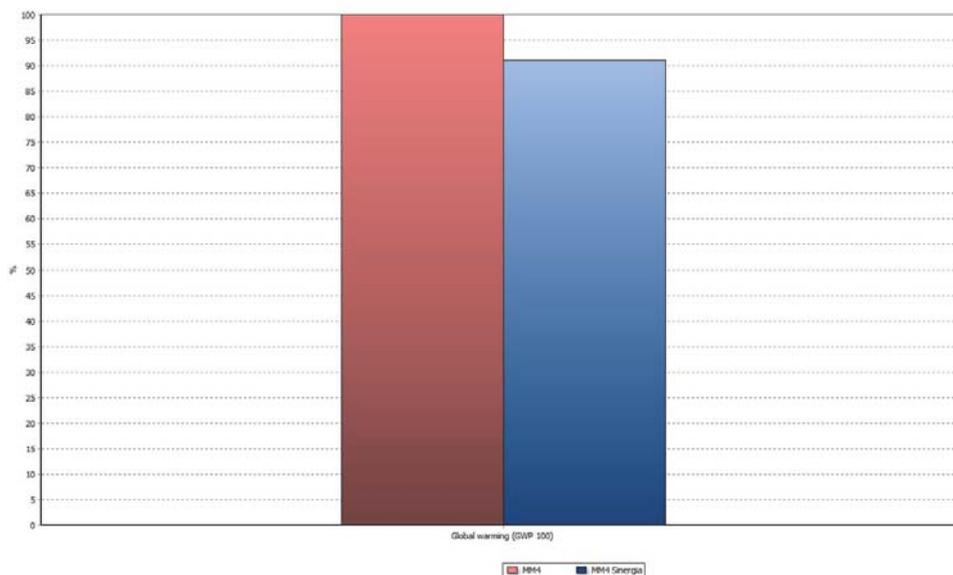
disminución de huella de carbono.

De forma gráfica, el análisis de ciclo de vida nos aporta una comparativa de impactos expresada en porcentajes de un escenario sobre el otro y reflejada en la Figura 4.26.



**Figura 4.25:** Relación de pesos de cada proceso sobre el impacto ambiental en escenario de implantación de la sinergia MM4

El escenario inicial corresponde al color rojo y el escenario de la sinergia al color azul. Confirmada la reducción de impacto ambiental que supone la creación de la sinergia MM4, ésta formará parte de la red de simbiosis industrial.

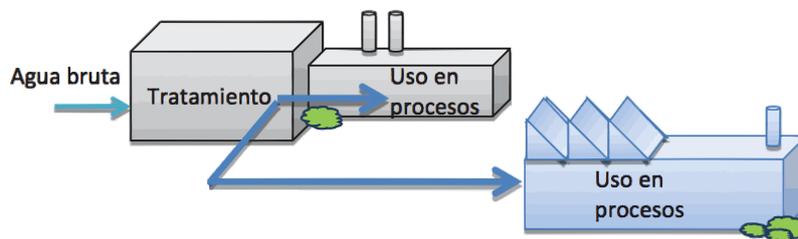


**Figura 4.26:** Comparativa de impacto ambiental de los escenarios iniciales y tras implantación de sinergia para la sinergia MM4

**MA1. C3 Abastece a C2 de agua desmineralizada****Descripción de la Sinergia**

Se plantea obtener agua desmineralizada en C3 para abastecer también a C2. El agua desmineralizada es un tipo de agua común para las dos empresas. A partir de esta identificación, se calcula el margen de obtención de este tipo de agua que cada una tiene para abastecer potencialmente a otras, realizando una mutualización del flujo de abastecimiento de agua desmineralizada siendo C3 la suministradora del flujo tanto a C2 como a ella misma. De esta manera se busca conseguir mediante el aprovechamiento de las economías de escala, una mayor optimización de las instalaciones al trabajar con una sola estación de pretratamiento, consiguiendo así una centralización del flujo y una minimización en el número de instalaciones utilizadas.

En la Figura 4.28 se observa gráficamente la estructura de funcionamiento de la sinergia de forma genérica.



**Figura 4.27:** Representación gráfica de la sinergia MA1 [6]

**Flujos Implicados**

La empresa C3 posee un margen de capacidad de un 50 % para obtener agua desmineralizada en sus instalaciones. Considerando que el agua tiene que pasar por todos los tratamientos previos a la desmineralización, se comprueba que el margen máximo de producción disponible le fija la etapa de debicarbonatación dentro de su proceso productivo para conseguir agua desmineralizada siendo ese margen de  $69 \text{ m}^3/\text{h}$ . La producción total

es de  $241 \text{ m}^3/h$ , por lo que se podría abastecer los  $13,75 \text{ m}^3/h$  de agua desmineralizada que utiliza C2 con ese margen.

Considerando el margen de capacidad disponible en las instalaciones de la empresa C3, (50%), se observa un sobredimensionamiento para sus necesidades. Se plantea que la empresa C3 haga de proveedora del flujo a la empresa C2 aumentando su producción aprovechando economías de escala y abaratando el coste de producción del flujo.

## ANÁLISIS ECONÓMICOS

### Costes Iniciales e Inversión Necesaria

Para el estudio de viabilidad económica de esta sinergias vamos a plantear dos etapas. En la primera de ellas se estima el coste de pretratamiento del agua a la calidad de agua desmineralizada en €/T, para cada uno de los escenarios posibles, inicial y con la aplicación de la sinergia MA1, de forma que se pueda estudiar la rentabilidad de la implantación de la sinergia en términos de ahorro en los costes de abastecimiento del flujo. En la segunda etapa se valora la inversión necesaria para las nuevas instalaciones de comunicación por tubería entre ambas empresas y el estudio de la recuperación de la inversión.

Para la primera etapa se evalúa el precio medio de la producción de agua desmineralizada. El coste medio de producción de agua desmineralizada estimado por Zarzos y Amorós [64] es de  $0,4175 \text{ €/T}$ . Por lo tanto la estimación del coste de pretratamiento, según el caudal requerido por ambas empresas se indica en la primera parte de la Tabla 4.22.

Debido a las economías de escala, la ampliación de la producción por parte de la empresa C3 permitirá reducir los costes de pretratamiento en comparación con los que tenía la empresa C2 inicialmente.

El nuevo coste de producción del flujo para la empresa C3 tras la implantación de la sinergia se estimará a partir del coste de producción estimado en el caso inicial. Para cuantificar el efecto de la economía de escala sobre el aumento de producción de C3 utilizaremos un planteamiento que estima que la empresa C3 podrá ofrecer el flujo de agua desmineralizada con una reducción de precio sobre el coste de producción inicial igual al margen de ganancia habitual en el sector productivo de la empresa C3, ofreciendo un precio de suministro del flujo a la empresa C2 por debajo de sus costes de producción habituales, y manteniendo la empresa C3 un beneficio económico igualmente, que dependerá en este caso de las economías de escala a partir de las condiciones particulares de la propia empresa.

Un margen de ganancia industrial apropiado para amplios volúmenes de negocio en el sector industrial está estimado en un 8,90% de margen sobre el precio de mercado, basando esta estimación en estudios estadísticos de la consultoría *Butler Consultants* [63]. Ese será el porcentaje de reducción sobre el coste de producción de la empresa C3 como precio estimado para su suministro a la empresa C2.

En la segunda etapa se valora la construcción de una nueva infraestructura de transporte, necesaria para la implementación de la sinergia tal y como se indica en el modelo para la sinergia MA1. La inversión necesaria para esta infraestructura se estudia mediante la metodología definida para el transporte de fluidos en el capítulo 4 [53, 54, 55]. En el caso de la publicación de Parker [53], se diseña la estimación a partir de tuberías diseñadas para gas natural, gasolina y petróleo, por lo que se consideran flujos asimilables a un flujo de agua, al ser el caso de una estimación de orden de magnitud. Para ello se van a considerar dos fases dentro de las instalaciones de conexión necesarias. La primera de ellas es una conexión por tubería entre las dos empresas. La segunda fase serán la pertinente estación de bombeo que permita el desplazamiento del flujo de una empresa a otra a lo largo de las tuberías. Por otra lado se estiman igualmente los costes de operación y mantenimiento que supondrán el funcionamiento de estas dos nuevas infraestructuras

de transporte (tuberías y estaciones de bombeo), de manera que puedan ser considerados también en la estimación de la rentabilidad de la aplicación de la sinergia MA1.

### Beneficios Económicos Esperados

En la Tabla 4.22, se expresan los costes de inversión y mantenimiento de la infraestructura de tuberías y estaciones de bombeo, así como los cálculos de los costes de producción y las estimaciones sobre rentabilidad.

$$IEC_{MA1} = \frac{\text{Nuevos Costes de Operación}_{MA1}}{\text{Costes de Operación Iniciales}_{MA1}} = \frac{848,011,79 \text{ €} + 27,910 \text{ €}}{931,697,17 \text{ €}} = 0,94 < 1 \quad (4.17)$$

El Indicador de Eficiencia de Costes calculado en la Ecuación 4.17 tiene un valor menor que 1, por lo que la implantación de la nueva sinergia es rentable en términos de costes de operación. Como se puede comprobar en la Tabla 4.22 se obtiene un ahorro global en los costes anuales de producción de la red de 55.775,38€ al año, un 8,98 %.

La recuperación de la inversión es otro factor a tener en cuenta para estudiar la rentabilidad. En este trabajo se estima como aceptable una recuperación de la inversión de 10 años como un periodo de largo plazo, a partir de las estimaciones de vida útil media para el sector industrial realizadas por García, Cloquell y Gómez [65].

$$VAN_{MA1} = \sum_{t=1}^n \frac{V_t}{(1+k)^t} - I_0 = \sum_{t=1}^n \frac{55,775,38\text{€}}{(1+0,00325)^t} - 930,333,44\text{€} = -459,974,96 < 0 \quad (4.18)$$

siendo  $k$  el tipo de interés, considerado un 3,25 % , que es el registrado por el Banco de España [66] para las operaciones de la zona euro a un plazo superior a 5 años,  $V_t$  el flujo de caja para cada periodo  $t$ ,  $n$  el número de períodos considerado (10 en este caso)

y  $I_0$  el desembolso inicial de inversión.

Tal y como expresa la Ecuación 4.18, el VAN es menor que cero, por lo que la inversión inicial produciría pérdidas en el plazo contemplado y el proyecto debería rechazarse. Por esta razón se **desestima la sinergia MA1 para su implantación dentro de la red de sinergias** por no ser rentable a largo plazo.

**Tabla 4.22:** Costes estimados en el escenario posterior a la implantación de la sinergia MA1

VOLUMEN DE FLUJO IMPLICADO				
FLUJO		C1	C2	C3
Agua Desmineralizada		-	120.450 m <sup>3</sup> /año	2.111.160 m <sup>3</sup> /año
TOTAL COMPLEJO				2.231.610 m <sup>3</sup> /año
COSTES INICIALES DE PRODUCCIÓN				
FLUJO	COSTE	C1	C2	C3
Agua Desmineralizada	0,4175 €/m <sup>3</sup> .	-	50.287,87 €/año	881.409,3 €/año
TOTAL COSTES DEL COMPLEJO				931.697,17€/año
COSTES DE PRODUCCIÓN CON SINERGIA MA1				
FLUJO	COSTE	C1	C2	C3
Agua Desmineralizada	0,38 €/m <sup>3</sup> .	-	45.770,99 €/año	802.240,80 €/año
TOTAL COSTES DE LA RED				848.011,79€/año
DIFERENCIA ANUAL DE COSTES DE PRODUCCIÓN DE LA RED				<b>-83.685,38€/año</b>
COSTES FIJOS DE INVERSIÓN de CONEXIÓN con TUBERÍAS				
TUBERÍAS [53]				
PARÁMETROS		Millas	Km.	
Longitud de la Tubería		2,486	4	
		m <sup>3</sup> /día	Diámetro	
Diámetro normalizado de la tubería (cm)		330	4	
Diámetro normalizado de la tubería (Pulgadas)			1,57	
COSTES			Operación	
Coste de Inversión unitario por milla (\$)			486.492 \$	
Coste de Inversión unitario por milla (€)			363.409,52 €	
COSTE TOTAL INVERSIÓN EN TUBERÍAS			903.436,08 €	
ESTACIONES DE BOMBEO [54]				
PARÁMETROS		m <sup>3</sup> /día	pies <sup>3</sup> /día .	
Capacidad de Bombeo		330	11.653,95	
Capacidad de Bombeo por Segundo			0,135	
COSTES			Operación	
Coste de Inversión Unitario por Capacidad (\$)			266.949,89 \$	
Coste de Inversión Unitario por Capacidad (€)			199.411,57 €	
COSTE TOTAL INVERSIÓN EN ESTACIONES DE BOMBEO			26.897,36 €	
COSTE TOTAL EN INVERSIÓN INICIAL			930.333,44 €	
COSTES de OPERACIÓN y MANTENIMIENTO [55]				
		% Inversión	Coste Anual	
Costes de Operación y Mantenimiento de tuberías, distribución, instalaciones, tanques y depósitos		1 %	9.303,33 €/año	
Costes de la Estaciones de Bombeo y Recepción de Fluido		2 %	18.606,67 €/año	
COSTES TOTALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO			27.910 €/año	
DIFERENCIA TOTAL COSTES DE OPERACIÓN			<b>-55.775,38 €/año</b>	

## MA2. C3 Abastece a c2 de agua clarificada

### Descripción de la Sinergia

Se plantea obtener agua clarificada en C3, de tal forma que abastezca a C2. Siguiendo el mismo planteamiento que en la sinergia MA1, el agua clarificada es un tipo de agua común para ambas empresas. Se plantea obtener agua clarificada en C3 para abastecer también a C2. A partir de esta identificación, se calcula el margen de obtención de este tipo de agua que tiene cada empresa para abastecer potencialmente a otras, realizando una mutualización del flujo de abastecimiento de agua clarificada, siendo C3 la suministradora del flujo en este caso tanto a C2 como a ella misma. De esta manera se busca conseguir mediante el aprovechamiento de las economías de escala, una mayor optimización de las instalaciones al trabajar con una sola estación de pretratamiento, consiguiendo así una centralización del flujo y una minimización en el número de instalaciones utilizadas.

En la Figura 4.28 se observa gráficamente la estructura de funcionamiento de la sinergia de forma genérica.

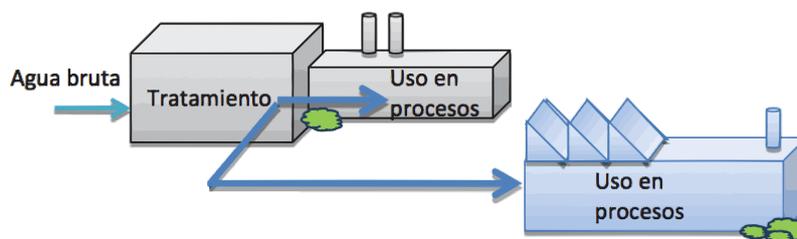


Figura 4.28: Representación gráfica de la sinergia MA1 [6]

### Flujos Implicados

La empresa C3 posee un margen de capacidad de un 27 % para obtener agua clarificada en sus instalaciones. Considerando que el agua tiene que pasar por todos los tratamientos previos a la clarificación, se comprueba que el margen máximo de producción disponible le fija la etapa de clarificación dentro de su proceso productivo para conseguir agua

clarificada siendo ese margen de  $399 \text{ m}^3/h$ . La producción total de la empresa C3 es de  $1.101 \text{ m}^3/h$ . por lo que se podría abastecer los  $17,3 \text{ m}^3/h$  de agua clarificada que utiliza C2. El margen de capacidad de la empresa C2 es del 86% ( $102,7 \text{ m}^3/h$ ), que no son suficiente para abastecer los  $1.101 \text{ m}^3/h$  que utiliza C3 para su producción.

Considerando el margen de capacidad disponible en las instalaciones de la empresa C3, (27%), se observa un sobredimensionamiento para sus necesidades. Se plantea que la empresa C3, ya que su producción de agua clarificada es claramente mayor, haga de proveedora del flujo a la empresa C2 aumentando su producción aprovechando economías de escala y abaratando el coste de producción del flujo.

## ANÁLISIS ECONÓMICO

### Costes Iniciales e Inversión Necesaria

Para el estudio de viabilidad económica de esta sinergias vamos a plantear dos etapas. En la primera de ellas se estima el coste de pretratamiento del agua a la calidad de agua clarificada en €/T, para cada uno de los escenarios posibles, inicial y con la aplicación de la sinergia MA2, de forma que se pueda estudiar la rentabilidad de la implantación de la sinergia en términos de ahorro en los costes de abastecimiento del flujo. En la segunda etapa se valora la inversión necesaria para las nuevas instalaciones de comunicación por tubería entre ambas empresas y el estudio de la recuperación de la inversión.

Para la primera etapa se evalúa el precio medio de la producción de agua clarificada. El coste medio de producción de agua clarificada estimado por Zarzos y Amorós [64] es de  $0,0018 \text{ €/T}$ . Por lo tanto la estimación del coste de pretratamiento, según el caudal requerido por ambas empresas se indica en la primera parte de la Tabla 4.23.

Debido a las economías de escala, la ampliación de la producción por parte de la empresa C3 permitirá reducir los costes de pretratamiento en comparación con los que

tenía la empresa C2 inicialmente.

El nuevo coste de producción del flujo para la empresa C3 tras la implantación de la sinergia se estimará a partir del coste de producción estimado en el caso inicial. Para cuantificar el efecto de la economía de escala sobre el aumento de producción de C3 utilizaremos un planteamiento que estima que la empresa C3 podrá ofrecer el flujo de agua clarificada con una reducción de precio sobre el coste de producción inicial igual al margen de ganancia habitual en el sector productivo de la empresa C3, ofreciendo un precio de suministro del flujo a la empresa C2 por debajo de sus costes de producción habituales, y manteniendo la empresa C3 un beneficio económico igualmente, que dependerá en este caso de las economías de escala a partir de las condiciones particulares de la propia empresa.

Un margen de ganancia industrial apropiado para amplios volúmenes de negocio en el sector industrial está estimado en un 8,90% de margen sobre el precio de mercado, basando esta estimación en estudios estadísticos de la consultoría *Butler Consultants* [63]. Ese será el porcentaje de reducción sobre el coste de producción de la empresa C3 como precio estimado para su suministro a la empresa C2.

En la segunda etapa se valora la construcción de una nueva infraestructura de transporte, necesaria para la implementación de la sinergia tal y como se indica en el modelo para la sinergia MA2. La inversión necesaria para esta infraestructura se estudia mediante la metodología definida para el transporte de fluidos en el capítulo 4 [53, 54, 55]. Al igual que en caso de la sinergia MA1, los flujos de gas natural, gasolina y petróleo, se considerarán flujos asimilables a un flujo de agua, para este caso de una estimación de orden de magnitud. Para ello se van a considerar dos fases dentro de las instalaciones de conexión necesarias. La primera de ellas es una conexión por tubería entre las dos empresas. La segunda fase serán la pertinente estación de bombeo que permita el desplazamiento del flujo de una empresa a otra a lo largo de las tuberías. Por otra lado se estiman igualmente

los costes de operación y mantenimiento que supondrán el funcionamiento de estas dos nuevas infraestructuras de transporte (tuberías y estaciones de bombeo), de manera que puedan ser considerados también en la estimación de la rentabilidad de la aplicación de la sinergia MA2.

### Beneficios Económicos Esperados

En la Tabla 4.23, se expresan los costes de inversión y mantenimiento de la infraestructura de tuberías y estaciones de bombeo, así como los cálculos de los costes de producción y las estimaciones sobre rentabilidad.

$$IEC_{MA2} = \frac{\text{Nuevos Costes de Operación}_{MA2}}{\text{Costes de Operación Iniciales}_{MA2}} = \frac{16,065,90 \text{ €} + 28,049,80 \text{ €}}{17,633,35 \text{ €}} = 2,50 > 1 \quad (4.19)$$

El Indicador de Eficiencia de Costes calculado en la Ecuación 4.19 tiene un valor mayor que 1, por lo que la implantación de la nueva sinergia no es rentable en términos de costes de operación. Como se puede comprobar en la Tabla 4.23 se obtiene un **aumento** global en los costes anuales de producción de la red de 26.482,36 € al año. Por lo tanto dado el valor del  $IEC_{MA2} > 1$ , se **desestima la sinergia MA1 para su implantación dentro de la red de sinergias** por no ser rentable.

**Tabla 4.23:** Costes estimados en el escenario posterior a la implantación de la sinergia MA2

VOLUMEN DE FLUJO IMPLICADO				
FLUJO		C1	C2	C3
Agua Clarificada		-	151.548 m <sup>3</sup> /año	9.644.760 m <sup>3</sup> /año
TOTAL COMPLEJO				9.796.308 m <sup>3</sup> /año
COSTES INICIALES DE PRODUCCIÓN				
FLUJO	COSTE	C1	C2	C3
Agua Clarificada	0,0018 €/m <sup>3</sup> .	-	272,78 €/año	17.360,57 €/año
TOTAL COSTES DEL COMPLEJO				17.633,35 €/año
COSTES DE PRODUCCIÓN CON SINERGIA MA2				
FLUJO	COSTE	C1	C2	C3
Agua Clarificada	0,00164 €/m <sup>3</sup> .	-	248,50 €/año	15.817,40 €/año
TOTAL COSTES DE LA RED				16.065,90 €/año
DIFERENCIA ANUAL DE COSTES DE PRODUCCIÓN DE LA RED				<b>-1.567,44 €/año</b>
COSTES FIJOS DE INVERSIÓN de CONEXIÓN con TUBERÍAS				
TUBERÍAS [53]				
PARÁMETROS		Millas	Km.	
Longitud de la Tubería		2,486	4	
		m <sup>3</sup> /día	Diámetro	
Diámetro normalizado de la tubería (cm)		415,2	4	
Diámetro normalizado de la tubería (Pulgadas)			1,57	
COSTES			Inversión	
Coste de Inversión unitario por milla (\$)			486.492 \$	
Coste de Inversión unitario por milla (€)			363.409,52 €	
COSTE TOTAL INVERSIÓN EN TUBERÍAS			903.436,08 €	
ESTACIONES DE BOMBEO [54]				
PARÁMETROS		m <sup>3</sup> /día	pies <sup>3</sup> /día .	
Capacidad de Bombeo		415,2	14.662,79	
Capacidad de Bombeo por Segundo			0,170	
COSTES			Inversión	
Coste de Inversión Unitario por Capacidad (\$)			248.930,34 \$	
Coste de Inversión Unitario por Capacidad (€)			185.950,96 €	
COSTE TOTAL INVERSIÓN EN ESTACIONES DE BOMBEO			31.557,40 €	
COSTE TOTAL EN INVERSIÓN INICIAL			934.993,48 €	
COSTES de OPERACIÓN y MANTENIMIENTO [55]				
		% Inversión	Coste Anueal	
Costes de Operación y Mantenimiento de tuberías, distribución, instalaciones, tanques y depósitos		1 %	9.349,93 €/año	
Costes de la Estaciones de Bombeo y Recepción de Fluido		2 %	18.699,87 €/año	
COSTES TOTALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO			28.049,80 €/año	
DIFERENCIA TOTAL COSTES DE OPERACIÓN			<b>26.482,36 €/año</b>	

### MA3. Captación común del agua de río

#### Descripción de la Sinergia

Se plantea la captación de agua de río desde el mismo punto de origen, de tal forma que abastezca a las tres empresas del sistema (C1, C2 y C3) de agua bruta. En este caso, dos de las tres empresas captan agua del río, y la otra capta una calidad de agua asimilable a la que captan las anteriores, por lo que se plantea la oportunidad de hacer una captación conjunta de río con la finalidad de ahorro económico en relación a los pagos de cánones de captación.

En la Figura 4.29 se observa gráficamente la estructura de funcionamiento de la sinergia de forma genérica.

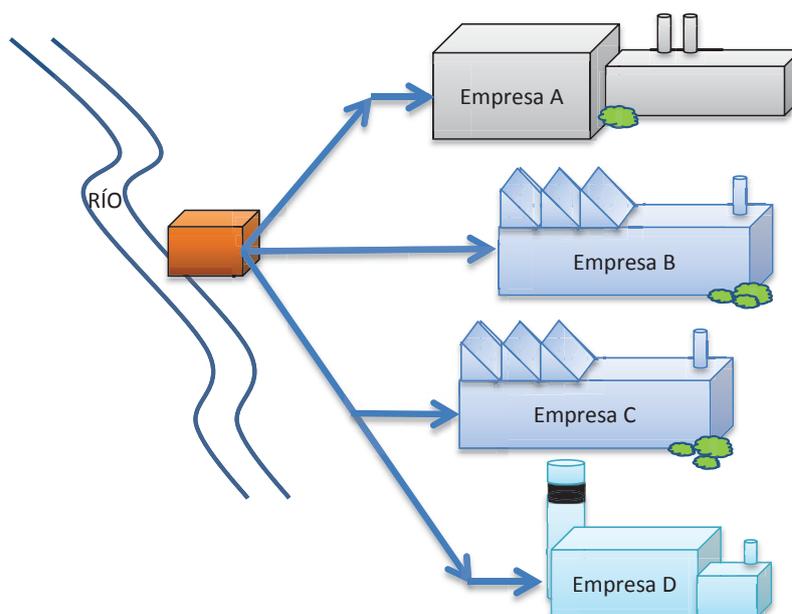


Figura 4.29: Representación gráfica de la sinergia MA3 [6]

#### Flujos Implicados

La empresa C1 posee un margen de capacidad de un 70% para la captación de agua

bruta en sus instalaciones. Se comprueba que el margen máximo disponible de la empresa con mayor captación de agua bruta para sus instalaciones, la empresa C3 en este caso, es del 70 %, unos  $4.906 \text{ m}^3/h$ , que son suficientes para abastecer los  $17,3 \text{ m}^3/h$  de agua bruta que utiliza la empresa C2 y los  $8,33 \text{ m}^3/h$  de agua bruta que utiliza la empresa C3. El margen de capacidad de las empresas C1 y C2 es del 17 % y del 86 % respectivamente, ( $1,67 \text{ m}^3/h$  y  $102,7 \text{ m}^3/h$  respectivamente), que no son suficientes para abastecer los  $2.094 \text{ m}^3/h$  que utiliza C3 para su producción.

Considerando el margen de capacidad disponible en las instalaciones de la empresa C3, (70 %), se observa un sobredimensionamiento para sus necesidades. Se plantea que la empresa C3, haga de proveedora del flujo de agua bruta a las empresas C1 y C2 aumentando su captación de agua bruta, aprovechando economías de escala y abaratando el coste de la captación del flujo.

## ANÁLISIS ECONÓMICO

### Costes Iniciales e Inversión Necesaria

Para el estudio de viabilidad económica de esta sinergias vamos a plantear dos etapas. En la primera de ellas se estima el coste de captación del agua del río en €/T, para cada uno de los escenarios posibles, inicial y con la aplicación de la sinergia MA3, de forma que se pueda estudiar la rentabilidad de la implantación de la sinergia en términos de ahorro en los costes finales de captación del flujo. En la segunda etapa se valora la inversión necesaria para las nuevas instalaciones de comunicación por tubería entre las empresas implicadas y el estudio de la recuperación de la inversión. Será necesario comunicar la empresa C3 con las empresas C1 y C2 para el suministro del flujo.

Para la primera etapa se evalúa el precio medio del canon de captación de agua del río por parte de las empresas. El canon de regulación estimado por la Dirección Técnica de la Confederación Hidrográfica del Cantábrico es de 601, €/año por cada *Litro/seg* que se

consume para abastecimientos y usos industriales consuntivos. Por lo tanto la estimación del coste del pago del canon, según el caudal utilizado por las empresas se indica en la primera parte de la Tabla 4.24.

No existe la posibilidad de aprovechar economías de escala en el caso de pago del canon de regulación, ya que depende directamente del caudal utilizado y no existen descuentos o tarifas especiales por grandes volúmenes de utilización. Por tanto el coste total del pago del canon de regulación para la red seguirá teniendo el mismo valor, y está expresado en la Tabla 4.24.

En la segunda etapa se valora la construcción de nueva infraestructura de transporte, necesarias para la implementación de la sinergia tal y como se indica en el modelo para la sinergia MA3. La inversión necesaria para esta infraestructura se estudia mediante la metodología definida para el transporte de fluidos en el capítulo 4. Para ello se van a considerar dos fases dentro de las instalaciones de conexión necesarias. La primera de ellas es una conexión por tubería entre las empresas C1 y C3, y C2 y C3. La segunda fase serán las pertinentes estaciones de bombeo que permitan el desplazamiento del flujo de una empresa a otra a lo largo de las tuberías. Por otra parte se estiman igualmente los costes de operación y mantenimiento que supondrán el funcionamiento de estas nuevas infraestructuras de transporte (tuberías y estaciones de bombeo), de manera que puedan ser considerados también en la estimación de la rentabilidad de la aplicación de la sinergia MA3. La estimación de inversión y costes de operación y mantenimiento de esta nueva infraestructura se encuentra reflejada en la Tabla 4.24.

### **Beneficios Económicos Esperados**

En la Tabla 4.24, se expresan los costes de inversión y mantenimiento de la infraestructura de tuberías y estaciones de bombeo, así como los cálculos de los costes de producción y las estimaciones sobre rentabilidad.

$$IEC_{MA3} = \frac{\text{Nuevos Costes de Operación}_{MA3}}{\text{Costes de Operación Iniciales}_{MA3}} = \frac{353,271,67 \text{ €} + 46,642,12 \text{ €}}{353,271,67 \text{ €}} = 1,13 > 1 \quad (4.20)$$

El Indicador de Eficiencia de Costes calculado en la Ecuación 4.20 tiene un valor mayor que 1, por lo que la implantación de la nueva sinergia no es rentable en términos de costes de operación. Como se puede comprobar en la Tabla 4.24 se obtiene un **aumento** global en los costes anuales de producción de la red de 46.642,12 € al año. Por lo tanto dado el valor del  $IEC_{MA3} > 1$ , **se desestima la sinergia MA3 para su implantación dentro de la red de sinergias** por no ser rentable.

**Tabla 4.24:** Costes estimados en el escenario posterior a la implantación de la sinergia MA3

VOLUMEN DE FLUJO IMPLICADO				
FLUJO		C1	C2	C3
Captación de Agua del Río ( $m^3/h$ )		8,33 $m^3/h$	17,3 $m^3/h$	2.094 $m^3/h$
Captación de Agua del Río ( $l/s$ )		2,31 $l/s$	4,81 $l/s$	581,67 $l/s$
TOTAL COMPLEJO				588,79 $m^3/h$
COSTES INICIALES DE PRODUCCIÓN				
FLUJO	COSTE	C1	C2	C3
Captación de Agua del Río	600 €/año por $l/s$ .	1.388,33 €/año	2.833,33 €/año	349.000 €/año
TOTAL COSTES DEL COMPLEJO				353.271,67 €/año
COSTES DE PRODUCCIÓN CON SINERGIA MA3				
FLUJO	COSTE	C1	C2	C3
Captación de Agua del Río	600 €/año por $l/s$ .	-	-	353.271,67 €/año
TOTAL COSTES DE LA RED				353.271,67 €/año
DIFERENCIA ANUAL DE COSTES DE PRODUCCIÓN DE LA RED				<b>0 €/año</b>
COSTES FIJOS DE INVERSIÓN de CONEXIÓN con TUBERÍAS				
TUBERÍAS [53]				
PARÁMETROS		Millas	Km.	
Longitud de la Tubería (C2 - C3)		1,678	4	
Longitud de la Tubería (C1 - C3)		2,486	2,7	
TOTAL MILLAS			4,164	
		$m^3/día$	Diámetro	
Diámetro normalizado de la tubería (cm)		615,12	4	
Diámetro normalizado de la tubería (Pulgadas)			1,57	
COSTES				Inversión
Coste de Inversión unitario por milla (\$)				486.492 \$
Coste de Inversión unitario por milla (€)				363.409,52 €
COSTE TOTAL INVERSIÓN EN TUBERÍAS				1.513.237,241 €
ESTACIONES DE BOMBEO [54]				
PARÁMETROS		$m^3/día$	$pies^3/día$	
Capacidad de Bombeo		615,12	21.722,96	
Capacidad de Bombeo por Segundo			0,251	
COSTES				Inversión
Coste de Inversión Unitario por Capacidad (\$)				220.868,13 \$
Coste de Inversión Unitario por Capacidad (€)				164.988,49 €
COSTE TOTAL INVERSIÓN EN ESTACIONES DE BOMBEO				41.481,93 €
COSTE TOTAL EN INVERSIÓN INICIAL				1.554.737,36 €
COSTES de OPERACIÓN y MANTENIMIENTO [55]				
		% Inversión	Coste Anual	
Costes de Operación y Mantenimiento de tuberías, distribución, instalaciones, tanques y depósitos		1 %	15.547,37 €/año	
Costes de la Estaciones de Bombeo y Recepción de Fluido		2 %	31.094,75 €/año	
COSTES TOTALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO				46.642,12 €/año
DIFERENCIA TOTAL COSTES DE OPERACIÓN				<b>46.642,12 €/año</b>

### 4.3. Resumen del análisis de viabilidad de las sinergias

RESUMEN DE ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE SINERGIAS				
	MM1	MM2	MM3	MM4
HIPÓTESIS	Proveedor Común para las Compañías del Sistema Industrial	Almacenamiento Común para flujos del Sistema Industrial	Gestor Común de Residuos para las Compañías del Sistema	Gestor Común de Residuos para las Compañías del Sistema
FLUJOS	Materia SAP	Materia SAP	Residuos Peligrosos	Residuos No Peligrosos
INVERSIÓN / COSTES	Inversión = 0 € Costes iniciales = 110.801,83 € Costes Finales = 108.257,39 €	Inversión = 0 € Costes iniciales = 2.732,2 € Costes Finales = 696,75 €	Inversión = 0 € Costes iniciales = 3.619,42 € Costes Finales = 1.123,66 €	Inversión = 0 € Costes iniciales = 306,9 € Costes Finales = 189,86 €
RENTABILIDAD	$IEC_{MM1} = 0,97$ $- IEC_{C1} = 0,99$ $- IEC_{C2} = 0,94$ $- IEC_{C3} = 1$	$IEC_{MM2} = 0,255$	$IEC_{MM3} = 0,31$	$IEC_{MM4} = 0,618$
ANÁLISIS AMBIENTAL	Esc. Inicial = $12,4tCO_2e$ Esc. Sinergia = $0,722tCO_2e$	-	Esc. Inicial = $15,3tCO_2e$ Esc. Sinergia = $12tCO_2e$	Esc. Inicial = $72,9tCO_2e$ Esc. Sinergia = $66,4tCO_2e$
	MA1	MA2	MA3	
HIPÓTESIS	Proveedor Interno de Flujo	Proveedor Interno de Flujo	Captación Común de Flujo del Sistema	
FLUJOS	Agua Desmineralizada	Agua Clarificada	Agua Bruta	
INVERSIÓN / COSTES	Inversión = 930.333,44 € Costes iniciales = 875921,79 € Costes Finales = 931.697,17 €	Inversión = 934.993,48 € Costes iniciales = 17.633,35 € Costes Finales = 44.115,7 €	Inversión = 1.554.737,36 € Costes iniciales = 353.271,67 € Costes Finales = 399.913,79 €	
RENTABILIDAD	$IEC_{MA1} = 0,94$ $VAN_{MA1} = -459.974,96$	$IEC_{MA2} = 2,50$	$IEC_{MA3} = 1,13$	
ANÁLISIS AMBIENTAL	-	-	-	

## Capítulo 5

# IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

### 5.1. Implementación Computacional de la Red

La creación de un red de simbiosis industrial es el primer paso para el análisis de las consecuencias de su implantación. El análisis económico y ambiental muestra el carácter sostenible de las sinergias que forman la red, pero no permite concluir nada más acerca de la robustez de la misma y de su respuesta ante posibles escenarios que puedan darse durante su funcionamiento. Para poder realizar este análisis de la red o de las sinergia que la forman de forma individual, es necesario recurrir a herramientas informáticas que permitan simular las condiciones bajo las cuales podría operar la red y estudiar el comportamiento de la misma. Para ello es necesario implementar computacionalmente la red creando un modelo que pueda ser analizado por la herramienta informática que realice la simulación.

Las sinergias que serán implementadas serán aquellas que superen los análisis económi-

co y ambiental planteados. Por lo tanto, una vez tomada la decisión sobre las sinergias que formarán la red de sinergias de simbiosis industrial dentro del complejo estudiado, es el momento de proceder a su implementación computacional.

La analogía ISSC, descrita en el capítulo 3 de este documento, relaciona directamente las entidades del modelo de sinergia industrial con el de una cadena de suministro, por lo que para que sea posible hacer uso de herramientas de simulación de procesos industriales y de cadena de suministro es necesario que las variables de entrada y las variables utilizadas para cuantificar el funcionamiento de ambos modelos sean las mismas.

El siguiente paso es el de diseñar los experimentos de simulación para los posibles escenarios que se contemplan bajo los que operará la red de simbiosis industrial. Siendo las variables de entradas utilizadas para la simulación del modelo de red de simbiosis las mismas a las usadas para simular cadenas de suministro, y usando para su simulación un modelo análogo a ambos conceptos (cadena de suministro y red de sinergias); si se analizan al simular las mismas variables de salida que en el caso de una cadena de suministro se obtendrán resultados equivalentes a nivel cualitativo en ambos casos. Esta equivalencia cualitativa de los resultados demuestra también la equivalencia conceptual de los comportamientos de una red de simbiosis industrial diseñada bajo la metodología descrita en este trabajo, y el de una cadena de suministro sostenible.

### **5.1.1. Modelado del sistema**

Las herramientas de simulación permiten modelar comportamientos de un sistema establecido y simular su funcionamiento estudiando sus resultados y las respuestas del sistema ante hipotéticas situaciones. En este caso se utiliza la herramienta SIMIO que utiliza un tipo de modelado basado en objetos y utiliza un paradigma de simulación definiendo los procesos que tienen lugar entre los objetos que se modelan mediante la

sucesión de eventos discretos en el tiempo.

Para comprender las diferencias entre los diferentes tipos de modelado, es necesario definir cada uno de ellos.

### Modelado basado en objeto.

El enfoque de modelado basado en objetos realiza la construcción de modelos de un sistema que representa un problema del mundo real y le hace corresponder con un conjunto de objetos relacionados entre si. Estos objetos contienen toda la información necesaria para ser definidos e identificados frente al resto de objetos del modelo. Será esa personalidad propia de cada uno de los objetos la que defina la forma de interactuar entre ellos a partir de los elementos de entradas introducidos al sistema [67].

## Modelado Basado en Objeto

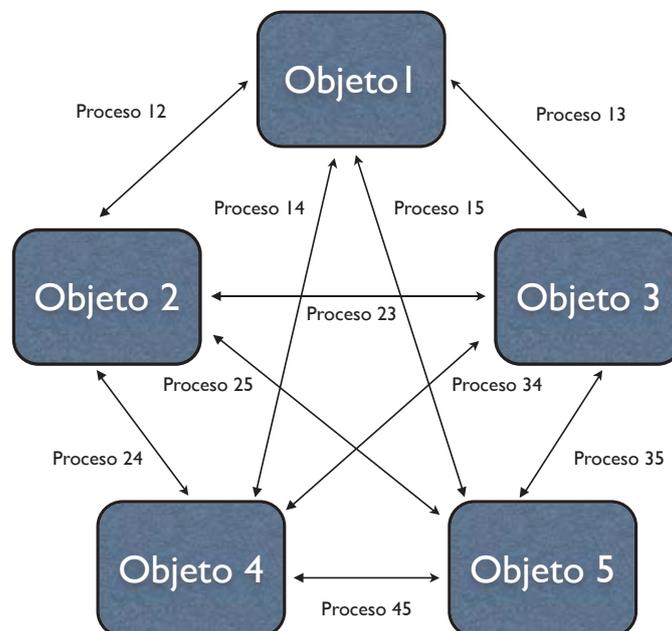


Figura 5.1: Modelo basado en objeto

Un ejemplo de este tipo de modelado, es el utilizado en ocasiones para definir una cadena de suministro. Se define cada una de las entidades de la cadena como objetos independientes, otorgando a cada objeto las cualidades que modelen el comportamiento en la realidad. El proveedor será un objeto con unas características propias, al igual que el productor y el cliente, y serán esas propiedades particulares las que definirán cómo van a relacionarse entre sí para generar un producto final que llegue a su destino a partir de unos elementos de entrada determinados. Si se produce un cambio en esas cualidades, igualmente se producirá un cambio en los procesos que tendrán lugar.

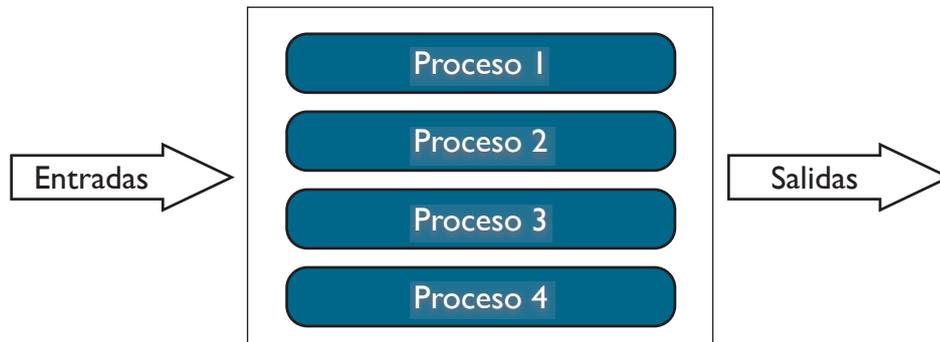
### **Modelado basado en proceso.**

Según la norma ISO 9000:2005 un proceso es 'un conjunto de actividades mutuamente relacionadas o que interactúan, las cuales transforman elementos de entrada en resultados'. Este tipo de enfoque modela un problema real a través de métodos computacionales que describan matemáticamente el comportamiento de los procesos que definen dicho problema. Un ejemplo de este tipo de modelado son los sistemas de gestión de calidad. En estos sistemas se modelan las actividades o procesos que tienen lugar dentro del mismo, de manera que tras definir los elementos de entrada del sistema, se puedan simular los resultados que se obtendrán a la salida. Estos elementos de entradas pueden ser las estadísticas de no conformidad de un producto de una empresa, que tras ser procesadas por el sistema de gestión de calidad ofrecerán unos resultados, que podrán ser en este caso medidas a adoptar para la mejora del sistema de producción.

Para este trabajo se ha decidido utilizar un modelado basado en objeto.

La herramienta SIMIO utiliza un modelado basado en objeto definiendo la herramienta los procesos que tendrán lugar a partir de las características de los objetos modelados. Este tipo de modelado está probando ser más intuitivo y cómodo para el usuario ya que permite realizar modelos en tres dimensiones de los objetos definidos y visualizar

## Modelado Basado en Proceso



**Figura 5.2:** Modelo basado en proceso

de una manera más dinámica el comportamiento de los procesos que tienen lugar entre dichos objetos con una apariencia similar a la del sistema real. Los objetos y procesos del modelo están animados, por lo que se puede comprobar los cambios de estado que sufran los objetos o el propio modelo durante la simulación.

Los objetos del modelo son construidos de una manera gráfica, no se necesita escribir código de programación para crear nuevos objetos, aunque existen objetos genéricos con características predefinidas por el programa que pueden ser utilizados sin necesidad de crear objetos propios. El software a su vez permite que un modelo sea un objeto que pueda ser insertado en otro modelo, de esta manera podemos diseñar por ejemplo una máquina y luego insertarla en un modelo de funcionamiento de una fábrica.

SIMIO puede ser utilizado para modelar un variado rango de sistemas incluyendo manufactura, salud, cadenas de suministros, transporte, defensa y minería.

### 5.1.2. Herramientas de Simulación de Procesos y Cadena de Suministro

La simulación es una potente metodología que consiste en reproducir en un computador el comportamiento de un sistema de interés, de manera a facilitar su estudio y análisis en situaciones en las que un análisis en la vida real no es posible o deseable (por ejemplo, porque el sistema no exista aún, o porque su estudio real resultaría muy costoso).

Prácticamente cualquier sistema, entendiendo éste como un conjunto de objetos o entidades, reales o virtuales, que interactúan entre sí siguiendo una lógica orientada a un objetivo común, es susceptible de ser simulado; para ello se construye un modelo o maqueta sobre el cual se aplican y experimentan las situaciones de interés para conocer el comportamiento del mencionado sistema.

La simulación es una técnica experimental de resolución de problemas, mediante la comprensión de cómo opera un sistema existente, o uno propuesto, y cómo puede funcionar mejor.

La simulación del comportamiento de una cadena de suministro es la principal solución para cuantificar los posibles cambios en su funcionamiento ante distintos escenarios, y para esta labor es necesario el uso de herramientas informáticas que faciliten la implementación de los datos y las características de un sistema para realizar los cálculos necesarios.

Esta solución se utiliza en casos en los que es demasiado costoso o arriesgado para hacer pruebas en vivo. La simulación proporciona una manera barata y sin riesgos de analizar la respuesta de una cadena de suministro ante posibles cambios que pueden ir desde una revisión simple del funcionamiento de una línea de producción ya existente a la emulación de un nuevo sistema de control o el rediseño de la cadena de suministro.

Otro uso de estos programas es el de análisis previo de potenciales cambios en sistemas

grandes o complejos. La simulación puede predecir con exactitud su comportamiento bajo condiciones de cambio y reducir el riesgo de tomar una mala decisión que se implemente en el sistema real ayudando a entender cómo sus diversos componentes interactúan entre sí y cómo afectan el rendimiento global del sistema.

Estas herramientas a su vez pueden suponer una gran ayuda a la hora de realizar presentaciones o proponer ideas, ayudando a la comunicación en la toma de decisiones. El desarrollo de un modelo puede ayudar a que se comprenda mejor el funcionamiento de un sistema durante una presentación o puede servir de soporte para ilustrar una propuesta mediante una interfaz gráfica en tres dimensiones muy atractivas para el usuario e informes numéricos desglosados y tabulados.

En este trabajo se plantea la utilización de estas herramientas dada la analogía entre un sistema de cadena de suministro y el sistema de una red de sinergias de simbiosis industrial.

Para cada uno de los experimentos de análisis de la red de sinergias con la herramienta SIMIO se utilizan idénticos inputs y variables de estudio que en el caso de cadenas de suministro sostenibles, por lo que si los resultados y valores de dichas variables de análisis obtenidos durante la simulación de la red son los esperados para un análisis de cadenas de suministro, se demuestra la posibilidad de utilizar los mismos métodos de análisis y simulación para la nueva red de sinergias de simbiosis industrial que los utilizados para una cadena de suministro sostenible.

### **5.1.3. Características de la Herramienta**

Muchos paquetes de simulación se basan en la tecnología 2D, limitando su capacidad de visualizar de forma realista el proceso o la interpretación de las relaciones espaciales en tres dimensiones en el sistema. SIMIO proporciona un verdadero entorno de modelado

3D basado en objetos que permite construir el modelo tridimensional en un solo paso desde una vista en dos dimensiones permitiendo cambiar entre ambas vistas según las necesidades del usuario.

La herramienta SIMIO se adapta bien a los objetivos de análisis de la red de simbiosis industrial, ya que permite a los usuarios generar modelos rápidamente usando un método de modelado único basado en objetos inteligentes. Otra de las ventajas que aporta este software es la capacidad de modelar sistemas complejos sin necesidad de código, permitiendo a un mayor abanico de profesionales su uso sin necesidad de tener formación en programación. También dispone de una agradable visualización 3D que facilita en gran medida la presentación de ideas o resultados.

SIMIO le da un enfoque diferente al análisis de la cadena de suministro mediante la posibilidad de realizar una simulación de su comportamiento y observar los cambios de manera dinámica sin necesidad de implementar previamente esas variaciones en la realidad, modelando el sistema real de forma rápida mediante el uso de objetos personalizables en una interfaz libre de código. SIMIO utiliza dichos objetos para generar el sistema completo y simular su funcionamiento a partir de las cualidades que se definen para cada uno de los objetos.

Un ejemplo de esta manera de trabajar sería el estudio y simulación de un nuevo “layout” dentro de un almacén de mercancías. El usuario modela cada uno de los objetos que participa en el funcionamiento del almacén, y la herramienta desarrolla los procesos entre cada objeto atendiendo a las características de cada objeto. Estos objetos serán desde los puntos de entrada y salida de las mercancías, pasando por los puntos de procesado de las mismas, los puntos de almacenaje e incluso los operarios o máquinas encargados del transporte de dichas mercancías. La manera en que funcionará dicho almacén (tiempos, costes, colas, etc...) serán simuladas por la herramienta. Esta simulación permite comprobar previamente sin necesidad de implementar ningún proyecto real y sin costes

alguno, la respuesta de un almacén ante un nuevo escenario proyectado por el usuario, algo muy importante a la hora de tomar decisiones sobre aspectos técnicos y cambios en los métodos de operación.

SIMIO realiza una simulación basada en eventos discretos. Es una técnica informática de simulación dinámica de sistemas. se caracteriza por un control en la variable del tiempo que permite avanzar a éste a intervalos variables, en función de la planificación de ocurrencia de tales eventos a un tiempo futuro. Un requisito para aplicar esta técnica es que las variables que definen el sistema no cambien su comportamiento durante el intervalo simulado.

Un evento es un suceso que hace cambiar las variables de estado del sistema. El estado del sistema solo cambia mediante la ejecución de eventos y la ejecución de un evento puede desencadenar la generación de nuevos eventos futuros. Cada uno está marcado por su tiempo, por lo que el orden de generación puede no coincidir con el orden de ejecución.

Por otro lado SIMIO muestra carencias a la hora de realizar el análisis económico y ambiental de cada sinergia individualmente, ya que su módulo de simulación no es fácilmente adaptable a estas circunstancias, y cualquier otra herramienta matemática facilita en mayor medida este tipo de cálculos.

## **5.2. Variables de Análisis del Rendimiento de una Cadena de Suministro**

Una cadena de suministro es una serie de actividades económicas conectadas que se ocupan de la planificación y el control de las materias primas, componentes y productos terminados desde los proveedores hasta los clientes finales [68]. La visión tradicional de la gestión de la cadena de suministro de una compañía es la de aprovechar el estudio de

la misma para lograr la minimización de los costes sin dejar de lado la calidad y el nivel del servicio a lo largo de toda la cadena, o lo que es lo mismo, conseguir optimizar el rendimiento de la misma (*Supply Chain Performance*).

Existe bibliografía donde se proponen diferentes medidas para el rendimiento de una cadena de suministro. Por ejemplo, Stevens [69] utiliza una medida del rendimiento de un cadena de suministro en términos de nivel de inventario, nivel de servicio, eficiencia de producción, rendimiento de los proveedores y el costo. Neely et al. [70] sugiere la calidad, el tiempo, la flexibilidad y el coste como variables de medidas de rendimiento y también señala la necesidad de un enfoque de aplicación general para el conjunto de estas medidas.

Existen investigadores que han tratado de evaluar el rendimiento de una cadena de suministro de diferentes maneras, pero la mayoría de las medidas de rendimiento hasta ahora están orientadas en su mayoría hacia el estudio de los resultados económicos más que hacia otros aspectos tales como la satisfacción del cliente [71].

El modelo de cadena de suministro en el que se ha basado el modelo diseñado en este trabajo, el modelo SCOR, desarrollado por el Supply Chain Council, trabaja con indicadores que reflejan la eficacia de cada una de las empresas implicadas en la utilización de sus recursos para satisfacer al cliente. Tiene en cuenta el rendimiento de estas empresas desde el punto de vista de la salida y la entrada de cada una de las actividades implicadas [72].

La diferencia de opiniones sobre el estudio de las cadenas de suministro por cada una de las firmas implicadas da lugar a diferentes consideraciones en las medidas de rendimiento utilizadas, dejando de lado algunas o añadiendo nuevas variables según el marco en el que quiera trabajar cada compañía, y por consiguiente, no se llega a un nivel óptimo de mejora por posibles solapamientos o incongruencias en las medidas adoptadas por cada compañía dentro de una misma cadena de suministro [73].

Por esta razón es complicado tomar la decisión sobre que variables de medida utilizar a la hora de simular una cadena de suministro o en este caso una red de sinergias. Al analizar el rendimiento del sistema, una evaluación cualitativa, como 'bueno', 'regular', 'adecuado' o 'pobre' son poco precisas y difíciles de utilizar en la toma de decisiones. Por esta razón, las medidas de rendimiento cuantitativas son más adecuadas para este tipo de análisis. Una medida numérica de rendimiento ofrece una información más precisa sobre el comportamiento del caso bajo estudio. Sin embargo, una medida de rendimiento en forma numérica puede no describir adecuadamente el rendimiento del sistema, o puede que una posible falta de precisión en el modelo, convierta a las medidas alcanzadas en poco representativas a la hora de utilizarlas en la toma de decisiones para la optimización de la red.

Con el fin de estudiar el mayor número de medidas de rendimiento disponibles, los investigadores las han repartido en categorías. Neely et al. [70] presentan algunas de esas categorías en la literatura, incluyendo: la calidad, el tiempo, la flexibilidad, y el coste. A pesar de existir un número elevado de categorías, predominan dos medidas de rendimiento que se utilizan en la gran mayoría de modelos de cadena de suministro [74]. Éstas son:

- Costes
- Servicio al Cliente

Correspondiendo la variables **costes** a los costes de inversión e inventario y a los costes de operación de la compañía. A su vez las variables de **Servicio al Cliente** incluyen los tiempos de transporte de bienes, las posibles faltas en el servicio por falta de existencias, y la capacidad de suministro al cliente (producción).

Existen otras medidas de rendimiento que se han demostrado como adecuadas para el análisis de la cadena de suministro, pero que aún no se han utilizado en investigaciones sobre modelado de cadenas de suministro. Aunque estas medidas pueden ser importantes

para su análisis, su uso en modelos reales es complejo, ya que la naturaleza cualitativa de este tipo de medidas hace que sean difíciles de incorporar en los modelos cuantitativos. Ejemplos de estas medidas son: satisfacción del cliente [75], el flujo de información [76], el desempeño del proveedor [77], y la gestión de riesgos [78]. En este trabajo evitaremos el uso de estas variables dada la complejidad para cuantificar su peso dentro del modelo utilizado.

El uso de una sola variable de rendimiento es atractivo debido a su simplicidad. Sin embargo, se debe estar seguro de que la medida utilizada describe adecuadamente el rendimiento del sistema, o produce limitaciones a la hora de describir el comportamiento del modelo utilizado. Beamon [79] identifica y evalúa diferentes medidas de rendimiento de la cadena de suministro a nivel individual. Éstas variables demostraron no aportar resultados fiables, pudiendo por ejemplo lograrse cadenas de suministro con un coste mínimo asociado, pero que por contra trabajan con unos tiempos de atención al cliente muy pobres, disminuyendo enormemente la calidad del servicio.

Por esta razón en este trabajo se van a considerar como variables de análisis las expuestas por Beamon [74], y mencionadas anteriormente.

- Costes de inversión
- Costes de Operación
- Tiempos de Transporte
- Faltas en el Servicio
- Capacidad de Suministro al Cliente

### 5.3. Descripción de Variables de Simulación dentro del modelo ISSC

Cada una de las variables utilizadas tiene una equivalencia directa dentro de una red de sinergias de simbiosis industrial a través del modelo ISSC desarrollado.

#### **Costes de Inversión**

Esta variable estudia aquellos costes capitales que son necesarios para que se ponga en funcionamiento el flujo de materia entre las compañías implicadas en cada momento. Estos costes son imprescindibles en un primer momento y son considerados costes fijos dentro de la sinergia.

Dentro de una red de sinergias, estos costes también se asocian al comienzo de la actividad de cada una de las entidades implicadas en el flujo. En caso de que la entidad ya exista y esté dispuesta para su funcionamiento, estos costes también pueden reflejar posibles tasas públicas que graven la implantación de una nueva actividad o posibles inversiones de ampliación necesarias para cubrir las nuevas necesidades de la sinergia.

#### **Costes de Operación**

Son necesarios para que una sinergia transporte el flujo desde la entidad inicial hasta el destino del mismo. Estos costes se encuentran repartidos a lo largo del camino del flujo e incluyen los costes de producción si es el caso, adquisición de mercancías, transporte interno, costes de mantenimiento, tasas públicas por funcionamiento o canon, etc.

#### **Tiempos de Transporte**

Dentro del modelo ISSC los tiempos en el transporte del flujo entre entidades incurren directamente en los costes de operación de la entidad encargada del mismo y en el aumento

del impacto ambiental que supondría el aumento del tiempo y por tanto de la distancia de transporte, por lo que se ha de buscar que el posible nuevo escenario de funcionamiento a simular siga garantizando el beneficio no sólo económico, sino ambiental de la nueva programación de transporte del flujo entre compañías.

### **Faltas en el Servicio**

Cabe la posibilidad de que a modo de imprevisto, una compañía no pueda afrontar el suministro de un flujo por diversas razones. Desde un problema en su proceso productivo hasta problemas con proveedores, paradas no programadas de mantenimiento puede provocar faltas en el servicio que se da a una compañía cliente.

Estas faltas pueden ser asumibles por la compañía cliente o pueden producir en ella unos pérdidas asociadas al paro de su actividad o la pérdida de pedidos. Posibles soluciones serían un mayor abastecimiento para la acumulación de stock, o la búsqueda de nuevos proveedores de reserva, que podrían incurrir en cualquier caso en costes extra tanto de transporte como de operación.

Aplicadas al modelo ISSC estas faltas supondrán las necesidad de utilizar nuevas entidades que hagan que se mantenga el flujo entre las compañías, no contemplando interrupciones ni paradas del mismo. Como es lógico, las entidades alternativas que se implanten dentro del flujo durante estas faltas, contarán con características diferentes de operación y transporte que habrá que contemplar durante el análisis.

La robustez de la red quedará representada por la capacidad de la misma de sobreponerse a posibles faltas sin suponer la pérdida de rentabilidad de la misma.

### **Capacidad de Suministro**

Esta variable representa la capacidad de una empresa tanto receptora como suministradora de modificar las cantidades a enviar o recibir por cada envío o transporte, sin

poder perder la rentabilidad de participar en la red de sinergias.

Las posibles variantes de una rutina de transporte de un flujo discreto, se contemplan dentro del modelo ISSC en las entidades encargadas de realizar ese transporte y de recibir el flujo.

Cada uno de los escenarios a contemplar incurrirá en diferentes costes de operación (costes variables) así como en cambios en el impacto ambiental de la actividad, por lo que se ha de comprobar el número de viajes por unidad de tiempo asumibles por la red para garantizar la rentabilidad de participar en la red de sinergias.

Esta capacidad de adaptación a las condiciones de suministro refleja tanto la robustez de una cadena de suministro como la de una red de sinergias de simbiosis industrial.

## 5.4. Descripción gráfica del modelado y la simulación

El primer paso para la implementación computacional del sistema será realizar la representación del modelo ISSC de la red en la herramienta mediante su interfaz gráfica. Cada una de las entidades que participan en cada modelo de sinergia tiene su equivalencia directa según el modelo ISSC en una entidad de una cadena de suministro, que son las mismas que utiliza SIMIO para definir la red.

Cada uno de estos objetos o entidades, consta de una serie de características que pueden ser definidas por el usuario y que confieren a cada uno la personalidad y las condiciones particulares dentro de una sinergia y de la red.

Las entidades definidas dentro de la herramienta y sus equivalencias dentro del modelo ISSC se muestran en la tabla 5.1.

**Tabla 5.1:** Modelo ISSC y SIMIO de las entidades de la red

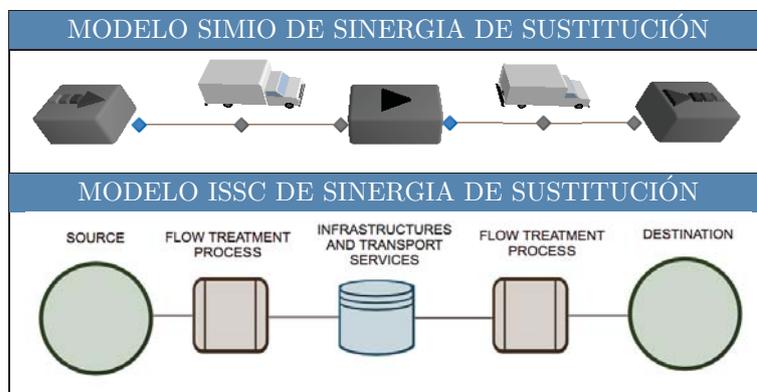
ENTIDAD EN SIMIO	ENTIDAD EN MODELO ISSC
Source 	Origen 
Sink 	Destino 
Server 	Proceso de Adaptación al Flujo 
Vehicles/ Entities 	Infraestructura y Servicios al Transporte 

Para la construcción del modelo dentro de la herramienta será necesario conectar cada una de las entidades de la misma manera que se realiza en el modelo ISSC para cada una de las sinergias.

La forma de cada uno de los tipos de sinergias dentro de la herramienta, y su equivalente en el modelo ISSC se muestra en las tablas 5.2 y 5.3

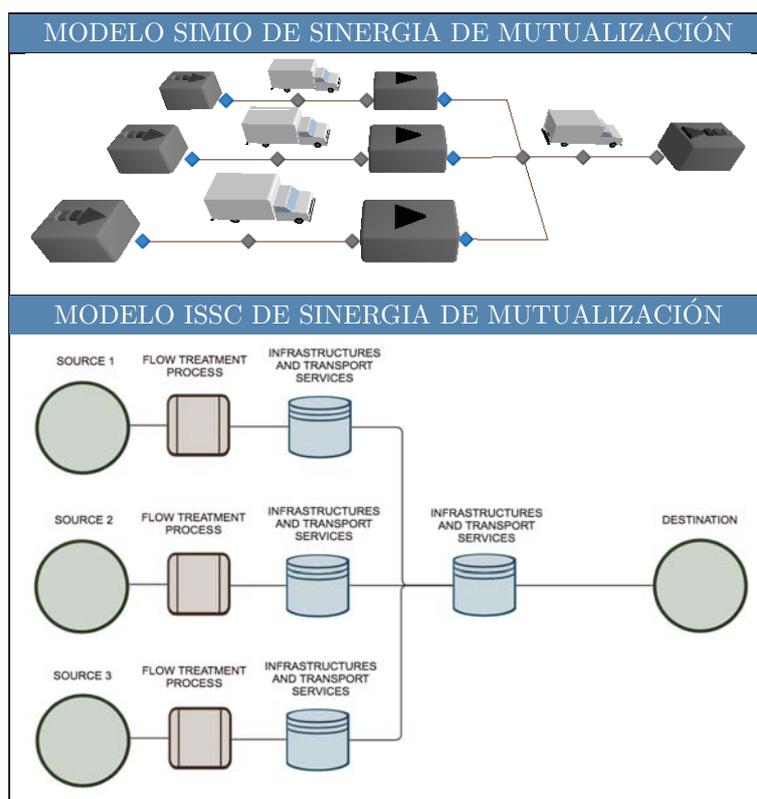
## SINERGIA DE SUSTITUCIÓN

Tabla 5.2: Modelo ISSC y SIMIO de las entidades de la red



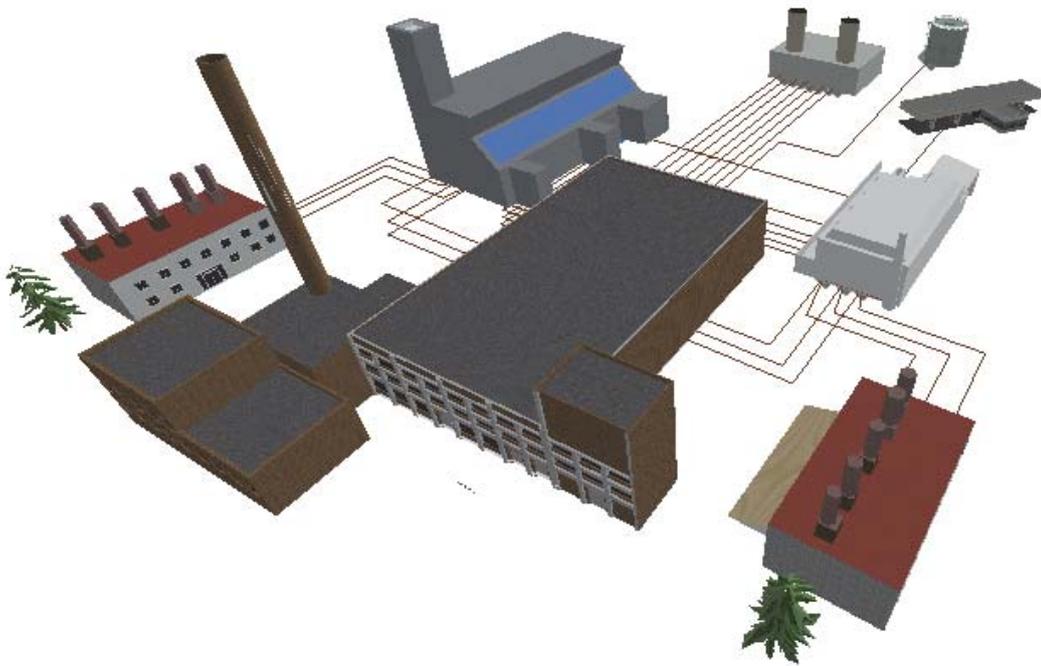
## SINERGIA DE MUTUALIZACIÓN

Tabla 5.3: Modelo ISSC y SIMIO de las entidades de la red



Cada una de las *Discrete Entities* correspondientes al transporte del flujo por la sinergia, han sido definidas en la herramienta de manera que correspondan a una tonelada de producto durante la simulación. Los vehículos son objetos capaces de transportar entidades discretas de flujo de manera unificada, que simula el comportamiento de las sinergias donde el flujo (entidades discretas) se unifica en algún punto de su recorrido.

Una vez definida la forma de cada una de las sinergias que participarán, se ha de definir el conjunto de la red al completo de manera equivalente al escenario  $IS_0$ . Gráficamente con los arreglos que permite la interfaz de la herramienta, la red tendrá la apariencia que se muestra en la figura 5.3



**Figura 5.3:** Red de sinergias de simbiosis industrial implementada en SIMIO

A partir de la modificación de los parámetros de funcionamiento de la red, se conseguirá simular los nuevos escenarios definidos por cada uno de los experimentos planteados para el sistema.

## Capítulo 6

# RESILIENCIA EN REDES DE SIMBIOSIS INDUSTRIAL

En la práctica, la resiliencia y robustez se han definido en la ecología industrial a partir de cualidades propias de redes o sistemas industriales, como por ejemplo, adaptabilidad, grado de distribución, entre otros [80].

La resiliencia se considera a menudo la capacidad de una red para mantener potencialmente su estructura y su función adaptándose a una perturbación externa (por ejemplo, una subida de precios). Sin embargo las perturbaciones externas pueden consistir a su vez en una eliminación directa de los nodos de la red, donde la distinción entre los conceptos de robustez y resiliencia no es clara. Ambos se refieren a la capacidad de un sistema o red para mantener su función y estructura ante perturbaciones, y los términos se utilizan indistintamente en la literatura, pero Leach et al. hacen la distinción entre robustez y resistencia basándose en la naturaleza de la perturbación externa. Consideran que aquellos sistemas que mantienen su estructura y función ante perturbaciones a corto plazo sean resistentes y en casos a largo plazo subraya sean robusto [81].

En este trabajo se consideran ambos conceptos como equivalentes. Es necesario también separar el concepto de resiliencia aplicado a estudios de cadenas de suministro y de ecosistemas industriales sostenibles.

## 6.1. Resiliencia en Sistemas ecológicos

El concepto de resiliencia fue desarrollado por primera vez en ecología por Holling para describir la capacidad de un sistema natural de recuperarse de una perturbación o suceso volviendo a un estado de equilibrio [82]. Otros autores posteriormente han definido esta capacidad de recuperación de una manera similar a Holling, considerando la resiliencia como el tiempo requerido por un sistema para volver a un equilibrio o estado estacionario después de una perturbación [82]. Carpenter et al considera el concepto de sostenibilidad en un ecosistema como una propiedad dentro de un modelo dinámico, e incluso como una cantidad medible que pueda ser evaluada en estudios de sistemas socio-ecológicos [83]. El significado ecológico de resiliencia se ha ampliado por otros autores, de manera que pueda proporcionar directrices para el diseño y la gestión de cadenas de suministro [84, 85] y para sistemas de ingeniería sostenible [86].

## 6.2. Resiliencia en ecosistemas industriales

Los ecosistemas industriales se han considerado como complejos sistemas adaptativos con capacidad de auto-organización [87, 88], a los que se aplican cualitativa y cuantitativamente modelos ecológicos como las redes alimentarias [89] y los ciclos de adaptación [90]. Zhu & Ruth estudian los flujos de materia y energía en los ecosistemas industriales demostrando ser claves en su resiliencia y transición entre distintos estados. La disponibilidad limitada de estos flujos condiciona los ciclos internos y los procesos de re-

troalimentación dentro del sistema, controlando por tanto su función de cambio. Exploran los factores que pueden influir en su capacidad de recuperación de estos ecosistemas ante perturbaciones en su funcionamiento empleando un modelo de red de dependencia entre empresas [91].

### 6.3. Resiliencia en Cadenas de Suministro

La literatura sobre el concepto de resiliencia para una cadena de suministro aborda el rendimiento operacional y económico en un entorno empresarial interconectado y dinámico que está sujeto a cambios relevantes y rápidos [91]. No es el único ejemplo de definición para el concepto de resiliencia. Se ha estudiado por multitud de autores desde diferentes enfoques en la literatura. Entre todas las definiciones dadas en la literatura, la perspectiva de la frase puede alterar, pero el concepto básico de la resiliencia está relacionada con la capacidad de un sistema para volver a un estado estable después de la interrupción. Esto implica tanto la capacidad de soportar perturbaciones puntuales, así como, la capacidad de adaptarse a nuevos escenarios de riesgo [92]. Por ejemplo, Christopher y Peck define la resiliencia como "la capacidad de un sistema para volver a su estado original o cambiar a un nuevo estado, más beneficioso, después de sufrir una perturbación" [84]. Es un tema de interés en disciplinas emergentes relativamente nuevas como la gestión de riesgos en una cadena de suministro sostenible [93]. La resiliencia es considerada por Ivanov y Sokolov como una intersección de los conceptos de robustez, flexibilidad y adaptación [94]. Yadav et al. sin embargo consideran los costes, las ventas y el diseño del producto los tres criterios que determinan la resiliencia o robustez de una cadena de suministro [95].

Walker et al. conciben la capacidad de recuperación de un sistema extrapolando los conceptos que ellos mismos aplican para ecosistemas. Describen los aspectos críticos de la resiliencia como la latitud, la resistencia, la precariedad y panarquía. 'Latitud' se refiere al rango elástico en el que un sistema puede ser perturbado o deformado sin perder la

capacidad de volver a su forma original. 'Resistencia' es la dificultad o el impacto que se requiere para crear una unidad de cambio en el sistema. 'Precariedad' describe el grado de cercanía del sistema a superar el límite elástico del sistema para recuperar el equilibrio original y someterse por tanto a una reestructuración permanente a un nuevo estado. Por último, 'panarquía' se refiere a las interacciones cruzadas entre las diferentes propiedades del sistema y cómo perturbaciones producidas en una de ellas, podrían afectar a otras diferentes creando cambios de régimen de funcionamiento [96]. En este trabajo se consideran para analizar la capacidad de recuperación de la red de sinergia las dimensiones de latitud y resistencia del sistema.

## 6.4. Resiliencia en redes de sinergias

En este trabajo, se aplican los conceptos de latitud y resistencia para definir la resiliencia de la red de sinergias. La latitud estudia el rango máximo existente a lo largo de la simulación entre los costes de operación para el caso inicial y el escenario simulado considerado en cada experimento. Cuanto mayor sea el intervalo entre los costes de operación de ambos escenarios, mayor es la resiliencia de la red y por tanto su capacidad de recuperación ante cada perturbación. La resistencia contempla la capacidad de cada perturbación de producir un cambio unitario en los costes de operación del sistema. Se representa por la pendiente de la función de costes de operación en el escenario de perturbación. Cuanto mayor es la pendiente en el gráfico, menor es la resiliencia de la red ante la nueva situación.

A partir de los resultados de la simulación se estudia la resiliencia de la red para cada escenario de modo cualitativo. Una latitud elevada en los costes de operación de la red y una resistencia con pendiente cercana al eje de abscisas, representan una alta resiliencia de la red ante una escenario de perturbación, siempre que la red se mantenga rentable. Un caso donde la latitud de la red sea baja o la resistencia sea elevada, pero no

se consiga garantizar la rentabilidad de la red existiendo un punto crítico de rentabilidad, representa una resiliencia media. Si la latitud de la red es baja y la resistencia de la red es elevada viéndose la rentabilidad de la red comprometida durante la simulación del escenario de perturbación, se considera que la resiliencia de la red será baja. y resistencia con pendiente cercana al eje de abscisas en los costes de operación en comparación con los valores absolutos que garanticen la rentabilidad de la red representan una alta resiliencia de la red ante el escenario de perturbación simulado. estudio.

Se ha de diferenciar los conceptos de red resiliente y red sostenible. En el primer caso se estudia la capacidad de la red de evolucionar hacia un nuevo estado de equilibrio o de regresar a un estado anterior tras una perturbación de su funcionamiento. En el caso de una red sostenible se estudia la capacidad de la red de funcionar bajo condiciones económicas, ambientales y sociales de forma sostenida y armónica a lo largo del tiempo. Una red de sinergias puede tener la cualidad de ser sostenible bajo un funcionamiento estacionario, pero ser poco resiliente ante perturbaciones, dejando de ser sostenible a raíz de los cambios que sufra.

# Capítulo 7

## EXPERIMENTOS

Para realizar la simulación de los diferentes escenarios posibles para la red de sinergias obtenida, se ha de definir en primer lugar el escenario de funcionamiento de la red ( $ISSC_0$ ) con el comportamiento normal esperado para las variables de estudio, de manera que posteriormente pueda ser comparado con los escenarios planteados en cada uno de los experimentos.

SOURCE	→	Proveedor	→	Origen
SINK	→	Cliente	→	Destino
SERVER	→	Producción	→	Proceso de adaptación al flujo
ENTITIES & VEHICLES	→	Distribución	→	Infraestructura y Servicios al Transporte

### 7.1. Nomenclatura de los escenarios

A continuación se define la nomenclatura a utilizar para cada uno de los escenarios que se plantean y el estado de cada compañía y de la red en cada uno de ellos.

**Sistema inicial (sin red de sinergias)**

- R - Escenario previo del sistema sin implantación de la red de sinergias.

**Red de simbiosis Industrial**

- $IS_0$  - Escenario inicial.  
 $IS_{1,1}$  - Escenario para experimento 1.1.  
 $IS_{1,2}$  - Escenario para experimento 1.2.  
 $IS_2$  - Escenario para experimento 2.  
 $IS_3$  - Escenario para experimento 3.

**Compañía i**

- $C_{i,R}$  - Escenario previo a implantación de red de sinergias.  
 $C_{i,0}$  - Escenario inicial.  
 $C_{i,1,1}$  - Escenario para experimento 1.1.  
 $C_{i,1,2}$  - Escenario para experimento 1.2.  
 $C_{i,2}$  - Escenario para experimento 2.  
 $C_{i,3}$  - Escenario para experimento 3.

Siendo 'i' cada una de las empresas implicadas en la red de sinergias

## 7.2. Escenario inicial de Funcionamiento ( $IS_0$ )

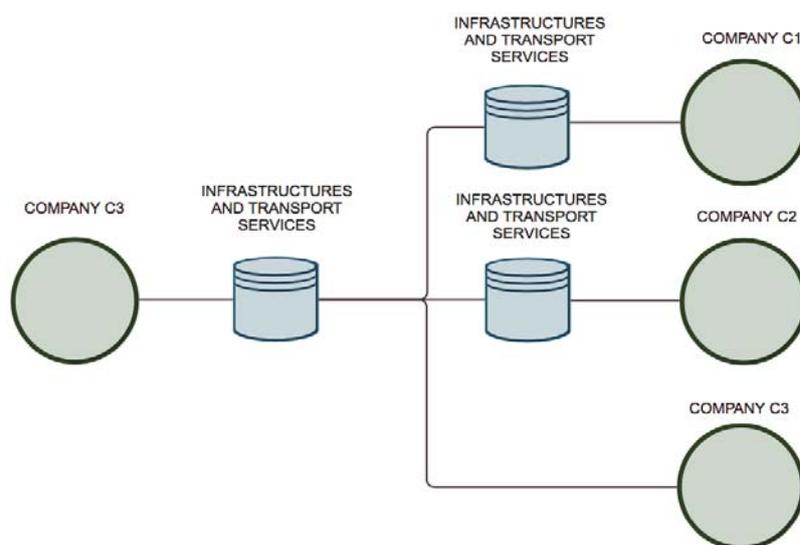
A partir de los datos obtenidos en el apartado 'Resultados' para la red final en el análisis económico de las sinergias, podemos implementar en la herramienta informática las condiciones de funcionamiento que tendrá la red tanto en la realidad como durante su simulación.

Cada una de estas sinergias tendrá unas condiciones particulares para las variables de

estudio que se han definido.

### 7.2.1. MM1. Proveedor Común de Materia SAP

El modelo ISSC de esta sinergia es el reflejado en la figura 7.1:



**Figura 7.1:** Modelo ISSC de sinergia MM1

En esta sinergia los costes capitales o de inversión serán nulos ya que en este caso, el ahorro por la implementación de la sinergia se produce en los costes de operación asociados a los precios de las mercancías que forman el flujo de la sinergia.

Los precios del transporte están incluido en el precio final que se estima para cada producto, por lo que se consideran estudiados dentro de dicho precio.

Por esta razón los costes de operación en esta sinergia serán asumidos por la entidad Server de la herramienta, que corresponde al proceso de adaptación al flujo del modelo ISSC, con las unidades para el precio de €/ton.

En  $ISSC_0$  las faltas de suministro tendrán un valor nulo, la rutina de transporte será

la estudiada durante el análisis económico y ambiental y la capacidad de suministro del 100 %.

**Tabla 7.1:** Valores de variables de estudio en ISSC<sub>0</sub> para la sinergia MM1

Costes de Inversión	Nulo
Costes de Operación	Precio del Flujo (€/ton.)
Tiempos de transporte	Incluidos en el precio del flujo
Faltas en el servicio	0 %
Capacidad de Suministro	100 %

Los precios por flujo de la sinergia MM1 durante el funcionamiento estudiado para la red se muestran en la tabla 7.2

**Tabla 7.2:** Precios por flujo para la sinergia MM1

FLUJO	COSTES (€/Ton)
Hipoclorito	158.55
Ácido Clorhídrico	125.55
Cloro	177.54
Sosa Cáustica	82
Oxígeno	105
Aceites Hidráulicos	2.233,8

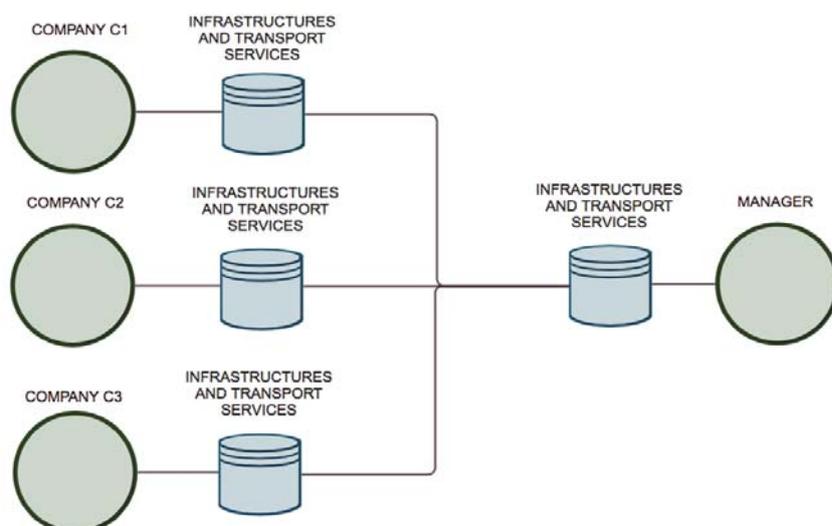
En el caso del Oxígeno y los Aceites hidráulicos, no es necesario contemplar los precios ya que se mantienen intactos que en el caso inicial previo a la implantación de la red de sinergias (R), por lo que no producen ningún cambio en la rentabilidad de la misma.

### 7.2.2. MM3. Gestión Conjunta de Residuos peligrosos

El modelo ISSC de esta sinergia es el reflejado en la figura 7.2.

La implantación de esta sinergia supone un beneficio económico debido a los ahorros que producirá la unificación de los transportes del flujo por parte de las empresas implicadas, siendo la entidad de Infraestructuras y Servicios al Transporte del modelo ISSC de la sinergia la que asuma por tanto los costes asociados a la nueva rutina de transportes.

Para esta sinergia de mutualización se definirá un vehículo cargando las diferentes entidades discretas que lleguen desde cada una las empresas simulando el efecto real de unificar el flujo tal y como se han definido en el estudio de viabilidad económica. Estos vehículos serán los que soporten los costes asociados al transporte de las entidades discretas, es decir el flujo, en unidades de €/Viaje.



**Figura 7.2:** Modelo ISSC de sinergia MM3

Para la implantación de la sinergia los costes capitales o de inversión serán nulos, ya que no es necesaria una inversión inicial para empezar a funcionar.

En R las faltas de suministro tendrán un valor nulo, la rutina de transporte será la estudiada durante el análisis económico y ambiental y la capacidad de suministro será del 100 %.

**Tabla 7.3:** Valores de variables de estudio en  $ISSC_0$  para la sinergia MM3

Costes de Inversión	Nulo
Costes de Operación	Costes de Transporte (€/Viaje)
Tiempos de transporte	Estudiada en las Tablas 4.13 y 4.14
Faltas en el servicio	0 %
Capacidad de Suministro	100 %

Los costes de transporte para cada flujo de la sinergia MM3 se muestran en la tabla

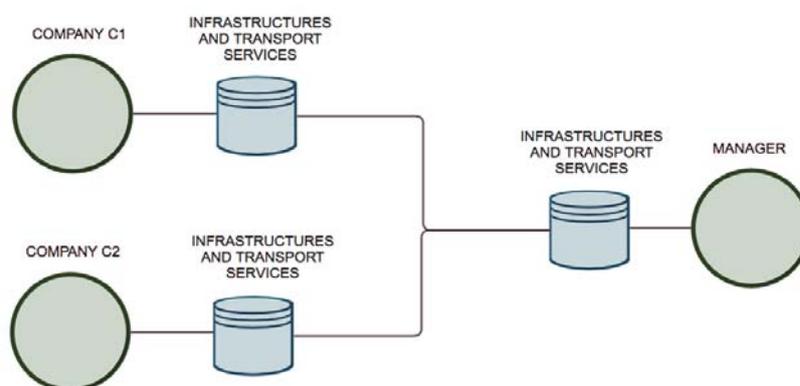
7.4

**Tabla 7.4:** Precios por flujo para la sinergia MM3

FLUJO	COSTES (€/Ton)
Agua con hidrocarburos	
Envases con sustancias peligrosas	
Sólidos impregnados con residuo oleoso	
Filtros de Aceite	61.3
Equipos con componentes peligrosos	
Disolvente orgánico halogenado	
Aceites Usados	
Baterías y tubos fluorescentes	274.15

### 7.2.3. MM4. Gestión común de Residuos No Peligrosos

El modelo ISSC de esta sinergia es el reflejado en la figura 7.3

**Figura 7.3:** Modelo ISSC de sinergia MM4

La implantación de esta sinergia supone un beneficio económico debido a los ahorros que producirá la unificación de los transportes del flujo por parte de las empresas implicadas, por lo que este caso será la entidad de Infraestructuras y Servicios al Transporte del modelo ISSC de la sinergia la que asuma por tanto los costes asociados a la nueva rutina de transportes. Para esta mutualización se definirá un vehículo cargando las diferentes entidades discretas que lleguen desde cada una las empresas simulando el efecto

real de unificar el flujo tal y como se han definido en el estudio de viabilidad económica. Estos vehículos serán los que soporten los costes asociados al transporte de las entidades discretas, es decir el flujo, en unidades de €/Viaje.

**Tabla 7.5:** Valores de variables de estudio en  $ISSC_0$  para la sinergia MM4

Costes de Inversión	Nulo
Costes de Operación	Costes de Transporte (€/Viaje)
Tiempos de transporte	Estudiada en las Tablas 4.18 y 4.19
Faltas en el servicio	0 %
Capacidad de Suministro	100 %

Los costes para el transporte por flujo de la sinergia MM4 durante el funcionamiento estudiado para la red se muestran en la tabla 7.6

**Tabla 7.6:** Precios por flujo para la sinergia MM4

FLUJO	COSTES (€/Ton)
Chatarra	10.21

## 7.3. Descripción de los experimentos

### EXPERIMENTO 1

Estos experimentos se relacionan directamente con la producción de las empresas implicadas. Se han dividido los posibles escenarios debidos a sucesos en la producción en dos experimentos, 1.1 y 1.2, dando nombre a los escenarios de la red en cada uno de los casos como  $IS_{1,1}$  y  $IS_{1,2}$  respectivamente.

#### 7.3.1. Experimento 1.1 ( $IS_{1,1}$ )

*Falta de Suministro de una empresa a otra de la red de sinergias*

En  $IS_{1,1}$  comparamos un funcionamiento normal de la sinergia con la red de sinergias teniendo en cuenta una falta de suministro entre alguna de las empresa que forman la red.

Esta falta de suministro se produce cuando una empresa se queda sin la posibilidad de surtir de uno de los productos mutualizados en la red, y la empresa cliente tiene que conseguir el producto adquiriéndole desde otra compañía o produciéndole en sus instalaciones para no parar su actividad.

Se estudia el caso individual de cada sinergia para ver en que punto (porcentaje) de falta de suministro esa sinergia en particular deja de ser rentable. Asimismo se estudia una falta de suministro en todas las empresas que forman la red para comprobar en que punto dejará de ser rentable la red ante una falta de suministro.

### **MM1. Proveedor Común de Materia SAP**

Se contempla la situación de que el proveedor común de materia SAP estipulado para la sinergia, sufra faltas en el servicio que ofrece a las empresas de la red.

En esta situación la organización logística o de transporte para la sinergia no se modificará, sufriendo únicamente un cambio en la empresa sustituta que actúa como Origen dentro del modelo ISSC, como nuevo proveedor del flujo durante la falta de suministro.

Con esta situación conseguiremos determinar la viabilidad de la sinergia en función de la variable de faltas en el suministro. El estudio de la rentabilidad será a partir de los costes de operación de la sinergia, representados en este caso por el nuevo precio del flujo, que se expresará en €/Ton.

Para la simulación del comportamiento de la red y de cada sinergia, se utilizarán los precios estipulados para cada flujo en el análisis económico de la sinergia.

La cantidad de entidades discretas que representan el flujo de materia y que fluirán durante la simulación en la herramienta definiendo su funcionamiento, dependerán directamente de la variable de faltas de suministro. Durante las faltas de suministro del proveedor principal, será el proveedor sustituto el que suministre el flujo a la empresa destino. El precio será el estimado en R y utilizado en la Tabla 4.7. La cantidad de flujo aportado por cada proveedor corresponderá a las siguientes expresiones.

Proveedor Sinergia:	$N^{\circ}Ton(1 - FaltaSuministro(\%))$
Proveedor Sustituto:	$FaltaSuministro(\%) \cdot N^{\circ}Ton$

Los precios del transporte están incluido en el precio final que se estima para cada producto, por lo que no se consideran. Las unidades de precio serán en €/ton.

### MM3. Gestión conjunta de residuos peligrosos

Esta sinergia corresponde a una mutualización de un flujo residual por parte de las empresas participantes. Las faltas en el suministro serán consideradas como la falta total de aporte del flujo de una de las empresas, bien por la falta de residuos para aportar a la sinergia como por un posible abandono del acuerdo de mutualización. Esta situación será el caso más desfavorable a considerar ya que muestra el comportamiento de la red ante la posible salida de la sinergia de una de las empresas que la forman.

Esta situación se corresponde con una falta de suministro del 100% por parte de la empresa correspondiente en cada escenario estudiado. A partir de los datos obtenidos durante el análisis económico los tres escenarios a considerar según las cantidades aportadas serán los expresados en la tabla 7.7.

A partir del coste final (€/viaje) del transporte del flujo unificado, éste se repartirá entre las empresas que continúen participando en la sinergia de forma proporcional a la cantidad de flujo que aportan a la mutualización, obteniendo tanto los costes totales como red, como los costes particulares de cada empresa. La expresión 7.1 define este reparto.

$$Coste_j = \frac{Costes_{total}}{Ton.Total} \cdot Ton \quad (7.1)$$

siendo  $j$  cada una de las empresas implicadas en cada escenario.

**Tabla 7.7:** Cantidades de flujo en experimento 1.1 para la sinergia MM3

CANTIDADES DE FLUJO SEGÚN ESCENARIO EN SINERGIA MM3 (T/Año)									
FLUJO	Falta C1			Falta C2			Falta C3		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Agua con Hidrocarburos		-	33,5	3,8		33,5	3,8	-	
Envases con Sustancias Peligrosas		-	3,5	60,2		3,5	60,2	-	
Sólidos Impregnados con Residuo Oleoso		7,8	5,1	-		5,1	-	7,8	
Filtros de Aceite		-	1,6	0,5		1,6	0,5	-	
Equipos con Componentes Peligrosos		0,2	13,2	0,1		13,2	0,1	0,2	
Disolvente Orgánico Halogenado		0,9	0,1	0,4		0,1	0,4	0,9	
Baterías y Tubos Fluorescentes		2,6	0,6	0,6		0,6	0,6	2,6	
Aceites Usados		26,2	24,7	2,2		24,7	2,2	26,2	
TOTAL		37,7	82,3	67,8		82,3	67,8	37,7	
TOTAL RED			120			150,1			105,5

Al tratarse de una sinergia de mutualización, los costes debidos al transporte son mutualizados y asumidos durante la fase de flujo compartido del modelo ISSC. La entidad sobre la que recaen estos costes será el Proceso de Adaptación al Flujo, con las unidades para los costes en €/ton gestionada por dicha entidad.

#### MM4. Gestión Conjunta de Residuos No Peligrosos

El estudio para las faltas de suministro en esta sinergia será idéntico al contemplado para la sinergia MM3, ya que se trata de nuevo de una mutualización de flujos que responde a la misma estructura en el modelo ISSC y con un estudio económico de la logística de transporte totalmente análogo.

Al tratarse de una sinergia de mutualización, los costes debidos al transporte son mutualizados y asumidos durante la fase de flujo compartido del modelo ISSC. La entidad

sobre la que recaen estos costes será el Proceso de Adaptación al Flujo, con las unidades para los costes en €/ton gestionada por dicha entidad.

Los flujos a estudiar serán diferentes y por tanto el estudio de los costes y de la rentabilidad de la sinergia ante faltas totales de suministro también lo serán. En este caso particular al ser una sinergia en la que sólo participan dos empresas de la red, no es posible contemplar únicamente el caso de una falta total de una de las empresas, por lo que para el estudio en la simulación se va a considerar reducciones en la aportación de flujo de un 25 %, un 50 % y un 75 % en cada una de las dos empresas participantes, y simular el comportamiento que tendrá la red en materia de rentabilidad (Tabla 7.8).

**Tabla 7.8:** Tabla de cantidades de flujo en experimento 1.1 para la sinergia MM4

CANTIDADES DE FLUJO SEGÚN ESCENARIO EN SINERGIA MM4 (T/Año)						
FLUJO	Escenario Falta C1 (25 %)		Escenario Falta C2 (50 %)		Escenario Falta C3 (75 %)	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Chatarra	64,2	249,6	42,8	249,6	21,4	249,6
TOTAL	64,2	249,6	42,8	249,6	21,4	249,6
TOTAL RED		313,8		292,4		271
FLUJO	Escenario Falta C2 (25 %)		Escenario Falta C2 (50 %)		Escenario Falta C3 (75 %)	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Chatarra	85,6	187,2	85,6	124,8	85,6	62,4
TOTAL	85,6	187,2	85,6	124,8	85,6	62,4
TOTAL RED		272,8		210,4		148

### 7.3.2. Experimento 1.2 (IS<sub>1,2</sub>)

#### *Disminución de las Cantidades Intercambiadas de Producto en cada Sinergia*

Se estudia el caso de una disminución de las cantidades de flujo que aporta cada empresa en cada sinergia, con la consiguiente influencia en el reparto de los gastos y la rentabilidad a nivel de red y a nivel individual.

Se considerará cada empresa por separado para cada una de las sinergias reduciendo en un porcentaje determinado para cada escenario de estudio la cantidad de flujo aportada, y por tanto el coste proporcional que asumirá. Este hecho modificará el reparto de costes para el resto de las empresas de la sinergia cuando estemos ante el caso de una mutualidad, o reducirá el beneficio de la empresa cliente o proveedora en el caso de una sustitución.

Para el conjunto de sinergias (Mutualidad) la entidad del modelo ISSC que variará su comportamiento será el Origen (Source en la herramienta informática) que es la encargada de generar el flujo que compañía pone en juego durante el funcionamiento.

Los escenarios a considerar serán con una reducción de aporte de flujo de un 25, 50, y un 75 % para cada compañía a nivel individual en cada sinergia y en toda la red.

En los casos de sinergias de mutualidad donde el reparto de costes no es directo, se estipula el coste proporcional que soportará cada una de las empresas y se estudia la rentabilidad a nivel individual y como red determinando el punto crítico de rentabilidad en cada caso si éste existiera.

El reparto de costes se realiza a partir de la expresión 7.2

$$Coste_j = \frac{Costes_{total}}{Ton.Total} \cdot Ton \quad (7.2)$$

siendo j cada una de las empresas implicadas en cada escenario.

El punto crítico de rentabilidad sucederá cuando los costes por empresas sean iguales en el los escenarios de simulación a los costes en  $S_0$  con el mismo porcentaje de producción.

### MM1. Proveedor Común de Materia SAP

A partir de los datos obtenidos durante el análisis económico los tres escenarios a considerar según las cantidades aportadas serán los expresados en la tabla 7.9.

**Tabla 7.9:** Tabla de cantidades de flujo en experimento 1.2 para la sinergia MM1

CANTIDADES DE FLUJO SEGÚN ESCENARIO EN SINERGIA MM1 (T/Año)						
FLUJO	Falta -25 %		Falta -50 %		Falta -75 %	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Hipoclorito	2,53	-	1,69	-	0,67	
Ácido Clorhídrico	-	135	-	90	-	45
Cloro	0,37	2,85	0,25	1,9	0,12	0,95
Sosa Cáustica	0,9	18,97	0,6	12,65	0,3	6,32
<b>TOTAL</b>	<b>3,8</b>	<b>156,82</b>	<b>2,54</b>	<b>104,55</b>	<b>1,09</b>	<b>52,27</b>
<b>TOTAL RED</b>		<b>160,62</b>		<b>107,09</b>		<b>53,56</b>

### MM3. Gestión conjunta de residuos peligrosos

Los tres escenarios a considerar según las cantidades aportadas serán los expresados en la tabla 7.10.

**Tabla 7.10:** Tabla de cantidades de flujo en experimento 1.2 para la sinergia MM3

CANTIDADES DE FLUJO SEGÚN ESCENARIO EN SINERGIA MM3 (T/Año)									
FLUJO	Escen. Falta -25 %			Escen. Falta -50 %			Escen. Falta -75 %		
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
Agua con Hidrocarburos	2,85	-	25,12	1,9	-	16,75	0,95	-	8,37
Envases con Sustancias Peligrosas	45,15	-	2,62	30,1	-	1,75	15,05	-	0,87
Sólidos Impregnados con Residuo Oleoso	-	5,85	3,82	-	3,9	2,55	-	1,95	1,27
Filtros de Aceite	0,3	-	1,2	0,25	-	0,8	0,12	-	0,4
Equipos con Componentes Peligrosos	0,07	0,15	9,9	0,05	0,1	6,6	0,02	0,05	3,3
Disolvente Orgánico Halogenado	0,3	0,67	0,07	0,2	0,45	0,05	0,1	0,22	0,02
Baterías y Tubos Fluorescentes	0,45	1,95	0,45	0,3	1,3	0,3	0,15	0,65	0,15
Aceites Usados	1,65	19,65	18,52	1,1	13,1	12,35	0,55	6,55	6,175
<b>TOTAL</b>	<b>50,84</b>	<b>28,27</b>	<b>61,7</b>	<b>33,9</b>	<b>18,85</b>	<b>41,15</b>	<b>16,95</b>	<b>9,42</b>	<b>20,57</b>
<b>TOTAL RED</b>			<b>140,8</b>			<b>93,9</b>			<b>49,95</b>

## MM4. Gestión Conjunta de Residuos No Peligrosos

En el caso de la sinergia MM4 se expresan los escenarios a considerar en la tabla 7.11

**Tabla 7.11:** Tabla de cantidades de flujo en experimento 1.2 para la sinergia MM4

CANTIDADES DE FLUJO SEGÚN ESCENARIO EN SINERGIA MM4 (T/Año)						
FLUJO	Falta -25 %		Falta -50 %		Falta -75 %	
	C1	C2	C1	C2	C1	C2
Chatarra	264,2	187,2	42,8	124,8	21,4	62,4
TOTAL	264,2	187,2	42,8	124,8	21,4	62,4
TOTAL RED		251,4		167,6		83,8

### 7.3.3. Experimento 2 (IS<sub>2</sub>)

#### *Cambio de la Rutina de Suministro*

Se contempla el cambio en la logística de transporte, modificando los viajes por unidad de tiempo, bien por la carga que se utiliza en cada viaje o bien por la distancia a recorrer, debido a un posible cambio de proveedor o gestor o por razones ajenas a las de la red.

La variable que condiciona el experimento será el tiempo de transporte del flujo, que se traduce directamente en los costes de operación para el transporte de productos entre entidades del modelo. Estos costes dependerán directamente a su vez de otras dos variables cuantificables:

- Distancia de transporte (Nº Km)
- Carga transportada por cada viaje (Ton/Vehículo)

Estas variables, a través de las tablas de costes por viaje (Análisis económico), ofrecen los nuevos costes de operación de la sinergia tras el cambio de condiciones durante la simulación.

Para el caso de la sinergia MM1, no se considerará este experimento, ya que al incluirse en el precio del flujo los costes de transporte del mismo, no se podrá estudiar con exactitud las consecuencias en el precio final de un cambio de la rutina de transporte por parte del proveedor.

Dada la mutualización de los flujos que se produce en el resto de sinergias (MM3 y MM4), los costes del transporte que recaen sobre la entidad infraestructura y servicios al transporte del modelo ISSC se han de dividir a lo largo del transporte del flujo. En la fase origen, los costes de transporte de las entidades discretas que representan cada tonelada de flujo serán las que soporten los costes hasta su llegada a la fase de flujo compartido. Será en ese punto donde sean cargadas en un vehículo que unificará el flujo y pasará a soportar los costes hasta la llegada a su destino final.

El coste de cada uno de estos transportes se encuentra definido en el estudio de viabilidad económica de la sinergia. Depende directamente de la distancia recorrida para el transporte (se considera que se utiliza el mismo vehículo en todos los escenarios), por lo que el coste por cada viaje de vehículo tendrá la expresión 7.3.

$$Coste_i = N^{\circ} Km(Precio(2012)Carga + Precio(2012)SinCarga) \quad (7.3)$$

Siendo  $i$  cada uno de los diferentes transportes que se realicen en la sinergia.

Para el caso de los transportes internos en la sinergia, no se considera la modificación de la distancia a recorrer ya que la distancia entre las empresas de la sinergia se mantiene constante.

Asimismo, el coste final del transporte del flujo dependerá también directamente de la carga transportada en cada viaje, que definirá la cantidad de viajes que harán falta para cargar todo el flujo y que tendrá la expresión 7.4

$$N^{\circ}Viajes = \frac{Cant.Flujos}{Carga/Viaje} \left[ \frac{Ton}{(Ton/Viaje)} \right] \quad (7.4)$$

En caso de que los costes totales de las rutinas de transporte simuladas superen a los costes durante  $IS_0$ , la sinergia deja de ser rentable considerando ese escenario el punto crítico de rentabilidad.

La mutualización de los flujos en las sinergias MM3 y MM4 se realiza en las compañías C3 y C2 respectivamente.

Los casos a simular para este experimento serán el aumento de la distancia a recorrer hasta el gestor en un porcentaje de un 25, 50, 75 y un 100 %, en unos escenarios con cargas por viaje de 40 (al igual que en el caso inicial), 30, 20 y 10 toneladas en cada caso.

### MM3. Gestión conjunta de residuos peligrosos

A partir de las dos variables indicadas, los escenarios a simular para la sinergia MM3 por la herramienta serán los expresados en la tabla 7.12.

**Tabla 7.12:** Tabla de transportes de flujo en experimento 2 para la sinergia MM3

ESCENARIOS DE RUTINAS DE TRANSPORTE EN SINERGIA MM3 (T/Año)				
ESCENARIO	GESTOR	DISTANCIA (Km)	CARGA / VIAJE	C3 - GESTOR (€/Viaje)
ISSC <sub>0</sub>	Lunagua	28,2	40	61,3
	Recypilas	117		274,15
+25 %	Lunagua	33,25	40	76,63
	Recypilas	146,25		317,65
+50 %	Lunagua	42,34	30	91,96
	Recypilas	175,5		381,54
+75 %	Lunagua	49,35	20	107,29
	Recypilas	204,75		445,13
+100 %	Lunagua	56,4	10	122,61
	Recypilas	234		508,72

### MM4. Gestión Conjunta de Residuos No Peligrosos

El caso de la sinergia MM4 se representa en la tabla 7.13.

**Tabla 7.13:** Tabla de transportes de flujo en experimento 2 para la sinergia MM4

ESCENARIOS DE RUTINAS DE TRANSPORTE EN SINERGIA MM3 (T/Año)				
ESCENARIO	GESTOR	DISTANCIA (Km)	CARGA / VIAJE	C3 - GESTOR (€/Viaje)
ISSC <sub>0</sub>	Berrio	4,7	40	10,21
+25 %		5,88	40	12,77
+50 %		7,05	30	15,33
+75 %		8,23	20	17,88
+100 %		9,4	10	20,44

#### 7.3.4. Experimento 3 ( $IS_3$ )

##### *Aumento de los Costes por Motivos Económicos o de Contingencias*

Se aumenta en un determinado porcentaje el total de los precios y costes asociados al funcionamiento de la red, y se define la misma en el programa para que se contemple en que porcentaje dejaría de ser rentable continuar con el funcionamiento de la red de sinergias de manera global y de cada sinergia a nivel individual.

Para comprobar el punto crítico de rentabilidad de la red y de cada sinergia a nivel individual, utilizaremos como variable para el experimento el porcentaje de aumento de los costes.

La expresión que define los nuevos costes en función del porcentaje de aumento es la ecuación 7.5

$$COSTES = Costes_j + \frac{(\%Costes_j)}{100} \quad (7.5)$$

Siendo  $j$  cada una de las entidades con costes asociados que forman la red.

Se estudiarán los casos de aumento de un 25, 50, 75 y un 100% de aumento de los costes de la red. Los resultados de los escenarios a contemplar se reflejan en la tabla 7.14.

Tabla 7.14: Tabla de aumento de costes en Experimento 3

SINERGIA	FLUJO	ESCENARIO DE AUMENTO DE COSTES EN LA RED DE SINERGIAS (€/año)								
		CASO INICIAL			+25 %			+50 %		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
MM1	Hipoclorito	539,89	-	-	674,86	-	-	809,83	-	-
	Ácido Clorhídrico	-	22.545	-	-	28.181,25	-	-	33.817,5	-
	Cloro	88,77	674,65	-	110,96	843,31	-	133,15	1.011,97	-
	Sosa Cáustica	98,4	2074,6	-	123	2.593,25	-	147,6	3111,9	-
	TOTAL	832,06	25.672,25	-	1.040,08	32.090,31	-	1.248,09	38.508,38	-
MM3	Agua con Hidrocarburos	5,86	-	61,3	7,33	-	76,63	8,8	-	92
	Envases con Sustancias Peligrosas	11,72	-	122,6	14,65	-	153,25	17,6	-	183,9
	Sólidos Impregnados	-	6,56	61,3	-	8,2	76,63	-	9,8	92
	Filtros de Aceite	5,86	-	61,3	7,33	-	76,63	8,8	-	92
	Equipos con Componentes Peligrosos	5,86	6,56	61,3	7,33	8,2	76,63	8,8	9,8	92
	Disolvente Orgánico Halogenado	5,86	6,56	61,3	7,33	8,2	76,63	8,8	9,8	92
	Baterías y Tubos Fluorescentes	5,86	6,56	274,15	7,33	8,2	342,69	8,8	9,8	411,2
TOTAL	46,88	32,8	825,85	58,6	41	1032,31	70,3	49,2	1238,8	
MM4	Chatarra	159,12	71,47	-	198,9	89,34	238,68	107,2	-	-
	TOTAL SINERGIAS	1038,06	25.776,52	825,85	1.297,58	32.220,65	1.032,31	1.557,07	38.664,78	1.238,8
SINERGIA	FLUJO	CASO INICIAL								
		CASO INICIAL			+75 %			+100 %		
		C1	C2	C3	C1	C2	C3	C1	C2	C3
MM1	Hipoclorito	539,89	-	-	944,81	-	-	1.079,78	-	-
	Ácido Clorhídrico	-	22.545	-	-	39.453,75	-	-	45.090	-
	Cloro	88,77	674,65	-	155,35	1.180,64	-	177,54	1.349,3	-
	Sosa Cáustica	98,4	2.074,6	-	172,2	3.630,55	-	196,8	4.149,2	-
	TOTAL	832,06	25.294,25	-	1.272,36	44.264,94	-	1.454,12	50.588,5	-
MM3	Agua con Hidrocarburos	5,86	-	61,3	10,3	-	107,3	11,7	-	122,6
	Envases con Sustancias Peligrosas	11,72	-	122,6	20,5	-	214,6	23,4	-	245,2
	Sólidos Impregnados	-	6,56	61,3	-	11,5	107,3	-	13,1	122,6
	Filtros de Aceite	5,86	-	61,3	10,3	-	107,3	11,7	-	122,6
	Equipos con Componentes Peligrosos	5,86	6,56	61,3	10,3	11,5	107,3	11,7	13,1	122,6
	Disolvente Orgánico Halogenado	5,86	6,56	274,15	10,3	11,5	479,8	11,7	13,1	548,3
	Baterías y Tubos Fluorescentes	5,86	6,56	122,6	10,3	11,5	214,6	11,7	13,1	245,2
TOTAL	46,88	32,8	825,85	82,3	57,5	1.230,9	93,6	65,5	1651,7	
MM4	Chatarra	159,12	71,47	-	278,46	125,07	318,24	142,94	-	-
	TOTAL SINERGIAS	1038,06	25.776,52	825,85	1.633,12	44.447,51	1.230,9	1.865,96	50.796,94	1.651,7

## Capítulo 8

# RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

### 8.1. ESCENARIO $IS_0$

La implantación de la red de sinergias produce unos ahorros en los costes del sistema estudiados en el análisis económico de la red en el capítulo 4. La figura 8.1 representa gráficamente la comparativa de costes entre el escenario  $R$  y el escenario  $IS_0$ .

El código de colores presenta la comparativa separando el resultado individual para cada compañía y el global del conjunto del sistema. Se observa tanto la diferencia de costes a nivel individual de las compañías como a nivel global como red de sinergias.

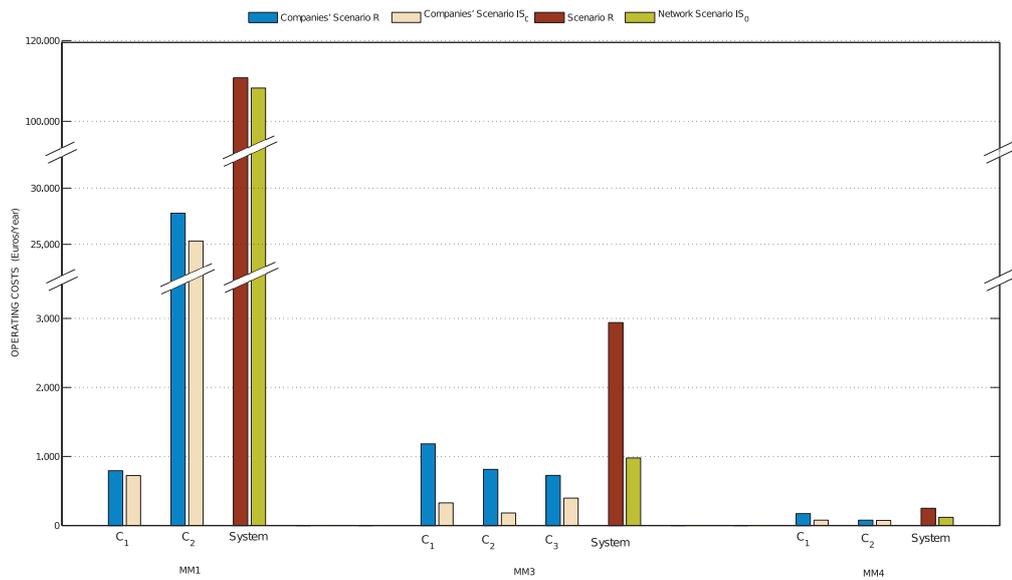


Figura 8.1: Comparación de costes de compañías y conjunto del sistema en escenario  $R$  y  $IS_0$

## 8.2. EXPERIMENTO 1.1( $IS_{1,1}$ )

*Falta de Suministro de una empresa a otra de la red de sinergias*

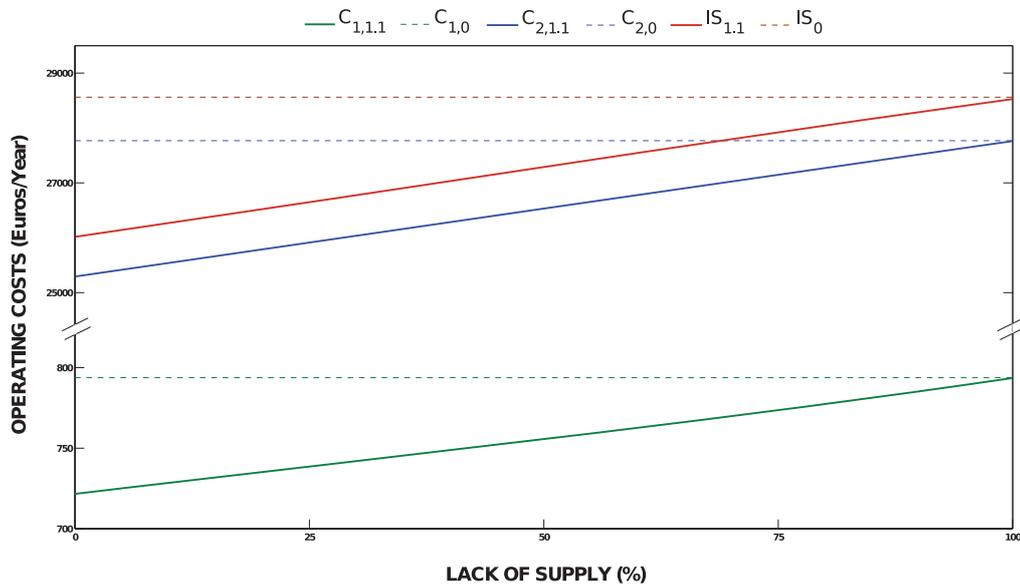
### 8.2.1. MM1. Proveedor Común de Materia SAP

El primer examen se realiza para la sinergia MM1 y las repercusiones en los costes asociados que tendrá las condiciones planteadas por el experimento 1.1 (Falta de Suministro de una empresa a otra de la red de sinergias).

Se estudian los resultados de costes y rentabilidad tanto para el caso individual de cada una de las compañías C1, C2 y C3, como para el conjunto de la red de sinergias.

En la figura 8.2 se representan la comparativa de los costes de las compañías C1 y C2 y del conjunto de la red de sinergia para  $IS_0$ , con los resultados obtenidos en la simulación

de los escenarios en  $IS_{1,1}$ .



**Figura 8.2:** Comparación de costes de compañías y Red de Sinergias (Experimento 1.1 – MM1)

Se comprueba en los resultados que existe una linealidad en el aumento de costes conforme aumentan las faltas de suministro del proveedor contemplado para la sinergia.

Dada la esencia de la sinergia MM1, su implantación siempre será rentable para las empresas implicadas, pero el estudio de esa rentabilidad ofrece a las empresas una medida de la misma como posible apoyo a la toma de decisiones internas o para determinar una posible prioridad de implantación.

Los resultados muestran una latitud elevada y una resistencia baja, manteniéndose rentable en toda la simulación. En este caso la conclusión sobre esta sinergia es que tendrá una alta resiliencia ante las faltas de suministro, aunque los beneficios de su implantación disminuyan de manera proporcional a las faltas de suministro que se puedan producir.

La influencia en este caso de los resultados para cada uno de los flujos implicados no será relevante, ya que mantiene la misma linealidad encontrada en los resultados globales en cada compañía y en la red.

### 8.2.2. MM3. Gestión conjunta de residuos peligrosos

Para estudiar los costes y la rentabilidad de las empresas y la red en los escenarios del experimento 1.1, es necesario conocer los costes reales de cada una de las empresas implicadas ponderando entre las empresas los costes totales del transporte, en función de las toneladas aportadas al flujo mutualizado, de manera que el reparto de costes sea proporcional a la aportación de cada una de las empresas.

La tabla 8.1 corresponde a los costes ponderados para cada empresa a partir de los costes totales y las rentabilidades de cada empresa y global de la red tras la implantación de la sinergia MM3 para el escenario  $IS_0$ . La expresión 8.1 define este reparto de costes.

$$Costes_j = \frac{Costes_{total}}{Ton.Total} Ton_j \quad (8.1)$$

**Tabla 8.1:** Tabla de transportes de flujo en experimento 2 para la sinergia MM3

TABLA DE PONDERACIÓN DE COSTES PARA LA SINERGIA MM3 EN $IS_0$					
COMPAÑÍA	Cant. de flujo T/Año	Costes individuales R	Costes MM3 No Pond. en $IS_0$	Costes MM3 Pond. en $IS_0$	Ahorro
C1	67,8	1.182,63€	46,88€	326,91€	855,71€
C2	37,7	811,97€	32,8€	181,78€	630,19€
C3	82,3	724,75€	825,82€	396,83€	327,91€
<b>TOTAL</b>	187,8	2.719,35€	905,5€	905,5€	1.813,81€

Los resultados obtenidos en el experimento 1.1 se representan en la figura 8.3 para los casos en  $IS_{1,1}$  de faltas en las empresas C1, C2 y C3. Cuando las faltas en las empresas tienen valor cero, ese escenario se corresponde con  $IS_0$ .

#### Falta C1

Las funciones en la gráfica para este caso se representan con una línea continua. Se

aprecia en la figura 8.3 como los costes de las compañías C2 y C3 descienden cuando se produce la falta de suministro. Asimismo, los costes totales de la red al completo también disminuyen cuando las faltas de suministro de la compañía C1 aumentan.

Esta situación a primera vista podría parecer ilógica, pero al tratarse de un transporte con vehículos con una carga establecida, la cantidad de carga que lleva el vehículo durante el transporte no cambia los costes de operación del mismo.

Por ejemplo una compañía que por separado utilice al completo un vehículo (40 toneladas de flujo) incurrirá en los costes de operación para ese vehículo. De la misma manera otra compañía que utilice una pequeña capacidad de carga de un vehículo (por ejemplo 5 toneladas), incurrirá en los mismos costes que en el caso anterior. Si se mutualiza el flujo de ambas compañías, serán necesarios 2 vehículos para llevar toda la carga. Los costes se repartirán de manera proporcional a las toneladas aportadas por cada compañía, suponiendo un coste más elevado para la compañía con mayor número de toneladas aportadas. Para ella este coste con el flujo mutualizado será mayor que si realiza el transporte del mismo por separado.

Por esta razón cabe concluir que en el caso de la sinergia MM3 sería más beneficioso para las compañías C2 y C3 una mutualización de sus flujos entre ellas. La presencia en la sinergia de la compañía C1 produce un aumento de los vehículos para transporte y por tanto también de los costes. Al ponderar ese aumento entre las tres empresas, la repercusión sobre las empresas C2 y C3 produce un mayor coste que si no mutualizaran su flujo con la compañía C1.

### **Falta C2**

Las funciones en la figura 8.3 para este caso se representan con una línea discontinua. Cuando es la compañía C2 la que incurre en faltas de suministro, se vuelve a repetir la situación de un descenso de los costes de las compañías C1 y C3 y por consiguiente del total de la red de sinergias.

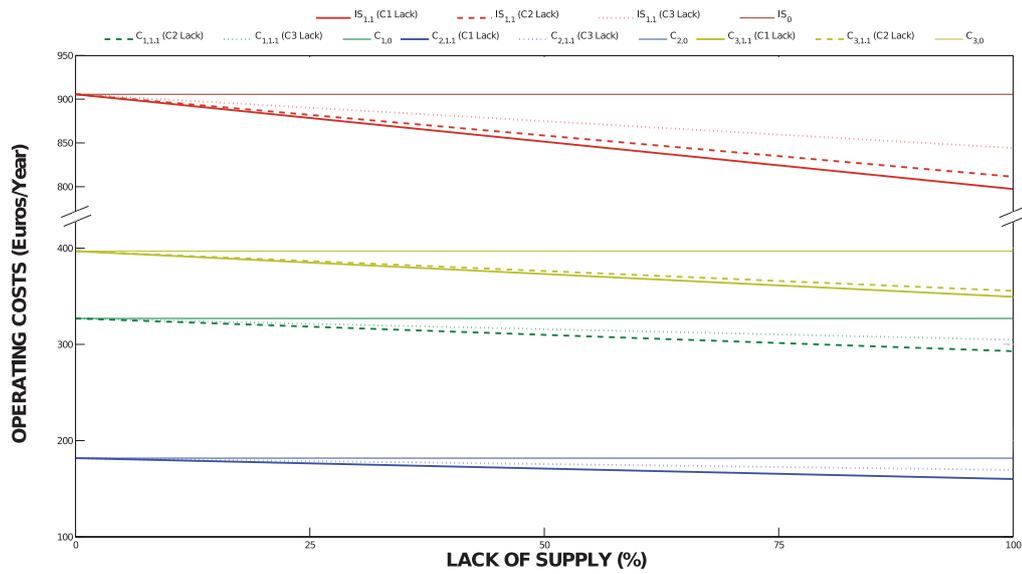
A partir de la misma explicación que en el caso de faltas en la compañía C1, se vuelve a concluir que para las compañías C1 y C3 será más beneficioso no contar con el flujo de la compañía C2. La mutualización de las tres empresas produce unos costes individuales para las compañías C1 y C3 mayores que si no contaran con C2 en la sinergia..

### **Falta C3**

Las funciones en la gráfica para este caso se representan con una línea de puntos. De nuevo se repite el mismo resultado si es la compañía C3 la que incurre en faltas de suministro a la sinergia. Aunque menos pronunciado, se produce un descenso de los costes de ambas compañías (C1 y C2) y de la red de sinergias conforme aumentan las faltas de suministro de la compañía C3.

En base a los mismos razonamientos que en los casos de faltas de C1 y de C2, se concluye que será más beneficioso para las compañías C1 y C2 funcionar en la sinergia sin la aportación de flujo de la compañía C3, ya que la cantidad aportada por ésta a la mutualización aumenta los costes totales e individuales de C1 y C2 en mayor medida que si no contaran con C3 en la sinergia.

Ante esta situación, es difícil concluir cuál sería la situación que mejor pudiera satisfacer al conjunto de empresas del sistema, de manera que todas ellas puedan disfrutar de la situación más beneficiosa sin que ninguna de ellas pierda la oportunidad de reducir sus costes.



**Figura 8.3:** Evolución de Costes de Compañías y Red para Faltas de la Compañías (Experimento 1.1 – MM3)

Por esta razón, se concluye que escenario  $IS_{1,1}$  de mutualización con las tres compañías implicadas de las tres compañías sería la situación más beneficiosa para el conjunto de la red. En cualquiera de los casos de faltas de suministro los costes individuales y de la red en  $IS_{1,1}$ , se mantienen por debajo de los costes analizados en el capítulo de análisis económico en el escenario  $S_0$ .

Aunque a nivel individual no es la situación más beneficiosa para cada una de las compañías, mantiene el ahorro para todas ellas y para el conjunto del sistema. Esta situación provoca mayor cohesión e implicación entre las compañías del sistema a nivel económico, que la convierte en la mejor alternativa de funcionamiento.

Se visualiza como la latitud de la red aumenta con el crecimiento de las faltas de suministro y la resistencia es muy baja para todos los casos, consiguiendo garantizar siempre la rentabilidad de la red. Se concluye por tanto que la red tendrá una alta resiliencia ante el escenario de faltas de suministro en la sinergia MM3.

### 8.2.3. MM4. Gestión Conjunta de Residuos No Peligrosos

La mutualización en esta sinergia está formada por dos empresas (C1 y C2). La expresión 8.2 define este reparto de costes.

$$Costes_j = \frac{Costes_{total} Ton_j}{Ton.Total} \quad (8.2)$$

Los costes ponderados para estas dos compañías se representan en la tabla 8.2.

**Tabla 8.2:** Tabla de transportes de flujo en experimento 2 para la sinergia MM3

TABLA DE PONDERACIÓN DE COSTES PARA LA SINERGIA MM4 EN $IS_0$					
COMPAÑÍA	Cant. de flujo T/Año	Costes individuales R	Costes MM3 No Pond. en $IS_0$	Costes MM3 Pond. en $IS_0$	Ahorro
C1	85,6	159,12€	16,92€	27,69€	131,33€
C2	249,6	71,47€	91,89€	68,04€	3,43€
<b>TOTAL</b>	<b>335,2</b>	<b>230,59€</b>	<b>108,81€</b>	<b>108,81€</b>	<b>134,76€</b>

La figura 8.4 muestra los resultados para el experimento 1.1 en el que se visualizan la evolución de los costes de la red de sinergias y de cada una de las compañías implicadas según se suceden faltas en el suministro de cada una de las compañías.

#### Falta C1

Las funciones en la gráfica se representan con una línea continua. Tal y como muestra la figura 8.4, la red de sinergias sufre un descenso de los costes conforme aumentan las faltas en el suministro de la compañía C1, advirtiéndose un periodo entre los puntos de un 25 % y un 50 %, donde los costes totales de la red se mantienen constantes ante los posibles cambios.

En el caso de la compañía C2, se comprueba que al reducirse la aportación a la sinergia de la compañía C1, (faltas de suministro) también descienden sus costes siendo por lo

tanto una situación beneficiosa para esta compañía en comparación con el escenario  $IS_0$ .

Como contraposición a esta situación, destacan los resultados para la compañía C1 en la figura 4. Esta empresa reacciona de una manera variable ante sus propias faltas de suministro. En un primer momento los costes de esta compañía se reducen, hasta que alcanzan un valor del 25 %, momento en el que aumentan. Este periodo creciente continua hasta el 50 % de faltas de suministro, volviendo a tomar una tendencia decreciente.

Tal y como se explica en el caso de la sinergia MM3, el reparto proporcional de los costes de una mutualización puede hacer variar los costes de las empresas implicadas según las cantidades de flujo que se compartan. Los cambios de tendencia en los costes de una compañía, dependerán directamente de este hecho. Según las circunstancias, una falta de suministro puede suponer que se reduzca el número de vehículos necesarios para el transporte del flujo. Esta reducción de vehículos supone una reducción a su vez de los costes. Esta situación por tanto puede producir en un momento particular un descenso de los costes de una empresa cuya tendencia era creciente.

A partir de estos resultados, se concluye que la red de sinergias será robusta en cualquiera de los posibles escenarios de falta de suministro de la compañía C1, garantizando siempre un ahorro en los costes en comparación con el escenario  $IS_0$ .

### **Falta C2**

En este caso las funciones en la gráfica se representan con una línea discontinua. La figura 8.4 muestra como de nuevo la rentabilidad del conjunto de la red no se ve afectada por las faltas de suministro, reduciendo los costes totales conforme aumentan las faltas de la compañía C2.

De la misma forma, al reducir por faltas la cantidad de flujo aportado a la mutualización, la compañía C1 también notará un descenso de sus costes cuanto mayor sean estas

faltas.

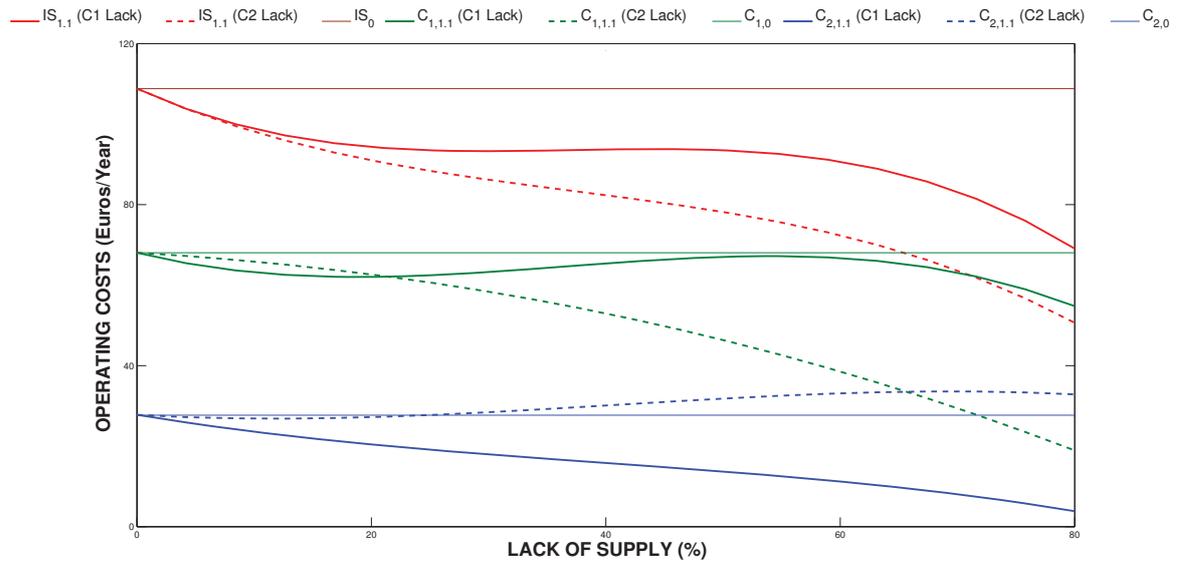
En contraposición, la compañía C2 sufre un aumento en sus costes conforme aumentan sus propias faltas de suministro. Este aumento hace que se superen los costes en el escenario  $IS_0$ . A pesar de ello, nunca se llegarían a alcanzar los costes en el escenario R que suponen un montante de 159,12€. Esta cantidad está alejada de los 33,41€ del caso más desfavorable en  $IS_{1,1}$ . En caso de alcanzar un escenario con elevadas faltas de suministro, se producirá un descenso del ahorro conseguido para esta compañía.

Aparentemente, una compañía que disminuye su aporte de flujo a la sinergia, debería de reducir sus costes también. En este caso sucede el caso contrario. La compañía C2 reduce su aportación de flujo a la sinergia y sus costes aumentan cuanto menor es el flujo aportado. Como ejemplo, cuando no existen faltas de suministro, se necesitan 9 vehículos para transportar el flujo compartido. Cuando la compañía C2 tiene una falta de suministro del 50 % se utilizan 6 vehículos. Cada caso supondrá unos costes de transporte distintos, que serán repartidos de manera proporcional entre las empresas de la sinergia. En el caso de la falta de un 50 %, aunque el coste total será menor, el coste proporcional para la compañía C2 será mayor.

Este efecto en los costes no se ajusta a lo esperable intuitivamente, por lo que se concluye que los resultados del análisis de una red de sinergias tendrán una baja predictibilidad. Conforme mayor sea el número de compañías implicadas en la red de sinergias, mayor será la complejidad para predecir los efectos en los diferentes escenarios de una red.

A partir de estos resultados se puede concluir que la red tiene una alta resiliencia ante cualquier de los escenarios de faltas de la compañía C1 que se produzcan en  $IS_{1,1}$ , garantizando siempre un ahorro en los costes en comparación con el escenario  $IS_0$ .

La latitud es considerable y aumenta con el crecimiento de las faltas. La resistencia de



**Figura 8.4:** Evolución de Costes de Compañías y Red para Faltas de la Compañías (Experimento 1.1 – MM4)

la red es muy pequeña, aunque experimenta un crecimiento en los valores mas elevados sin perder nunca la rentabilidad en la red.

Cuando se produzcan faltas de suministro de la compañía C2, la red no será rentable, ya que los costes que asumirá la propia compañía C2 ante sus propias faltas de suministro al flujo supondrán un aumento de los costes en comparación con el escenario  $IS_0$ . Se observa como para ese caso la latitud en los resultados para la compañía C2 es muy reducida y la rentabilidad se ve comprometida. La resistencia de la red es elevada. Se trata de una red con baja resiliencia ante el escenario de faltas de suministro de C2.

### 8.3. EXPERIMENTO 1.2 ( $IS_{1,2}$ )

*Disminución de las Cantidades Intercambiadas de Producto en cada Sinergia*

#### 8.3.1. MM1. Proveedor Común de Materia SAP

La figura 8.5 refleja la evolución que sufren los costes para las compañías de forma individual y para el conjunto de la red cuando se produce una reducción de las cantidades intercambiadas en la sinergia.

En ambos casos se comprueba como los costes disminuyen conforme se reducen las cantidades de flujo puestas en juego. Estos costes convergen hacia un valor nulo según aumenta el porcentaje de disminución de flujo intercambiado. Cuando la reducción de la producción alcanza el 100 %, los costes serán cero. Este resultado se ajusta a lo que cabría esperar en este caso, ya que conforme se reduce la producción de las empresas, sus costes tenderán a hacerse más bajos hasta desaparecer cuando no exista producción. Observando el gráfico se comprueba como los costes ante reducciones de la producción se mantendrán siempre por debajo de los costes en  $IS_0$ .

Si comparamos los nuevos costes en  $IS_{1,2}$  con la tendencia de los costes en R, ante la misma situación de reducción de la producción, se ve como éstos presentan una pendiente decreciente más pronunciada. Por tanto a medida que se reduce producción, se reduce a su vez el ahorro producido por la implantación de la sinergia pero sin llegar nunca a hacerse nulo. A medida que la reducción de la producción es mayor, también se reducirá el ahorro que produce la implantación de la sinergia tendiendo a hacerse nulo cuando la cantidad intercambiada también lo sea.

Ante estos resultados se concluye que la red será siempre rentable ante reducciones en la producción de las empresas. Se recomienda mantener los niveles de producción del

sistema para maximizar en la medida de lo posible los ahorros producidos por la sinergia. En este caso la latitud de la red es reducida y la resistencia de la misma es algo elevada. A pesar de esta situación, la red responde con rentabilidad a los cambios experimentados, por lo que su resiliencia ante este nuevo escenario será alta.

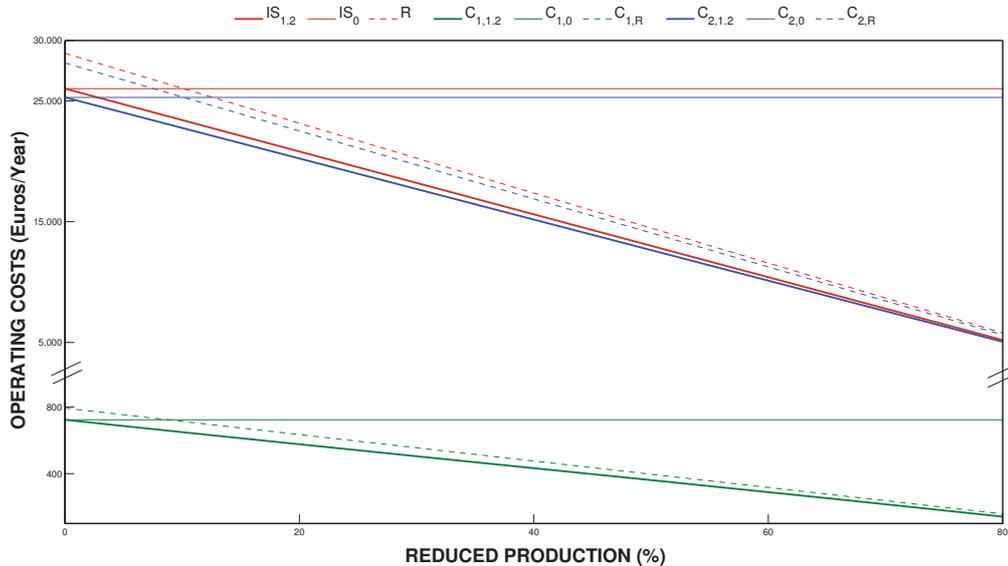


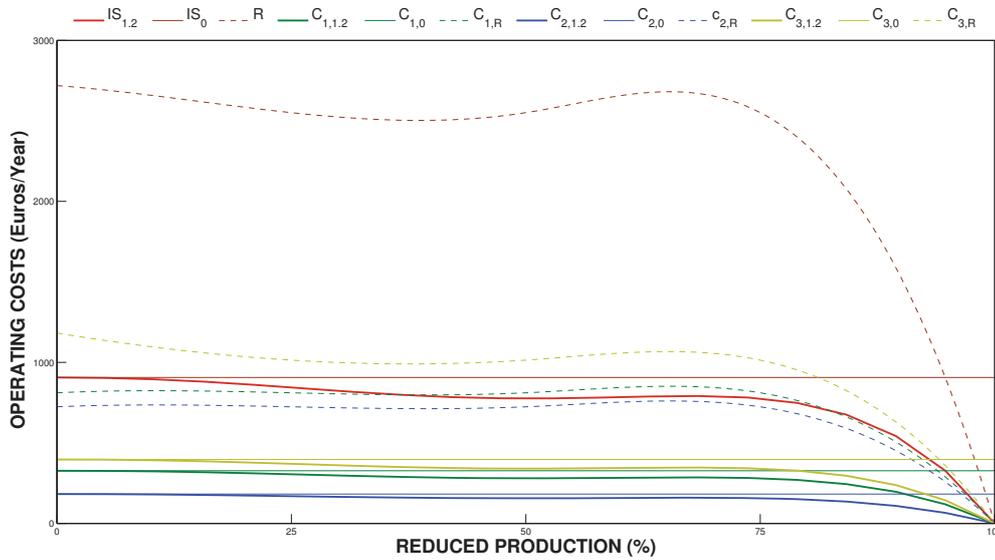
Figura 8.5: Evolución de Costes de Compañías y Red para Experimento 1.2 (Sinergia MM1)

### 8.3.2. MM3. Gestión conjunta de residuos peligrosos

En la figura 8.6 se observan los diferentes costes de transporte para todas las empresas y para el conjunto de la red. Conforme la producción se hace más pequeña, los costes de operación de la sinergia también descienden, hasta hacerse cero para el caso de una producción nula. Se aprecia como la reducción de costes es poco pronunciada con descensos de producción hasta el 75% aproximadamente. A partir de este punto, los costes descienden rápidamente hasta hacerse cero para el caso del 100% de reducción de la producción.

Esta situación puede deberse al hecho de que aunque la producción de las empresas

se reduzca, el coste de fletar los vehículos para el transporte del flujo es constante. Por lo tanto sólo se producirá un descenso de los costes cuando la producción de las empresas sea lo suficientemente baja como para prescindir del uso de los vehículos que se estuvieran utilizando previamente. Por ejemplo puede que el número de vehículos necesarios para transportar la producción de la red sean los mismos para el escenario  $IS_0$  que para el escenario  $IS_{1,2}$ . Aunque los vehículos funcionen con diferentes cargas, el coste de operación será el mismo para todos los casos.



**Figura 8.6:** Evolución de Costes de Compañías y Red para Experimento 1.2 (Sinergia MM3)

Se comprueba como en cualquiera de los casos de reducción de producción, los costes en  $IS_0$  nunca serán inferiores a los costes de  $IS_{1,2}$ , ni para el caso individual de cada empresa ni como red de sinergias. Asimismo se comprueba como los costes en R serán también más elevados que en  $IS_{1,2}$  ante cualquier porcentaje posible de descenso de producción del sistema. La altitud de la red en este caso es muy alta, siendo la resistencia muy reducida hasta llegar a valores del 75 % de reducción de la producción, donde la pendiente se hace muy pronunciada con tendencia a cero. Esa pendiente está relacionada con el hecho de que la producción se haga cero a lo largo de la simulación, por lo que se considera un resistencia de la red muy baja atendiendo al tramo previo a la tendencia a

cero.

Se concluye por tanto que la red tendrá una alta resiliencia ante posibles reducciones de las producción para la sinergia MM3.

### 8.3.3. MM4. Gestión Conjunta de Residuos No Peligrosos

La figura 8.7 muestra la evolución de costes en R y en  $IS_{1,2}$  para la sinergia MM4 determinados en la simulación de ambos en la herramienta computacional. Se aprecia la tendencia decreciente de los costes en ambos escenarios conforme disminuye la producción de las compañías. En el caso de  $IS_{1,2}$  se produce una tendencia descendente hasta alcanzar el entorno del 30 % de reducción, donde se produce de nuevo un aumento de los costes de transporte hasta alcanzar un pico en el entorno del 60 %, volviendo a su tendencia decreciente.

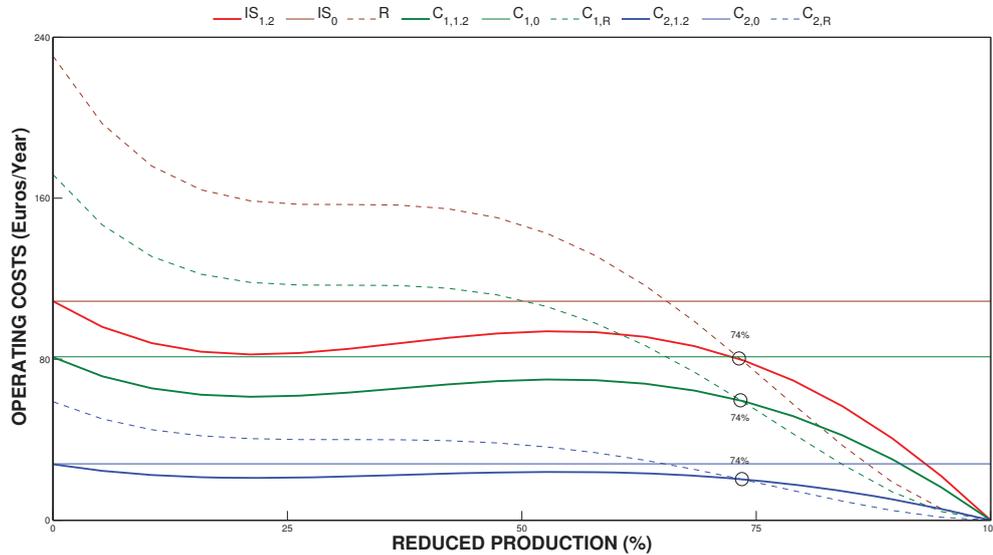
Este aumento en los costes en  $IS_{1,2}$  se debe de nuevo a la organización del transporte, donde en ocasiones se hace necesario la utilización de un vehículo aunque la carga del mismo sea pequeña, pudiendo producir costes no esperados debido a la ponderación de los gastos entre empresas según las cantidades aportadas.

Conforme mayor es el descenso de la producción, se va reduciendo también el ahorro producido por la implantación de la sinergia en comparación con el escenario R, hasta alcanzar un punto crítico de rentabilidad tanto para cada una de las compañías como para el conjunto del sistema.

Se aprecia como para el caso individual de las empresas C1 y C2 y para el caso del conjunto de la red se alcanza este punto crítico en el entorno del 74 % de reducción de la producción.

Al alcanzarse estos valores de reducción de la producción en las compañías, la implantación de la sinergia deja de suponer un ahorro, y por tanto ya no será rentable su aplicación. Esta situación de rentabilidad crítica supone que los costes en esos puntos serán iguales a los costes para las empresas y para el sistema en el escenario R. La altitud de la red es elevada y su resistencia es reducida, pero la latitud de la red se va reduciendo conforme se reduce la producción de la misma, hasta dejar de ser rentable por encima del 74% de reducción.

Por esta razón se concluye que la red tendrá una resiliencia media, teniendo una mala respuesta a grandes caídas de producción por parte de las compañías (superiores al 74%). Si se logra mantener los niveles de producción esperados en la red, se garantizará un comportamiento de la misma adecuado. Para lograr un funcionamiento óptimo de la misma se recomienda mantener los niveles de producción contemplados para el caso  $IS_0$ . Cuanto menores sean las reducciones en la producción, mayor será el ahorro que se obtenga por la implantación de la sinergia.



**Figura 8.7:** Evolución de Costes de Compañías y Red para Experimento 1.2 (Sinergia MM4)

## 8.4. EXPERIMENTO 2 ( $IS_2$ )

### *Cambio de la Rutina de Suministro*

#### 8.4.1. MM3. Gestión conjunta de residuos peligrosos

La figura 8.8 muestra la evolución de los costes para el conjunto de la red ante los cambios en las dos variables que definen las rutinas de suministro. Se simulará un aumento de la distancia de transporte hasta un 100 %, reduciendo las cargas de los vehículos a 30, 20 y 10 toneladas cuando se alcanzan distancias de un 50, 75 y 100 % respectivamente.

Se observa una clara tendencia creciente de los costes de la red ante el aumento de la distancia que separa el sistema con las empresas gestoras en este caso y la reducción de la carga de los vehículos encargados del transporte. Esta situación era esperable, ya que a mayor distancia, mayor coste por vehículo. De la misma manera a menor carga transportada por vehículo, serán necesarios más viajes para transportar el flujo.

Con el aumento de la distancia a recorrer por los vehículos y la disminución de la capacidad de carga de los mismos, comprobamos como disminuye los ahorros producidos por la implantación de la sinergia. Este ahorro se visualiza comparando los costes en el escenario R con los costes durante el experimento 2.

La compañía C2 presenta unos resultados que demuestran la rentabilidad de la sinergia para esta empresa en cualquiera de los casos del experimento. En ningún caso los costes en el experimento 2 superan a los costes para el escenario R.

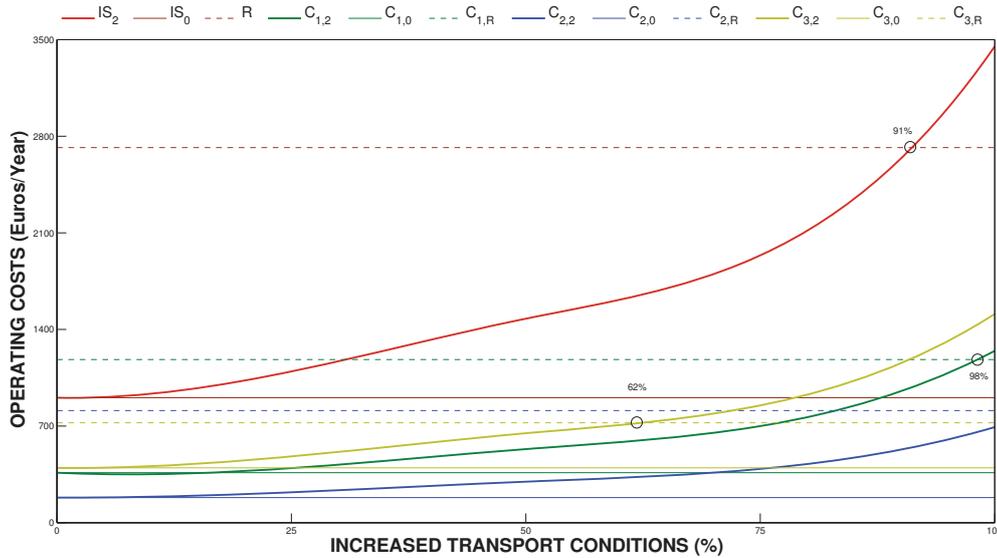
En los casos de las compañías C1 y C3, y del total del sistema, existe un punto crítico de rentabilidad donde el ahorro será cero. La implantación de la sinergia dejará de ser rentable para cada uno de los entes implicados. Los puntos críticos para C1, C3 y la red serán para un aumento de las condiciones de transporte de un 98 %, 62 % y un 91 %

respectivamente.

Al alcanzarse estos valores en las compañías, la implantación de la sinergia deja de suponer un ahorro, y por tanto ya no será rentable su aplicación. Esta situación de rentabilidad crítica supone que los costes en esos puntos serán iguales a los costes para las empresas y para el sistema en el escenario R.

Finalmente se concluye que la red no será completamente robusta ante cambios de la rutina de transporte del escenario  $IS_0$ . A nivel individual la nueva implantación de la sinergia será rentable para la compañía C2 en cualquier situación. Para la compañía C1 dejará de ser interesante su participación en la sinergia a partir del 62 % de aumento en las condiciones de transporte. La compañía C3 se encontrará en la misma situación ante un 98 % de aumento de las condiciones.

Los resultados como red muestran que la implantación de la sinergia en el sistema será rentable hasta que se alcance un 91 % de aumento en las condiciones del escenario  $IS_0$ . Por debajo de ese umbral, la red será estable ante posibles cambios en las rutinas de transporte. La latitud de la red es elevada, reduciéndose ese intervalo conforme cambian las condiciones hasta hacerse cero. La resistencia comienza siendo moderada aumentando considerablemente durante la simulación, por lo que esta situación unida al punto crítico de rentabilidad en el 91 % llevan a considerar una resistencia media de la red ante este cambio de escenario.



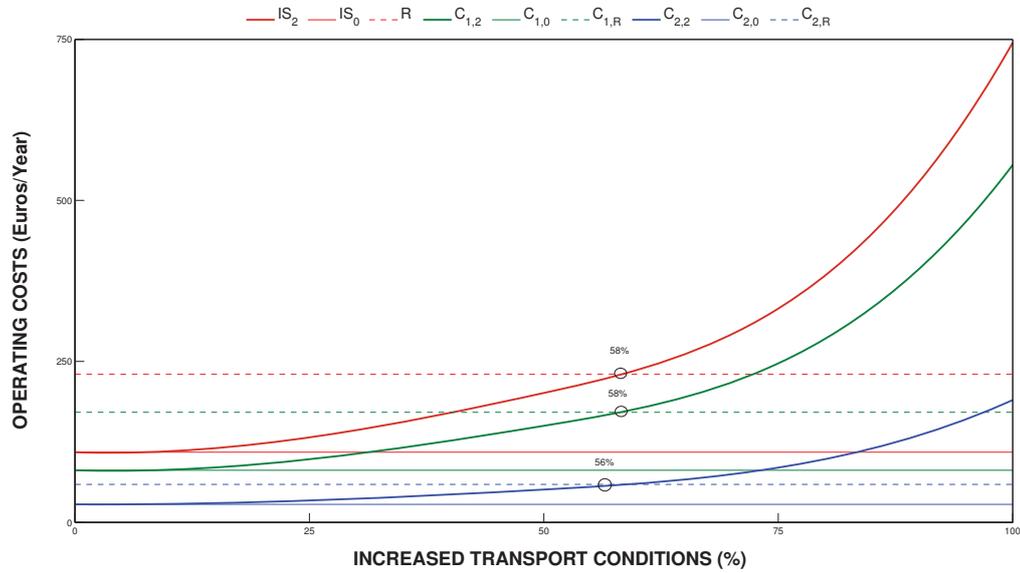
**Figura 8.8:** Evolución de Costes de Compañías y Red para Experimento 2 (Sinergia MM3)

#### 8.4.2. MM4. Gestión Conjunta de Residuos No Peligrosos

De nuevo en la figura 8.9 se observa como a medida que aumenta la distancia a recorrer por el transporte y disminuye la capacidad de carga de los vehículos utilizados aumentan los costes asociados a la actividad de la sinergia. El aumento de los costes produce que se reduzca el ahorro por aplicación de la sinergia, hasta llegar a dejar de ser rentable. Este hecho se visualiza en la comparación de los costes en el escenario R con los costes durante el experimento 2.

Se observa en la figura como existen tres puntos críticos de rentabilidad. El primero de ellos es el caso de la compañía C2. El punto crítico de rentabilidad aparece para un aumento del 56% de la distancia a recorrer y por tanto una capacidad de carga del transporte de 30 toneladas por vehículo. La compañía C1 y el conjunto de la red presentan en ambos casos un punto de rentabilidad cuando el transporte recorre un 58% de distancia (30 toneladas de capacidad por vehículo). La compañía C2 se encuentra en la misma situación. Por el contrario, la compañía C1 dejará de ser rentable en un 56%.

La latitud de la red es elevada. La resistencia comienza siendo baja al comenzar la simulación, pero va aumentando conforme aumenta el incremento en las condiciones, hasta producirse el punto crítico de rentabilidad. Se concluye por tanto que la red tendrá una resistencia media en este escenario.



**Figura 8.9:** Evolución de Costes de Compañías y Red para Experimento 2 (Sinergia MM4)

## 8.5. EXPERIMENTO 3 ( $IS_3$ )

### *Aumento de los Costes por Motivos Económicos o de Contingencias*

En este caso se observa en la figura 8.10 la evolución que tienen los costes de operación de las empresas y del conjunto de la red ante posibles incrementos por contingencias o por motivos socioeconómicos.

Se observa como cabría esperar que los costes muestran una tendencia creciente con una mayor o menos pendiente. Este aumento produce una obvia reducción del ahorro producido por la implantación de la sinergia, llegando según el caso a hacerse nulo.

Para la compañía C3, la red será robusta a pesar del posible incremento de costes de operación, garantizando un ahorro a la compañía para un incremento de hasta el 100 % de los mismos. Sin embargo para el resto de compañías y el conjunto de la red, existirán puntos de rentabilidad crítica donde los costes en el escenario R serán iguales a los costes de la red en el experimento 3.

La compañía C1 tiene el punto de rentabilidad crítica para un aumento de costes de un 64%. A partir de ese punto dejará de ser rentable la implantación de la sinergia comparado con el escenario R.

El caso más severo de pérdida de rentabilidad es para la empresa C2, para la cuál la red de sinergias es escasamente robusta, dejando de ser rentable su aplicación cuando se produce un aumento de costes por imprevisto del 14%.

Esta baja robustez de la red para el caso de la compañía C2 hace que el conjunto del sistema vea como su respuesta ante imprevistos en los costes de operación sea también deficiente. La rentabilidad de la red como conjunto sólo podrá mantenerse mientras los costes de operación no alcancen un aumento del 21%.

Estos dos últimos casos son muestras de una baja capacidad de adaptación y respuesta de la red ante aumentos imprevisto de costes de operación. A pesar de que dos de las compañía mantienen buenos niveles de robustez ante cambios en los costes, no es posible garantizar la rentabilidad del conjunto de la red en una situación similar.

La latitud de la red es baja y la resistencia tiene un valor bajo, aunque no lo suficiente para garantizar la rentabilidad de la red durante toda la simulación. Esta pérdida de rentabilidad con un 21 % de aumento de los costes unido a la baja latitud de la red, lleva a concluir que la red presenta una resiliencia media ante el experimento de aumento de costes por contingencias o razones externas.

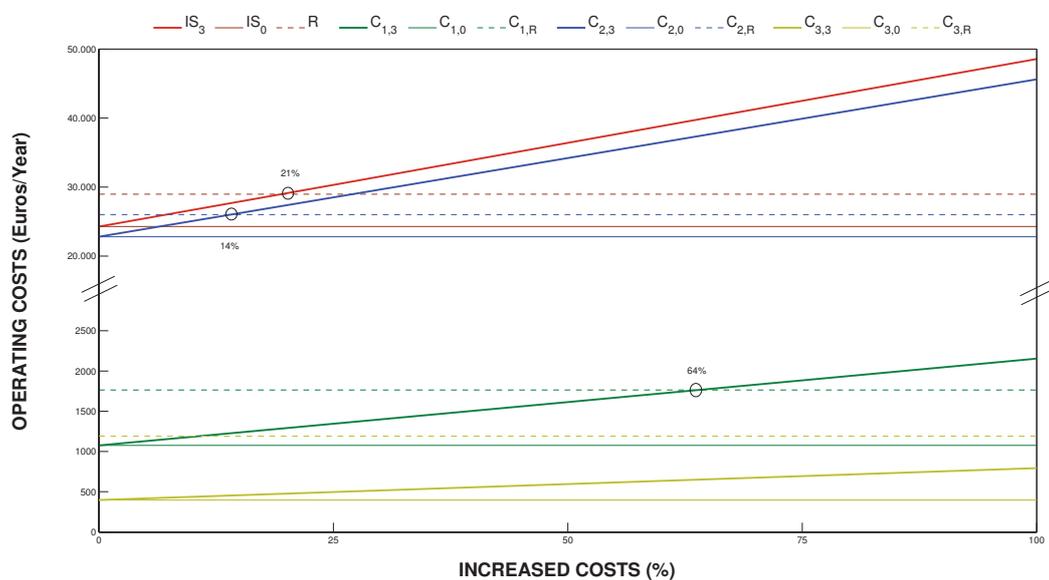


Figura 8.10: Evolución de Costes de Compañías y Red para Experimento 3

## Capítulo 9

# CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

### 9.1. Conclusiones

A partir del trabajo realizado, se derivan dos grupos de conclusiones: aquellas que hacen referencia al proceso de diseño de la red de sinergias y su implementación computacional, y las referentes a los resultados obtenidos tras la simulación de la red.

#### Conclusiones de la metodología

La metodología creada mantiene un orden lógico que analiza en primer lugar las sinergias detectadas a nivel cualitativo, seleccionando aquellas cuyo contexto es más favorable para su potencial implantación. A partir de ahí se realiza el análisis económico y ambiental preliminar que cuantifican la rentabilidad y la reducción de impacto ambiental que supondrá la implementación de cada sinergia en el sistema estudiado. Finalmente

el conjunto de sinergias que superan todo el proceso pasa a formar parte del diseño de red de simbiosis industrial (SI). Posteriormente la red es implementada informáticamente para posteriores análisis funcionamiento que puedan ayudar en la toma de decisiones..

Esta metodología demuestra con datos cuantificados que la creación de redes de SI genera ahorros tanto ambientales como económicos a nivel local en un complejo industrial y por tanto estamos ante una herramienta útil para impulsar el desarrollo sostenible de complejos industriales y regiones.

El éxito en el diseño de la red de SI en este caso demuestra la versatilidad de la metodología creada para ser utilizada en cualquier otro escenario. Esta metodología diseña la red de sinergias y cuantifica también los beneficios económicos y ambientales que supondría su implantación en el marco de trabajo..

El hecho de que la red diseñada se trate de una red primaria, y que exista la posibilidad de ampliar dicha red con nuevas sinergias que hayan quedado fuera de la selección realizada o que se detecten en procesos posteriores, permite la creación de políticas y estrategias de simbiosis industrial a nivel individual en las empresas que participan, o como complejo industrial, y mantenerlas a lo largo del tiempo aprovechando el enfoque de sostenibilidad de la metodología.

A partir de la red generada tras aplicar la metodología de selección, se puede concluir que las sinergias que no incluyen la generación de nuevas actividades en el sistema, como sería la creación de una EDAR común, una instalación de captura de  $CO_2$  o una planta de combustión de residuos orgánicos, son más favorables para su implantación dado su coste inicial de implantación más reducido.

Las sinergias que han sido seleccionadas en este trabajo para formar la red son todas de mutualidad, tanto de flujo de entrada como residual. Las medidas a tomar para la implantación de todas ellas se reducen a la unificación de los flujos tanto de entrada de

materias primas (la adquisición) como de salida de residuos, y su transporte. La unión de flujos en una primera impresión es simple y sencilla a nivel técnico.

En el caso de la sinergia MM1 de Proveedor común de materia SAP de unificar el proveedor de materiales para servicios auxiliares de producción para todas las compañías participantes. Las sinergias MM3 y MM4 de gestión de residuos peligrosos y no peligrosos respectivamente, busca igualmente la mutualización de flujos comunes en todas las compañías implicadas, compartiendo su gestión por terceros. Esta particularidad permite concluir que los resultados del análisis se adaptan a los esperados, ya que las sinergias elegidas tienen un proceso simple de implantación.

Los resultados obtenidos en el análisis de viabilidad técnica son concretos, algo que permite a partir de la analogía ISSC presentada dar un enfoque de cadena de suministro a la red, tanto a su representación gráfica como a su implementación computacional. Este enfoque abre las puertas de la utilización de herramientas de optimización y simulación logística en cadenas de suministro, para su uso en el análisis de la red de sinergias de simbiosis industrial.

A partir del enfoque de red con la analogía ISSC y su implementación computacional, se diseñan experimentos de simulación del funcionamiento de la red en las posibles condiciones en las que pueda trabajar. La versatilidad de la herramienta utilizada para la simulación hace que las posibilidades de diseño de experimentos con los que analizar el comportamiento de la red sean innumerables. La analogía ISSC ofrece por tanto un enfoque totalmente abierto que permite analizar las redes de sinergias en cualquier escenario que se considere necesario de la misma manera que se realiza habitualmente con una cadena de suministro.

Los elementos o entidades en el modelo ISSC mantienen una analogía directa con los del modelo de cadena de suministro. La entidad 'origen' en el modelo de sinergia ISSC mantiene una relación directa con el proveedor de la cadena de suministro. La entidad

'Destino' en ISSC se corresponde con el cliente o receptor de los productos finales en el modelo SCOR de cadena de suministro. El trabajo de producción en una cadena de suministro mantiene una analogía directa con la entidad 'Proceso de adaptación del flujo' en una sinergia industrial (Modelo ISSC). Por último, el trabajo de distribución, no sólo del producto terminado al cliente, sino también de cualquier movimiento de flujo a lo largo de la cadena de suministro, tiene su equivalencia en las "infraestructuras de transporte y servicios" del modelo ISSC.

Cada una de las variables utilizadas en este trabajo para analizar el funcionamiento de una cadena de suministro tiene una equivalencia directa dentro de una red de sinergias de simbiosis industrial a través del modelo ISSC. Las utilizadas en este trabajo son: costes de inversión, costes de operación, tiempo de transporte, faltas en el servicio y capacidad de servicio al cliente.

Este enfoque y la propia analogía están presentes en todo el desarrollo del proyecto de investigación. A partir de la analogía ISSC se realiza la implementación computacional de la red de sinergias que será simulada. Los escenarios simulados en los experimentos de simulación también tienen su base teórica en este enfoque, siendo diseñados a partir de la forma ISSC de la red. Por último también se representan los resultados desde la nomenclatura ISSC de la red de sinergias de manera que se visualice con mayor claridad la comparativa de resultados en cada escenario entre el sistema industrial inicial previo y el diseñado bajo la analogía.

Se concluye por tanto que la analogía ISSC se convierte en el paradigma sobre el cuál se construye todo el proyecto de investigación de diseño de redes de sinergia en complejos industriales.

## Conclusiones de los Resultados Obtenidos

Las simulaciones realizadas muestran la respuesta de la red ante los escenarios contemplados en los experimentos. Estos resultados representan gráficamente las condiciones de rentabilidad de la red según las propiedades de los escenarios de funcionamiento que se examinan. Se obtiene también los puntos críticos de rentabilidad en los casos donde se produzcan.

Las simulaciones arrojan unos resultados de las que se obtienen una serie de conclusiones acerca de la red de sinergias diseñadas a partir de la metodología.

**Experimento 1.1: Falta de Suministro de una empresa a otra de la red de sinergias.** Se concluye una resiliencia moderada en la red ante faltas de suministro de hasta el 100% de una de las empresa a otra dentro del sistema en las tres sinergias de la red. La latitud en todas ellas es considerable, y las tendencia al cambio unitario (resistencia de la red) siempre se mantiene en valores aceptables con una pendiente baja. La resiliencia particular de las empresas será alta exceptuado el caso individual de la compañía C2, que perderá su rentabilidad, presentando por tanto una baja resiliencia ante sus propias faltas de suministro al participar en la sinergia MM4.

**Experimento 1.2: Disminución de las Cantidades Intercambiadas de Producto en cada Sinergia.** Ante el caso de disminución de las cantidades intercambiadas de Producto en cada sinergia que estudia el experimento 1.2, la red será completamente resiliente para las sinergias MM1 y MM3, manteniendo siempre una alta latitud entre escenarios y pendientes cercanas al eje de abscisas . Los resultados demuestran como en el caso de la sinergia MM4 la red no será completamente robusta ante altas caídas de la producción, concretamente del 74%. En ese porcentaje se produce el punto crítico de rentabilidad tanto de las compañías como de la red. la latitud en la simulación tiene un valor elevado, pero las pendientes de los costes de operación son pronunciadas, produciendo

do el punto crítico comentado. Se concluye por tanto que la red consta de una resiliencia media que produce la pérdida de rentabilidad al alcanzar 74 % de caída de producción. Asimismo se deduce que cuanto menores sean las reducciones de producción, mayor será el ahorro que se obtenga.

**Experimento 2: Cambio de la Rutina de Suministro.** El cambio en las rutinas de transporte y suministro se estudia en el experimento 2. El comportamiento de la red en este caso no es completamente robusto. La resiliencia de la red varía según la sinergia estudiada y las compañías implicadas. En el caso particular de la sinergia MM3, la red tiene una resiliencia media con alta latitud pero con pendientes pronunciadas que hacen descender la resiliencia conforme aumenta la distancia de transporte. Esto produce la aparición de los puntos críticos de rentabilidad en el 98 %, el 62 % y el 91 % de aumento de la distancia de transporte para las compañías C1, C3 y la red respectivamente. La compañía C2 se (comportará) tendrá un comportamiento resiliente con una latitud considerable y una pendiente muy pequeña, no perdiendo la rentabilidad tras la implantación de la red en ningún caso. En los resultados de la sinergia MM4 estos puntos críticos se producen en el 64 %, 14 % y 21 % de las compañías C1, C2 y la red respectivamente, mateniendo al igual que en el caso de la sinergia MM3 una resiliencia media con alta latitud y resistencia.

**Experimento 3: Aumento de los Costes por Motivos Económicos o de Contingencias.** Por último se estudia el aumento de los costes de operación del sistema en el experimento 3. La red en este caso muestra una baja resiliencia ante cambios en los costes. Sólo la compañía C3 muestra alta resiliencia ante el experimento, con una latitud alta y resistencia baja, manteniendo siempre la rentabilidad. Las Compañías C1 y C2 así como el conjunto de la red tienen sus puntos críticos de rentabilidad ante aumentos del 64 %, 14 % y 21 % respectivamente. Esta situación se debe a una latitud muy baja y una resistencia aceptable, que producen una resiliencia media ante cambios en los costes.

La Tabla 9.1 presenta la resiliencia de las compañías y la red a partir de las simulaciones ante cada uno de los experimentos. En caso de presentar una resiliencia media, se indica entre paréntesis el punto crítico de rentabilidad en cada escenario.

**Tabla 9.1:** Resumen de las simulaciones de funcionamiento de la red de sinergias

ESCENARIO DE AUMENTO DE COSTES EN LA RED DE SINERGIAS (€/año)													
Experimento 1.1 Falta de suministro de una empresa a otra de la red de sinergias				Experimento 1.2 Disminución de Cantidades Intercambiadas en cada Sinergia				Experimento 2 Cambio de la Rutina de Suministro		Experimento 3 Aumento de los Costes por Motivos Económicos o de Contingencias			
	MM3			MM4				MM3	MM4				
	C1	C2	C3	C1	C2	C3	MM1	MM3	MM4	MM3	MM4		
C1	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR	RM (74%)	RM (98%)	RM (58%)	RM (64%)
C2	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR	BR	RM (74%)	AR	RM (56%)	RM (14%)
C3	-	AR	AR	-	-	AR	-	AR	-	-	RM (62%)	-	AR
RED	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR	AR	RM (74%)	RM (91%)	RM (58%)	RM (21%)

AR - Alta resiliencia

RM - Resiliencia Media (Punto crítico de rentabilidad)

BR - Baja Resiliencia

## 9.2. Líneas Futuras

A partir de la metodología desarrollada y la actividad y el análisis realizados, este trabajo abre un gran campo de posibilidades para línea futuras de trabajo. Entre otras cabe señalar:

Diseñar una metodología de análisis y simulación del diseño de red de simbiosis industrial mediante computador con el objetivo de caracterizar por completo la misma y optimizar su funcionamiento antes de su implantación final en la actividad del sistema. De esta manera se abriría la posibilidad de crear una metodología conjunta que abarque las tres fases del proceso de diseño de la red de sinergias: Selección preliminar de sinergias, análisis de viabilidad técnica y simulación de escenarios de funcionamiento de la red implementada.

Profundizar en la misma línea de investigación, proponiendo medidas de mejora y discutiendo las partes y su contenido para la optimización del diseño, ampliando de esta manera el estudio realizado y orientándole a una mejor selección de las sinergias que formarán la red. Se pretende conseguir redes más eficientes y robustas desde el principio, reduciendo las labores de simulación posteriores o simplificándolas lo más posible.

Reflexionar sobre el diseño de los experimentos y escenarios en los que se simulará la red de sinergias. Cuanto más precisos sean los experimentos a estudiar, mejor será la información que arrojen sus resultados, derivando en una mejor comprensión de los límites de resiliencia de la red. Asimismo el diseño de nuevos experimentos que abarquen un espectro más amplio de escenarios permitirá ampliar el conocimiento sobre la red ante un abanico más variado de posibilidades. Ejemplos alternativos de experimentos a contemplar son: una ventana de precios del flujo, fluctuaciones de la demanda del producto terminado, aumento de costes laborales de los trabajadores, multas por incumplimiento de leyes o contaminación, bonificaciones por ahorro energético o (factura de la luz), etc.

Mejora de la metodología de selección de las sinergias que formarán la red. Se ha de analizar su robustez y respuesta ante imprevistos, identificando los nodos (sinergias) que reducen la resiliencia de la red. Este tipo de sinergias suponen un lastre para la optimización de la red, por lo que su selección sugeriría carencias en el diseño de la metodología utilizada. Estudiando detenidamente los criterios de selección junto con los resultados obtenidos en nuevas simulaciones de funcionamiento de la red, se buscan posibles mejoras para el conjunto del proceso de diseño.

Plantear proyectos de implementación real de las redes diseñadas y crear métodos genéricos de implantación puede ayudar a validar en un escenario real el modelo teórico de red de sinergias desarrollado, la analogía ISSC y los resultados de las simulaciones.

Ofrecer una interfaz gráfica a todos los métodos y procesos de selección e identificación de sinergias, de diseño de la red y de implementación computacional, mediante la creación de una herramienta informática que facilite al usuario el seguimiento de todas estas fases y automatice el trabajo a realizar.

# Capítulo 10

## ANEXOS

### 10.1. Experimento 1.1 MM1

**Tabla 10.1:** Variables de salida de la simulación. Experimento 1.1 MM1

	FALTA 25 %	FALTA 50 %	FALTA 75 %
HCl C2	16908,75	11.272,50	5.636,25
HCl Inicial C2	6.187,50	12.375,00	18.562,50
HCl Total C2	23.096,25	23.647,50	24.198,75
Cloro C1	65,69	44,39	21,30
Cloro C2	505,99	337,33	168,66
Cloro Inicial C1	23,40	48,75	72,15
Cloro Inicial C2	185,25	370,50	555,75
Cloro Total C1	89,09	93,14	93,45
Cloro Total C2	691,24	707,83	724,41
Hipoclorito C1	401,13	267,95	133,18
Hipoclorito Inicial C1	146,19	294,13	440,32
Hipoclorito Total C1	547,33	562,08	573,50
Sosa C1	73,80	49,20	24,60
Sosa C2	1.555,54	1.037,30	518,24
Sosa Inicial C1	27,00	54,00	81,00
Sosa Inicial C2	568,80	1.138,50	1.707,30
Sosa Total C1	100,80	103,20	105,60
Sosa Total C2	2.124,34	2.175,80	2.225,54
Total C1	737,21	758,41	772,56
Total C2	25.911,83	26.531,13	27.148,70
Total	26.649,04	27.289,54	27.921,26

Tabla 10.2: Variables de entrada de la simulación. Experimento 1.1 MM1

	Precio Hipo	Precio Acido	Precio Cloro	Precio Sosa	Precio Inicial Hipoclorito	Precio Inicial Ácido	Precio Inicial Cloro	Precio Inicial Sosa
FALTAS 25 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
FALTAS 50 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
FALTAS 75 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9

	€/Viaje Lunagua	€/Viaje Recypilas	€/Viaje C1-C2	€/Viaje C1-C3	€/Viaje C2-C3	€/Viaje Berrio
FALTAS 25 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
FALTAS 50 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
FALTAS 75 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21

	Falta C1 MM3	Falta C2 MM3	Falta C3 MM3	Falta C1 MM4	Falta C2 MM4	Carga Vehículo	Faltas Suministro
FALTAS 25 %	0	0	0	0	0	4000	0.25
FALTAS 50 %	0	0	0	0	0	4000	0.5
FALTAS 75 %	0	0	0	0	0	4000	0.75

## 10.2. Experimento 1.1 MM3

**Tabla 10.3:** Variables de salida de la simulación. Experimento 1.1 MM3

COSTE	FALTA C1	FALTA C2	FALTA C3
HCl C2	22,545,0000	22,545.00	22,545.00
HCl Total C2	22,545.00	22,545.00	22,545.00
Cloro C1	88.77	88.77	88.77
Cloro C2	674.652	674.652	674.652
Cloro Total C1	88.77	88.77	88.77
Cloro Total C2	674.652	674.652	674.652
Hipoclorito C1	535.899	535.899	535.899
Hipoclorito C2	535.899	535.899	535.899
Sosa C1	98.4	98.4	98.4
Sosa C2	2,074.60	2,074.60	2,074.60
Sosa Total C1	98.4	98.4	98.4
Sosa Total C2	2,074.60	2,074.60	2,074.60
Total C1	723.069	723.069	723.069
Total C2	25,294.25	25,294.25	25,294.25
Totales	26,017.32	26,017.32	26,017.32
Vehículos Aceites	122.6	61.3	61.3
Vehículos Agua HC	61.3	61.3	61.3
Vehículos Baterías	274.15	274.15	274.15
Vehículos C1 Aceites	0	5.86	5.86
Vehículos C1 Agua HC	0	5.86	5.86
Vehículos C1 Baterías	0	5.86	5.86
Vehículos C1 Chatarra	16.92	16.92	16.92
Vehículos C1 Disolvente	0	5.86	5.86
Vehículos C1 Envases	0	11.72	11.72
Vehículos C1 Equipos	0	5.86	5.86
Vehículos C1 Filtros	0	5.86	5.86
Vehículos C2 Aceites	0	6.56	6.56
Vehículos C2 Baterías	0	6.56	6.56
Vehículos C2 Disolvente	0	6.56	6.56
Vehículos C2 Equipos	0	6.56	6.56
Vehículos C2 Sólidos	0	6.56	6.56
Vehículos Disolvente	61.3	61.3	61.3
Vehículos Envases	61.3	122.6	122.6
Vehículos Equipos	61.3	61.3	61.3
Vehículos Filtros	61.3	61.3	61.3
Vehículos Sólidos	61.3	61.3	61.3
Total Transporte C1 MM3	0	46.88	46.88
Total Transporte C1 MM4	16.92	16.92	16.92
Total Transporte C2 MM3	0	32.8	32.8
Total Trans.Gestor MM3	764.55	764.55	764.55
Total Trans.Gestor MM4	91.89	91.89	91.89
Total Transporte MM3	797.35	811.43	844.23
Total Transporte MM4	108.81	108.81	108.81

Tabla 10.4: Variables de entrada de la simulación. Experimento 1.1 MM3

	Precio Hipo	Precio Acido	Precio Cloro	Precio Sosa	Precio Inicial Hipoclorito	Precio Inicial Acido	Precio Inicial Cloro	Precio Inicial Sosa
FALTAS C1	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
FALTAS C2	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
FALTAS C3	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9

	€/Viaje Lunagua	€/Viaje Recyplas	€/Viaje C1-C2	€/Viaje C1-C3	€/Viaje C2-C3	€/Viaje Berrio
FALTAS C1	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
FALTAS C2	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
FALTAS C3	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21

	Falta C1 MM3	Falta C2 MM3	Falta C3 MM3	Falta C1 MM4	Falta C2 MM4	Carga Vehículo	Faltas Suministro
FALTAS C1	0	1	1	1	1	4000	0
FALTAS C2	1	0	1	1	1	4000	0
FALTAS C3	1	1	0	1	1	4000	0

### 10.3. Experimento 1.1 MM4

Tabla 10.5: Variables de salida de la simulación. Experimento 1.1 MM4

COSTE	FALTA	FALTA	FALTA	FALTA	FALTA	FALTA
	C1 25 %	C1 50 %	C1 75 %	C2 25 %	C2 50 %	C2 75 %
HCl C2	22,545.00	22,545.00	22,545.00	22,545.00	22,545.00	22,545.00
HCl Total C2	22,545.00	22,545.00	22,545.00	22,545.00	22,545.00	22,545.00
Cloro C1	88.77	88.77	88.77	88.77	88.77	88.77
Cloro C2	674.652	674.652	674.652	674.652	674.652	674.652
Cloro Total C2	88.77	88.77	88.77	88.77	88.77	88.77
Cloro Total C2	674.652	674.652	674.652	674.652	674.652	674.652
Hipoclorito C1	535.899	535.899	535.899	535.899	535.899	535.899
Hipoclorito Total C1	535.899	535.899	535.899	535.899	535.899	535.899
Sosa C1	98.4	98.4	98.4	98.4	98.4	98.4
Sosa C2	2,074.60	2,074.60	2,074.60	2,074.60	2,074.60	2,074.60
Sosa Total C1	98.4	98.4	98.4	98.4	98.4	98.4
Sosa Total C2	2,074.60	2,074.60	2,074.60	2,074.60	2,074.60	2,074.60
Total C1	723.069	723.069	723.069	723.069	723.069	723.069
Total C2	25,294.25	25,294.25	25,294.25	25,294.25	25,294.25	25,294.25
Totales	26,017.32	26,017.32	26,017.32	26,017.32	26,017.32	26,017.32
Vehículo Aceites	122.6	122.6	122.6	122.6	122.6	122.6
Vehículo Agua HC	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3
Vehículo Baterías	274.15	274.15	274.15	274.15	274.15	274.15
Vehículo C1 Aceites	5.86	5.86	5.86	5.86	5.86	5.86
Vehículo C1 Agua HC	5.86	5.86	5.86	5.86	5.86	5.86
Vehículo C1 Baterías	5.86	5.86	5.86	5.86	5.86	5.86
Vehículo C1 Chatarra	11.28	11.28	5.64	16.92	16.92	16.92
Vehículo C1 Disolvente	5.86	5.86	5.86	5.86	5.86	5.86
Vehículo C1 Envases	11.72	11.72	11.72	11.72	11.72	11.72
Vehículo C1 Equipos	5.86	5.86	5.86	5.86	5.86	5.86
Vehículo C1 Filtros	5.86	5.86	5.86	5.86	5.86	5.86
Vehículo C2 Aceites	6.56	6.56	6.56	6.56	6.56	6.56
Vehículo C2 Baterías	6.56	6.56	6.56	6.56	6.56	6.56
Vehículo C2 Disolvente	6.56	6.56	6.56	6.56	6.56	6.56
Vehículo C2 Equipos	6.56	6.56	6.56	6.56	6.56	6.56
Vehículo C2 Sólidos	6.56	6.56	6.56	6.56	6.56	6.56
Vehículo Disolvente	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3
Vehículo Envases	122.6	122.6	122.6	122.6	122.6	122.6
Vehículo Equipos	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3
Vehículo Filtros	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3
Vehículo Sólidos	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3	61.3
Total Transporte C1 MM3	46.88	46.88	46.88	46.88	46.88	46.88
Total Transporte C1 MM4	11.28	11.28	5.64	16.92	16.92	16.92
Total Transporte C2 MM3	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8	32.8
Total Trans.Gestor MM3	825.85	825.85	825.85	825.85	825.85	825.85
Total Trans.Gestor MM4	81.68	81.68	71.47	71.47	61.26	40.84
Total Transporte MM3	905.53	905.53	905.53	905.53	905.53	905.53
Total Transporte MM4	92.96	92.96	77.11	88.39	78.18	57.76

**Tabla 10.6:** Variables de entrada de la simulación. Experimento 1.1 MM4

	Precio Hipo	Precio Acido	Precio Cloro	Precio Sosa	Precio Inicial Hipoclorito	Precio Inicial Ácido	Precio Inicial Cloro	Precio Inicial Sosa
FALTAS C1 25 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
FALTAS C1 50 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
FALTAS C1 75 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
FALTAS C2 25 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
FALTAS C2 50 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
FALTAS C2 75 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9

	€/Viaje Lunagua	€/Viaje Recypilas	€/Viaje C1-C2	€/Viaje C1-C3	€/Viaje C2-C3	€/Viaje Berrio
FALTAS C1 25 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
FALTAS C1 50 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
FALTAS C1 75 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
FALTAS C2 25 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
FALTAS C2 50 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
FALTAS C2 75 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21

	Falta C1 MM3	Falta C2 MM3	Falta C3 MM3	Falta C1 MM4	Falta C2 MM4	Carga Vehículo	Faltas Suministro
FALTAS C1 25 %	1	1	1	0,75	1	4000	0
FALTAS C1 50 %	1	1	1	0,5	1	4000	0
FALTAS C1 75 %	1	1	1	0,25	1	4000	0
FALTAS C2 25 %	1	1	1	1	0,75	4000	0
FALTAS C2 50 %	1	1	1	1	0,5	4000	0
FALTAS C2 75 %	1	1	1	1	0,25	4000	0

## 10.4. Experimento 1.2 MM1

**Tabla 10.7:** Variables de salida de la simulación. Experimento 1.2 MM1

COSTE	PRODUCCIÓN	PRODUCCIÓN	PRODUCCIÓN
	-25 %	-50 %	-75 %
HCl C2	16.908,75	11.272,50	5.636,25
Cloro C1	65,69	44,39	21,30
Cloro C2	505,989	337,326	168,663
Hipoclorito C1	401,131	267,949	133,182
Sosa C1	73,8	49,2	24,6
Sosa C2	1.555,54	1.037,30	518,24
Total C1	540,62	361,53	179,08
Total C2	18.970,27	12.647,12	6.323,15
Totales	19.510,90	13.008,66	6.502,23

**Tabla 10.8:** Variables de entrada de la simulación. Experimento 1.2 MM1

	Precio Hipo	Precio Acido	Precio Cloro	Precio Sosa	Precio Inicial Hipoclorito	Precio Inicial Ácido	Precio Inicial Cloro	Precio Inicial Sosa
PRODUCCIÓN -25 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
PRODUCCIÓN -50 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
PRODUCCIÓN -75 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9

	€/Viaje Lunagua	€/Viaje Recypas	€/Viaje C1-C2	€/Viaje C1-C3	€/Viaje C2-C3	€/Viaje Berrio
PRODUCCIÓN -25 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
PRODUCCIÓN -50 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
PRODUCCIÓN -75 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21

	Falta C1 MM3	Falta C2 MM3	Falta C3 MM3	Falta C1 MM4	Falta C2 MM4	Carga Vehículo	Faltas Suministro
PRODUCCIÓN -25 %	1	1	1	1	1	4000	0.25
PRODUCCIÓN -50 %	1	1	1	1	1	4000	0.5
PRODUCCIÓN -75 %	1	1	1	1	1	4000	0.75

## 10.5. Experimento 1.2 MM3

**Tabla 10.9:** Variables de salida de la simulación. Experimento 1.2 MM3

COSTE	PRODUCCIÓN		
	-25 %	-50 %	-75 %
HCl C2	22.545,0000	22.545,00	22.545,00
HCl Total C2	22.545,00	22.545,00	22.545,00
Cloro C1	88,77	88,77	88,77
Cloro C2	674,652	674,652	674,652
Cloro Total C1	88,77	88,77	88,77
Cloro Total C2	674,652	674,652	674,652
Hipoclorito C1	535,899	535,899	535,899
Hipoclorito Total C1	535,899	535,899	535,899
Sosa C1	98,4	98,4	98,4
Sosa C2	2.074,60	2.074,60	2.074,60
Sosa Total C1	98,4	98,4	98,4
Sosa Total C2	2.074,60	2.074,60	2.074,60
Total C1	723,069	723,069	723,069
Total C2	25.294,25	25.294,25	25.294,25
Totales	26.017,32	26.017,32	26.017,32
Vehículos Aceites	61,3	61,3	61,3
Vehículos Agua HC	61,3	61,3	61,3
Vehículos Baterías	274,15	274,15	274,15
Vehículos C1 Aceites	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Agua HC	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Baterías	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Chatarra	16,92	16,92	16,92
Vehículos C1 Disolvente	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Envases	11,72	5,86	5,86
Vehículos C1 Equipos	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Filtros	5,86	5,86	5,86
Vehículos C2 Aceites	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Baterías	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Disolvente	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Equipos	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Sólidos	6,56	6,56	6,56
Vehículos Disolvente	61,3	61,3	61,3
Vehículos Envases	122,6	61,3	61,3
Vehículos Equipos	61,3	61,3	61,3
Vehículos Filtros	61,3	61,3	61,3
Vehículos Sólidos	61,3	61,3	61,3
Total Transportes C1 MM3	46,88	41,02	41,02
Total Transportes C1 MM4	16,92	16,92	16,92
Total Transportes C2 MM3	32,8	32,8	32,8
Total Trans.Gestor MM3	764,55	703,25	703,25
Total Trans.Gestor MM4	91,89	91,89	91,89
Total Transportes MM3	844,23	777,07	777,07
Total Transportes MM4	108,81	108,81	108,81

**Tabla 10.10:** Variables de entrada de la simulación. Experimento 1.2 MM3

	Precio Hipo	Precio Acido	Precio Cloro	Precio Sosa	Precio Inicial Hipoclorito	Precio Inicial Ácido	Precio Inicial Cloro	Precio Inicial Sosa
PRODUCCIÓN -25 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
PRODUCCIÓN -50 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
PRODUCCIÓN -75 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9

	€/Viaje Lunagua	€/Viaje Recyplas	€/Viaje C1-C2	€/Viaje C1-C3	€/Viaje C2-C3	€/Viaje Berrio
PRODUCCIÓN -25 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
PRODUCCIÓN -50 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
PRODUCCIÓN -75 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21

	Falta C1 MM3	Falta C2 MM3	Falta C3 MM3	Falta C1 MM4	Falta C2 MM4	Carga Vehículo	Faltas Suministro
PRODUCCIÓN -25 %	0.75	0.75	0.75	1	1	4000	0
PRODUCCIÓN -50 %	0.5	0.5	0.5	1	1	4000	0
PRODUCCIÓN -75 %	0.25	0.25	0.25	1	1	4000	0

## 10.6. Experimento 1.2 MM4

**Tabla 10.11:** Variables de salida de la simulación. Experimento 1.2 MM4

COSTE	PRODUCCIÓN		
	-25 %	-50 %	-75 %
HCl C2	22.545,00	22.545,00	22.545,00
HCl Total C2	22.545,00	22.545,00	22.545,00
Cloro C1	88,77	88,77	88,77
Cloro C2	674,652	674,652	674,652
Cloro Total C1	88,77	88,77	88,77
Cloro Total C2	674,65	674,65	674,652
Hipoclorito C1	535,899	535,899	535,899
Hipoclorito Total C1	535,899	535,899	535,899
Sosa C1	98,40	98,40	98,4
Sosa C2	2.074,60	2.074,60	2.074,60
Sosa Total C1	98,4	98,4	98,4
Sosa Total C2	2.074,60	2.074,60	2.074,60
Total C1	723,069	723,069	723,069
Total C2	25.294,25	25.294,25	25.294,25
Totales	26.017,32	26.017,32	26.017,32
Vehículos Aceites	122,6	122,6	122,6
Vehículos Agua HC	61,3	61,3	61,3
Vehículos Baterías	274,15	274,15	274,15
Vehículos C1 Aceites	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Agua HC	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Baterías	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Chatarra	11,28	11,28	5,64
Vehículos C1 Disolvente	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Envases	11,72	11,72	11,72
Vehículos C1 Equipos	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Filtros	5,86	5,86	5,86
Vehículos C2 Aceites	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Baterías	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Disolvente	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Equipos	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Sólidos	6,56	6,56	6,56
Vehículos Disolvente	61,3	61,3	61,3
Vehículos Envases	122,6	122,6	122,6
Vehículos Equipos	61,3	61,3	61,3
Vehículos Filtros	61,3	61,3	61,3
Vehículos Sólidos	61,3	61,3	61,3
Total Transportes C1 MM3	46,88	46,88	46,88
Total Transportes C1 MM4	11,28	11,28	5,64
Total Transportes C2 MM3	32,8	32,8	32,8
Total Trans.Gestor MM3	825,85	825,85	825,85
Total Trans.Gestor MM4	71,47	51,05	30,63
Total Transportes MM3	905,53	905,53	905,53
Total Transportes MM4	82,75	62,33	36,27

Tabla 10.12: Variables de entrada de la simulación. Experimento 1.2 MM4

	Precio Hipo	Precio Acido	Precio Cloro	Precio Sosa	Precio Inicial Hipoclorito	Precio Inicial Ácido	Precio Inicial Cloro	Precio Inicial Sosa
PRODUCCIÓN -25 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
PRODUCCIÓN -50 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
PRODUCCIÓN -75 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9

	€/Viaje Lunagua	€/Viaje Recyplas	€/Viaje C1-C2	€/Viaje C1-C3	€/Viaje C2-C3	€/Viaje Berrio
PRODUCCIÓN -25 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
PRODUCCIÓN -50 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21
PRODUCCIÓN -75 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	10,21

	Falta C1 MM3	Falta C2 MM3	Falta C3 MM3	Falta C1 MM4	Falta C2 MM4	Carga Vehículo	Faltas Suministro
PRODUCCIÓN -25 %	1	1	1	0.75	0.75	4000	0
PRODUCCIÓN -50 %	1	1	1	0.5	0.5	4000	0
PRODUCCIÓN -75 %	1	1	1	0.25	0.25	4000	0

## 10.7. Experimento 2 MM3

**Tabla 10.13:** Variables de salida de la simulación. Experimento 2 MM3

COSTE	TRANSPORTE	TRANSPORTE	TRANSPORTE	TRANSPORTE
	+25 %	+50 %	+75 %	+100 %
HCl C2	22.545,00	22.545,00	22.545,00	22.545,00
HCl Total C2	22.545,00	22.545,00	22.545,00	22.545,00
Cloro C1	88,77	88,77	88,77	88,77
Cloro C2	674,652	674,652	674,652	674,652
Cloro Total C1	88,77	88,77	88,77	88,77
Cloro Total C2	674,65	674,652	674,652	674,652
Hipoclorito C1	535,899	535,899	535,899	535,899
Hipoclorito Total C1	535,899	535,899	535,899	535,899
Sosa C1	98,40	98,4	98,4	98,4
Sosa C2	2.074,60	2.074,60	2.074,60	2.074,60
Sosa Total C1	98,4	98,4	98,4	98,4
Sosa Total C2	2.074,60	2.074,60	2.074,60	2.074,60
Total C1	723,069	723,069	723,069	723,069
Total C2	25.294,25	25.294,25	25.294,25	25.294,25
Totales	26.017,32	26.017,32	26.017,32	26.017,32
Vehículos Aceites	155,26	183,92	214,58	245,22
Vehículos Agua HC	77,63	183,92	214,58	490,44
Vehículos Baterías	317,95	381,54	445,13	508,72
Vehículos C1 Aceites	5,86	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Agua HC	5,86	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Baterías	5,86	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Chatarra	16,92	16,92	16,92	16,92
Vehículos C1 Disolvente	5,86	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Envases	11,72	11,72	11,72	11,72
Vehículos C1 Equipos	5,86	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Filtros	5,86	5,86	5,86	5,86
Vehículos C2 Aceites	6,56	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Baterías	6,56	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Disolvente	6,56	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Equipos	6,56	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Sólidos	6,56	6,56	6,56	6,56
Vehículos Disolvente	77,63	91,96	107,29	122,61
Vehículos Envases	155,26	275,88	429,16	858,27
Vehículos Equipos	77,63	91,96	107,29	245,22
Vehículos Filtros	77,63	91,96	107,29	122,61
Vehículos Sólidos	77,63	91,96	107,29	245,22
Total Transportes C1 MM3	46,88	46,88	46,88	46,88
Total Transportes C1 MM4	16,92	16,92	16,92	16,92
Total Transportes C2 MM3	32,8	32,8	32,8	32,8
Total Trans.Gestor MM3	1.016,62	1.393,10	1.732,61	2.838,31
Total Trans.Gestor MM4	91,89	122,52	173,57	347,14
Total Transportes MM3	1.096,30	1.472,78	1.812,29	2.917,99
Total Transportes MM4	108,81	139,44	190,49	364,06

Tabla 10.14: Variables de entrada de la simulación. Experimento 2 MM3

	Precio Hipo	Precio Acido	Precio Cloro	Precio Sosa	Precio Inicial Hipoclorito	Precio Inicial Ácido	Precio Inicial Cloro	Precio Inicial Sosa
TRANSPORTE +25 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
TRANSPORTE +50 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
TRANSPORTE +75 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
TRANSPORTE +100 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9

	€/Viaje Lunagua	€/Viaje Recypilas	€/Viaje C1-C2	€/Viaje C1-C3	€/Viaje C2-C3	€/Viaje Berrio
TRANSPORTE +25 %	77,63	317,95	5,64	5,86	6,56	10,21
TRANSPORTE +50 %	91,96	381,54	5,64	5,86	6,56	10,21
TRANSPORTE +75 %	107,29	445,13	5,64	5,86	6,56	10,21
TRANSPORTE +100 %	122,61	508,72	5,64	5,86	6,56	10,21

	Falta C1 MM3	Falta C2 MM3	Falta C3 MM3	Falta C1 MM4	Falta C2 MM4	Carga Vehículo	Faltas Suministro
TRANSPORTE +25 %	1	1	1	1	1	4000	0
TRANSPORTE +50 %	1	1	1	1	1	3000	0
TRANSPORTE +75 %	1	1	1	1	1	2000	0
TRANSPORTE +100 %	1	1	1	1	1	1000	0

## 10.8. Experimento 2 MM4

**Tabla 10.15:** Variables de salida de la simulación. Experimento 2 MM4

COSTE	TRANSPORTE	TRANSPORTE	TRANSPORTE	TRANSPORTE
	+25 %	+50 %	+75 %	+100 %
HCl C2	22.545,00	22.545,00	22.545,00	22.545,00
HCl Total C2	22.545,00	22.545,00	22.545,00	22.545,00
Cloro C1	88,77	88,77	88,77	88,77
Cloro C2	674,652	674,652	674,652	674,652
Cloro Total C1	88,77	88,77	88,77	88,77
Cloro Total C2	674,65	674,652	674,652	674,652
Hipoclorito C1	535,899	535,899	535,899	535,899
Hipoclorito Total C1	535,899	535,899	535,899	535,899
Sosa C1	98,40	98,4	98,4	98,4
Sosa C2	2.074,60	2.074,60	2.074,60	2.074,60
Sosa Total C1	98,4	98,4	98,4	98,4
Sosa Total C2	2.074,60	2.074,60	2.074,60	2.074,60
Total C1	723,069	723,069	723,069	723,069
Total C2	25.294,25	25.294,25	25.294,25	25.294,25
Totales	26.017,32	26.017,32	26.017,32	26.017,32
Vehículos Aceites	122,6	122,6	122,6	122,6
Vehículos Agua HC	61,3	122,6	122,6	245,2
Vehículos Baterías	274,15	274,15	274,15	274,15
Vehículos C1 Aceites	5,86	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Agua HC	5,86	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Baterías	5,86	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Chatarra	16,92	16,92	16,92	16,92
Vehículos C1 Disolvente	5,86	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Envases	11,72	11,72	11,72	11,72
Vehículos C1 Equipos	5,86	5,86	5,86	5,86
Vehículos C1 Filtros	5,86	5,86	5,86	5,86
Vehículos C2 Aceites	6,56	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Baterías	6,56	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Disolvente	6,56	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Equipos	6,56	6,56	6,56	6,56
Vehículos C2 Sólidos	6,56	6,56	6,56	6,56
Vehículos Disolvente	61,3	61,3	61,3	61,3
Vehículos Envases	122,6	183,9	245,2	429,1
Vehículos Equipos	61,3	61,3	61,3	122,6
Vehículos Filtros	61,3	61,3	61,3	61,3
Vehículos Sólidos	61,3	61,3	61,3	122,6
Total Transportes C1 MM3	46,88	46,88	46,88	46,88
Total Transportes C1 MM4	16,92	16,92	16,92	16,92
Total Transportes C2 MM3	32,8	32,8	32,8	32,8
Total Trans.Gestor MM3	825,85	948,45	1.009,75	1.438,85
Total Trans.Gestor MM4	114,93	183,96	303,96	694,96
Total Transportes MM3	905,53	1.028,13	1.089,43	1.518,53
Total Transportes MM4	131,85	200,88	320,88	711,88

Tabla 10.16: Variables de entrada de la simulación. Experimento 2 MM4

	Precio Hipo	Precio Acido	Precio Cloro	Precio Sosa	Precio Inicial Hipoclorito	Precio Inicial Ácido	Precio Inicial Cloro	Precio Inicial Sosa
TRANSPORTE +25 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
TRANSPORTE +50 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
TRANSPORTE +75 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
TRANSPORTE +100 %	1,5855	1,2525	1,7754	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9

	€/Viaje Lunagua	€/Viaje Recypilas	€/Viaje C1-C2	€/Viaje C1-C3	€/Viaje C2-C3	€/Viaje Berrio
TRANSPORTE +25 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	12,71
TRANSPORTE +50 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	15,33
TRANSPORTE +75 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	17,88
TRANSPORTE +100 %	61,3	274,15	5,64	5,86	6,56	20,44

	Falta C1 MM3	Falta C2 MM3	Falta C3 MM3	Falta C1 MM4	Falta C2 MM4	Carga Vehículo	Faltas Suministro
TRANSPORTE +25 %	1	1	1	1	1	4000	0
TRANSPORTE +50 %	1	1	1	1	1	3000	0
TRANSPORTE +75 %	1	1	1	1	1	2000	0
TRANSPORTE +100 %	1	1	1	1	1	1000	0

## 10.9. Experimento 3

**Tabla 10.17:** Variables de salida de la simulación. Experimento 3

COSTE	COSTES +25 %	COSTES +50 %	COSTES +75 %	COSTES +100 %
HCl C2	28.080,00	33.840,00	39.420,00	45.000,0000
HCl Total C2	28.080,00	33.840,00	39.420,00	45.000,00
Cloro C1	111	133	155,5	177,5
Cloro C2	843,6	1.010,80	1.181,80	1.349,00
Cloro Total C1	111	133	155,5	177,5
Cloro Total C2	843,6	1.010,80	1.181,80	1.349,00
Hipoclorito C1	669,24	804,44	936,26	1.071,46
Hipoclorito Total C1	669,24	804,44	936,26	1.071,46
Sosa C1	122,4	147,6	171,6	196,8
Sosa C2	2.580,60	3.111,90	3.617,90	4.149,20
Sosa Total C1	122,4	147,6	171,6	196,8
Sosa Total C2	2.580,60	3.111,90	3.617,90	4.149,20
Total C1	902,64	1.085,04	1.263,36	1.445,76
Total C2	31.504,20	37.962,70	44.219,70	50.498,20
Totales	32.406,84	39.047,74	45.483,06	51.943,96
Vehículos Aceites	153,24	183,9	214,54	245,2
Vehículos Agua HC	76,62	91,95	107,27	122,6
Vehículos Baterías	342,69	411,22	479,76	548,3
Vehículos C1 Aceites	7,32	8,79	10,25	11,72
Vehículos C1 Agua HC	7,32	8,79	10,25	11,72
Vehículos C1 Baterías	7,32	8,79	10,25	11,72
Vehículos C1 Chatarra	21,15	25,38	29,61	33,84
Vehículos C1 Disolvente	7,32	8,79	10,25	11,72
Vehículos C1 Envases	14,64	17,58	20,5	23,44
Vehículos C1 Equipos	7,32	8,79	10,25	11,72
Vehículos C1 Filtros	7,32	8,79	10,25	11,72
Vehículos C2 Aceites	8,2	9,84	11,48	13,12
Vehículos C2 Baterías	8,2	9,84	11,48	13,12
Vehículos C2 Disolvente	8,2	9,84	11,48	13,12
Vehículos C2 Equipos	8,2	9,84	11,48	13,12
Vehículos C2 Sólidos	8,2	9,84	11,48	13,12
Vehículos Disolvente	76,62	91,95	107,27	122,6
Vehículos Envases	153,24	183,9	214,54	245,2
Vehículos Equipos	76,62	91,95	107,27	122,6
Vehículos Filtros	76,62	91,95	107,27	122,6
Vehículos Sólidos	76,62	91,95	107,27	122,6
Total Transportes C1 MM3	58,56	70,32	82	93,76
Total Transportes C1 MM4	21,15	25,38	29,61	33,84
Total Transportes C2 MM3	41	49,2	57,4	65,6
Total Trans.Gestor MM3	1.032,27	1.238,77	1.445,19	1.651,70
Total Trans.Gestor MM4	114,84	137,79	160,83	183,78
Total Transportes MM3	1.131,83	1.358,29	1.584,59	1.811,06
Total Transportes MM4	135,99	163,17	190,44	217,62

Tabla 10.18: Variables de entrada de la simulación. Experimento 3

	Precio Hipo	Precio Acido	Precio Cloro	Precio Sosa	Precio Inicial Hipoclorito	Precio Inicial Ácido	Precio Inicial Cloro	Precio Inicial Sosa
COSTES +25 %	1,98	1,56	2,22	1,02	1,7404	1,375	1,95	0,9
COSTES +50 %	2,38	1,88	2,66	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
COSTES +75 %	2,77	2,19	3,11	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9
COSTES +100 %	3,17	2,5	3,55	0,82	1,7404	1,375	1,95	0,9

	€/Viaje Lunagua	€/Viaje Recypilas	€/Viaje C1-C2	€/Viaje C1-C3	€/Viaje C2-C3	€/Viaje Berrio
COSTES +25 %	76,62	342,69	7,05	7,32	8,2	12,76
COSTES +50 %	91,95	411,22	8,46	8,79	9,84	15,31
COSTES +75 %	107,27	479,76	9,87	10,25	11,48	17,88
COSTES +100 %	122,6	548,3	11,28	11,72	13,12	20,42

	Falta C1 MM3	Falta C2 MM3	Falta C3 MM3	Falta C1 MM4	Falta C2 MM4	Carga Vehículo	Faltas Suministro
COSTES +25 %	1	1	1	1	1	4000	0
COSTES +50 %	1	1	1	1	1	4000	0
COSTES +75 %	1	1	1	1	1	4000	0
COSTES +100 %	1	1	1	1	1	4000	0

# Bibliografía

- [1] E. Cohen-Rosenthal and J. Musnikov. Eco-industrial strategies: unleashing synergy between economic development and the environment, work and environment initiative. *USA: Cornell University*, 2003.
- [2] Jeffrey Sachs. *The End of Poverty: Economic Possibilities for Our Time*. Ed. Debate, 2005.
- [3] J. Ehrenfeld. Industrial ecology: A framework for product and process design. *Journal of Cleaner Production*, 5(1-2):87–95, 1997.
- [4] M.R. Chertow. *Industrial symbiosis*, volume 3. Encyclopedia of Energy, 2004.
- [5] R. Lifset. Closing the loop and honing our tools. *Journal of Industrial Ecology*, 5, 2001.
- [6] INGEPRO. Bases para el desarrollo de proyecto de simbiosis industrial en el municipio de torrelavega. inventario de la información y análisis preliminar de sinergias de las cuatro grandes empresas. Technical report, Universidad de Cantabria, 2012.
- [7] J.R. Fernández, M.C. Ruiz, and E. Romero. Propuesta metodológica preliminar para el desarrollo de proyectos de simbiosis industrial. *XIV International Congress On Project Engineering. Madrid*, 2010.

- [8] R.A. Frosch and N.E. Gallopoulos. Strategies of manufacturing. *Scientific American*, 261(3):144–152, 1989.
- [9] E. Cohen-Rosenthal and N. Thomas. Desarrollo eco-industrial: el caso de estados unidos. *The IPTS Report*, (27), 1998.
- [10] Environmental Protection Agency (EPA). Briefingpaper on industrial ecology and epa focusing on the environment from the point of view of resources, products, industrial systems and eco-efficiency. *Industrial Ecology Work book*, 2001.
- [11] T.E. Graedel and B.R. Allenby. *Industrial Ecology*. Upper Saddle River: Prentice Hall, New Jersey, 2003.
- [12] J. Hansen. Personal communication with j. hansen, kalundborg center for industrial symbiosis, 2003.
- [13] T. Domenech and M. Davies. Structure and morphology of industrial symbiosis networks: The case of kalundborg. *4th and 5th Uk Social Networks Conferences*, (10), 2011.
- [14] J. Won, J. Kim, S. Lee, and H. Park. Industrial symbiosis as an integrated business environment management process: The case of ulsan industrial complex. *The 1st International Forum of Strategic Technology*, pages 423–428, 2006.
- [15] M.R. Chertow. Uncovering industrial simbiosis. *Journal of Industrial Ecology*, 11(1):11–30, 2007.
- [16] M. Outters. *Recommendation guide for planning and management of industrial areas through Industrial Ecology*. ECOSIND, 2006.
- [17] G. Massard and S. Erkman. A regional industrial symbiosis methodology and its implementation in geneva, switzerland. *3rd International Conference on Life Cycle Management from Analysis to Implementation, Zurich, Switzerland*, 2007.

- [18] M.R. Chertow, W.S. Ashton, and J.C. Espinosa. Industrial symbiosis in puerto rico: Environmentally related agglomeration economies. *Regional Studies*, 42(10):1299–1312, 2008.
- [19] T. Sterr and T. Ott. 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):947–965, 2004.
- [20] M.R. Chertow. Industrial symbiosis: Literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*, (25):313–337, 2000.
- [21] Parlamento Europeo. Directiva 2008/98/ce. Consejo de 19 de noviembre de 2008.
- [22] D. Jacoby. *Guide to Supply Chain Management: How Getting it Right Boosts Corporate Performance (The Economist Books)*. Bloomberg Press, 1st edition, 2009.
- [23] D. Blanchard. *Supply Chain Management Best Practices*. John Willey and Sons, 2nd edition, 2010.
- [24] S. Chopra and P. Meindl. *Supply Chain Management*. Pearson/Prentice Hall, 3rd edition, 2006.
- [25] James B. Ayers. *Handbook of Supply Chain Management*. St. Lucie Press, 2000.
- [26] Fundación Forum Ambiental. Análisis del ciclo de vida. [www.forumambiental.org/cast/archivos/eines12.htm](http://www.forumambiental.org/cast/archivos/eines12.htm), Agosto 2013.
- [27] International Standard Organization. ISO 14040:1997. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Standard Organization, 1997.
- [28] Comisión Nacional del Medio Ambiente. Proyecto minimización de Residuos provenientes de Embalajes. *Guía Metodológica Estudio de Ciclo de Vida*. Gobierno de Chile, 2001.

- [29] B. Romero. El análisis del ciclo de vida y la gestión ambiental. *Boletín IIE*, 27(3):91–97, Julio-Septiembre 2003.
- [30] L. Trama and J.C. Troiano. Análisis del ciclo de vida según las normas de la subserie iram-iso 14040. *Revista Construir. Departamento de Energía y Asuntos Ambientales, Instituto Argentino de Normalización*, (57):6, 2002.
- [31] D.M. Lambert, M.C. Cooper, and J.D. Pagh. Supply chain management implementation issues and research opportunities. *The International Journal of Logistics Management*, 11(1):1–17, 1998.
- [32] D.M. Lambert, M.C. Cooper, and J.D. Pagh. Supply chain management. more than a new name for logistics. *The International Journal of Logistics Management*, 8(1):1–13, 1997.
- [33] APQC (American Productivity and Quality Center). <http://www.apqc.org> [Acceso: Octubre, 2013].
- [34] Supply Chain Council. Supply chain operations reference (scor) model. overview, version 10.0, 2010. [www.supply-chain.org/scor](http://www.supply-chain.org/scor), Abril 2013.
- [35] G. Jianghua, H. Yongtao, X. Yonglin, and G. Guoan. Research on supply chain model oriented to complex products life cycle, automation and logistics. *IEEE International Conference*, pages 2163–2168, 2008.
- [36] S.C. Graves et al. A dynamic model for requirement planning with application to supply chain optimization. *Journal of Operations Research*, 46(3):35–46, 1998.
- [37] M.P. Baganha and M.A. Cohen. The stabilizing effect of inventory in supply chains. *Journal of Operations Research*, 46(3):72–83, 1998.
- [38] S. Moon. A profit-maximizing plant-loading model with demand fill-rate constraints. *Journal of Operations Research*, 40(11):1019–1027, 1989.

- [39] G. Stevens. Integrating the supply chain. *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*, (19):3–8, 1989.
- [40] X. Li, X.J. Gu, and Z.G. Liu. A strategic performance measurement system for firms across supply and demand chains on the analogy of ecological succession. *Ecological Economics*, 68(12):2918–2929, 2009.
- [41] X. Li, X.J. Gu, and Z.G. Liu. Developing structural dimensions of service supply chain by analogy with community structure, service systems and service management. *ICSSSM '09. 6th International Conference*, pages 630–635, 2009.
- [42] H. Zou and T. Yu. The research on synergetic model of supply chain system. *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, WiCOM*, 2008.
- [43] G. Colson and C. De Bruyn. *Models and Methods in Multiple Objective Decision Making, en Modeks and Methods in Multi-Criteria Decision Making*. London, Pergamon, 1989.
- [44] J.I. Barredo. *Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica en la Ordenación del Territorio*. Editorial RAMA, 1996.
- [45] E. Martínez and M. Escudey. *Evaluación y decisión multicriterio: reflexiones y experiencias*. UNESCO, 1998.
- [46] AACE International. Recommended practice no.18r-97, cost estimate classification system, 1997.
- [47] A. Pikulik and H.E. Diaz. *Cost estimating for major process equipment*. Chemical Engineering, Octubre 1977.
- [48] R. Turton, R.C. Bailie, W.B. Whiting, J.A. Shaeiwitz, and D. Bhattacharyya. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. Pearson Education, USA, 2012.

- [49] K.M. Guthrie. *Capital Cost Estimating*, volume 76. Chemical Engineering, 1969.
- [50] K.M. Guthrie. *Process Plant Estimating, and Control of Chemical Construction Projects*. Solana Beach, 1974.
- [51] G.D. Ulrich. *A Guide to Chemical Engineering Process Design and Economics*. John Wiley and Sons, 1984.
- [52] P.F. Navarrete. *Planning, Estimating, and Control of Chemical Construction Projects*. Marcel Dekker, 1995.
- [53] N. Parker. Using natural gas transmission pipeline costs to estimate hydrogen pipeline costs. *Institute of Transportation Studies (UCD)*, 2004.
- [54] U.S. Army Corps Of Engineers. Final project implementation report and environmental impact statement, appendix b. Technical report, South Florida Water Jacksonville District Management District, 2011.
- [55] Mirian Vale Shire Council. Engineering estimates and financial implication of pipeline and desalination options for agnes water and 1770. Technical report, Burns Bridge Transactions, 2007.
- [56] Barnstable County Wastewater Cost Task Force. Comparison of costs for wastewater management systems applicable to cape cod. Technical report, Association to Preserve Cape Cod, 2010.
- [57] PRé Consultants. *SimaPro 7 [Programa de Ordenador]*. UK and Ireland: PRé Consultants, Disponible en Departamento de Transportes, Proyectos y Procesos de la Universidad de Cantabria [Usado: Septiembre 2013].
- [58] L.A. Wright, S. Kemp, and I. Williams. Carbon footprinting: Towards a universally accepted definition. *Carbon Management*, (2):61–72, 2011.
- [59] IPCC. Energy, guidelines for national ghg inventories. Technical report, Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2006.

- [60] U.S. Peroxide LLC. Treatment applications using hydrogen peroxide. [Online] Disponible en: <http://www.h2o2.com/products-and-services/us-peroxide-technologies.aspx?pid=116&name=Sodium-Hypochlorite> [Último Acceso: Agosto 2013], 2013.
- [61] West central equipment. [Online] Disponible en: <http://westcentraleq.com/oil-prices>.
- [62] IChemE Education Subject Group. Chemicals cost guide. [Online] Disponible en: <http://ed.icheme.org/costchem.html> [Último Acceso: Agosto 2013], 2002.
- [63] Butler Consultants . Free industry statistics. [Online] Disponible en: <http://research.financial-projections.com/IndustryStats-NetProfit>, Agosto 2013.
- [64] D. Zarzos and L. Amorós. Nuevas tendencias para el tratamiento de agua industrial. redes tecnológicas de innovación educativa. [Online] Disponible en: <http://iq.ua.es/MedioAmbiente>. [Último Acceso: Agosto 2013], 2007.
- [65] M. García Melon, V. Cloquell Ballester, and T. Gómez Navarro. *Metodología del Diseño Industrial*. Ed. Universidad Politécnica de Valencia, 2001.
- [66] Banco de España. Banco de españa. [Online] Disponible en: <http://www.bde.es/clientebanca/tipo/entidades.htm> [Último Acceso: Noviembre 2013], 2013.
- [67] D. Monarchi and G. Puhr. A research typology for object-oriented analysis and design. *Communications of the ACM*, 35(9):35–47, 1992.
- [68] G. Stevens. Integrating the supply chain. *International Journal of Physical Distribution and Materials Management*, 1989.
- [69] G. Stevens. Successful supply chain management. *Management Decision*, 1990.
- [70] A. Neely, M. Gregory, and K. Platts. Performance measurement design. *International Journal of Operations and Production Management*, 1995.

- [71] C. M. Harland. Supply chain management: Relationships, chains and networks. *British Journal of Management*, 1996.
- [72] C.L. Lai, W.H. Ip, and W.B. Lee. The system dynamics model for engineering services. *Managing Service Quality*, 11(3):191–199, 2001.
- [73] A. Gunasekaran, C. Patel, and E. Tirtiroglu. Performance measures and metrics in a supply chain environment. *International Journal of Operations and Production Management*, 21:71–87, 2001.
- [74] B.M. Beamon. Measuring supply chain performance. *International Journal of Operations and Production Management Production Management*, 19:275–292, 2014.
- [75] M. Christopher. Logistics and supply chain management. *Financial Times, New York, NY*, 1994.
- [76] A.D. Nicoll. Integrating logistics strategies. In *Annual International Conference Proceedings, American Production and Inventory Control Society*, pages 590–594, 1994.
- [77] T. Davis. Effective supply chain management. *Sloan Management Review*, pages 35–46, 1993.
- [78] J.B. Johnson and S. Randolph. Brief: making alliances work - using a computer-based management system to integrate the supply chain. *Journal of Petroleum Technology*, 47(6):512–513, 1995.
- [79] B.M. Beamon. Performance measures in supply chain management. In *Proceedings of the 1996 Conference on Agile and Intelligent Manufacturing Systems, Rensselaer Polytechnic Institute*, 1996.
- [80] J. Korhonen and T.P. Seager. Beyond eco-efficiency: a resilience perspective. *Business Strategy and the Environment*, (17):411–419, 2008.

- [81] I. Scoones M. Leach and A. Stirling. Dynamic sustainabilities: Linking technology, environment and social justice earthscan, london. In *Earthscan*, London, 2010.
- [82] C.S. Holing. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4(1):1–23, 1973.
- [83] J.M. Anderies S. Carpenter, B. Walker and N. Abel. From metaphor to measurement: resilience of what to what? *Ecosystems*, (4):765–781, 2001.
- [84] M. Christopher and H. Peck. Building the resilient supply chain. *The International Journal of Logistics Management*, (15):1–14, 2004.
- [85] J. Fiksel T.J. Pettit and K.L. Croxton. Ensuring supply chain resilience: development of a conceptual framework. *Journal of business logistics*, (31):1–21, 2010.
- [86] J. Fiksel. Designing resilient, sustainable systems. *Environmental Science and Technology*, (37):5330–5339, 2003.
- [87] J.R. Ehrenfeld. Would industrial ecology exist without sustainability in the background? *Journal of Industrial Ecology*, (11):73–84, 2007.
- [88] J. Kay. On complexity theory, exergy and industrial ecology: some implications for construction ecology. *Construction Ecology: Nature as a Basis for Green Buildings*, 2002.
- [89] C. Hardy and T.E. Graedel. Industrial ecosystems as food webs. *Journal of Industrial Ecology*, (6):29–37, 2002.
- [90] W.S. Ashton. the structure function and evolution of a regional industrial ecosystem. *Journal of Industrial Ecology*, (13):228–246, 2009.
- [91] J. Zhu and M. Ruth. Networks of industrial symbiosis: growth patterns and institutional impacts. *Environment and Urban Systems*, Submitted for publication.

- [92] J. Newfrock R. Starr and M. Delurey. Enterprise resilience: Managing risk in the networked economy. *Strategy and Business*, (30):70–79, 2003.
- [93] U. Soni and V. Jain. Minimizing the vulnerabilities of supply chain: A new framework for enhancing the resilience. In *IEEE international conference on industrial engineering and engineering management*, pages 933–939, Singapore, 2011.
- [94] D. Ivanov and B. Sokolov. Control and system-theoretic identification of the supply chain dynamics domain for planning, analysis and adaptation of performance under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 2(224):313–323, 2012.
- [95] V. Kumar S. Yadav, N. Mishra and M.K. Tiwari. A framework for designing robust supply chains considering product development issues. *International Journal of Production Research*, 21(49):6407–6426, 2011.
- [96] S.R. Carpenter B. Walker, C.S. Hollin and A. Kinzig. Resilience, adaptability transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society*, 2004.
- [97] SIMIO LLC. *Simio Version 5 [Programa de Ordenador]*. SIMIO LLC, Disponible en Departamento de Transportes, Proyectos y Procesos de la Universidad de Cantabria [Usado: Febrero 2013].



Jutta Geldermann and  
Matthias Schumann (Eds.)

First International Conference  
on Resource Efficiency in  
Interorganizational Networks  
– ResEff 2013 –

November 13<sup>th</sup> – 14<sup>th</sup>, 2013  
Georg-August-Universität Göttingen

Papers



Universitätsverlag Göttingen  
2013

## Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Funded by

**DFG**

**KMU** Netzwerk der Göttinger Graduiertenschule  
Gesellschaftswissenschaften (GGG)



Contact

Prof. Dr. Jutta Geldermann  
Prof. Dr. Matthias Schumann  
Georg-August-Universität Göttingen  
DFG Research Training Group 1703  
“Resource Efficiency in Interorganizational Networks”  
Platz der Göttinger Sieben 3  
D-37073 Göttingen

[reseff2013@uni-goettingen.de](mailto:reseff2013@uni-goettingen.de)

This work is protected by German Intellectual Property Right Law.  
It is available as an open access version through the publisher’s homepage and the online catalogue of the State and University Library of Göttingen (<http://www.sub.uni-goettingen.de>). The conditions of the licence terms of the onlineversion apply.

Set and Layout: Shanna Appelhanz and Ingo Karschin  
Cover: Jutta Pabst  
Cover Pictures: DFG Research Training Group 1703

© 2013 Universitätsverlag Göttingen  
<http://univerlag.uni-goettingen.de>  
ISBN: 978-3-86395-142-9

## **Track B: Planning of Production and Value-added Networks for Renewable Resources**

### **IS and IM in Value-Generating Networks for Renewable Resources**

- Improved effectiveness & optimization of re-newable resources supply chains based on modern and advanced simulation modeling software**  
Dietmar Böttner, Markus Bans ..... 169
- Steering Information Technology in Collaborative Networks. Development of a Balanced Scorecard**  
Jens Schmitt, Simon T.-N. Trang, Lutz M. Kolbe ..... 180
- Improvement of Traceability in Continuous Processes**  
Shanna Appelhanz, Matthias Schumann ..... 192
- Sustainable Supplier Relationship Management: A resource-based Perspective**  
Holger Schrödl, Paulina Simkin ..... 205
- Inter-organizational systems adoption in regional networks of the wood industry. Towards a factor-based model**  
Simon T.-N. Trang, Lutz M. Kolbe ..... 218

### **Mathematical Optimization in the Presence of Uncertainties**

- Using Minimum Quantities to Guarantee Resource Efficiency in Combinatorial Optimization Problems**  
Clemens Thielen ..... 233
- Efficient Graph Algorithms for Network Analysis**  
Tong-Wook Shinn, Tadao Takaoka ..... 236
- Resource Efficiency in Veneer Production: Optimization of a Complex Cutting Problem**  
Morten Tiedemann, Jonas Ide ..... 248
- An Application of Minmax Robust Efficiency in the Wood Processing Industry**  
Jonas Ide, Morten Tiedemann ..... 259

---

**Modeling of Production and Logistic Systems**
**Eco-Industrial Areas Modeling Proposal**

Elena Romero, M. Carmen Ruiz, Roberto Álvarez, Eduardo Bayona..... 273

**Design Of Synergy Network Of Industrial Symbiosis Between Large Companies Of An Industrial Complex**

Eduardo Bayona, María del Carmen Ruiz, Elena Romero, Roberto Álvarez ..... 285

**Integrated facility location and network design for bioenergy villages**

Ingo Karschin, Jutta Geldermann ..... 297

**Policy Options for the Harmonisation of Renewable Energy Support Schemes in the EU after 2020. A Multi-Criteria Decision Analysis**

Simone Steinhilber ..... 309

**Techno-economic analysis and evaluation of recycling measures for iron and steel slags**

Christoph Meyer, Matthias G. Wichmann, Thomas S. Spengler ..... 321

**An Approach for the Assessment of Sustainable Supply Chain of Biomass**

Alexandra Pehlken, Daniel Meyerholt, Manuel Osmers ..... 334

**Multi-Criteria Decision Support within Corporate Environmental Management Information Systems**

Fabian Renatus, Jutta Geldermann ..... 338

**Material consumption in the construction sector: resource efficiency from an inter-organizational perspective**

Michael Hiete..... 350

**A Material Flow-based Approach for the Economic Assessment of alternative Landfill Mining Concepts**

Anna Diener, Karsten Kieckhäfer, Thomas S. Spengler ..... 362

**Decision Support for Logistic Networks of Renewable Resources based on Tracking and Tracing System**

Mohammad Sadegh Taskhiri, Shanna Appelhanz, Jutta Geldermann, Matthias Schumann ..... 374

# Design Of Synergy Network Of Industrial Symbiosis Between Large Companies Of An Industrial Complex

*Eduardo Bayona, María del Carmen Ruiz,  
Elena Romero, Roberto Álvarez*

*INGEPRO Research Group,  
Department of Transport and Projects and Processes Technology  
University of Cantabria, Spain*

## Abstract

Industrial symbiosis (IS) presents the implementation of synergies that represent a progress in terms of sustainable development, so that should be ensured the coexistence of a benefit, not only economic but also social and environmental. In previous experiences of network design and analysis, focus is mainly on savings and economic potential of the synergies implementation. While economic viability is a necessary condition, the life cycle approach provides environmental and also economic information that should be quantified in every option of the network design.

This project starts from the preliminarily identified synergies between large companies of the production and manufacturing sector, located in an industrial complex in northern Spain. Based on an analogy between the concept of supply chain and industrial synergy, the analysis of the identified synergies is carried out by multicriteria selection methods that will return the ones that will be part of the initial synergy network. In this point the technical feasibility of each particular case is verified, analysing the economic and environmental feasibility of each synergy, and the whole eco-industrial system they form. For this purpose, techniques and tools of process and flow analysis will be used, with life cycle perspective.

The resulting network model must combine new investment opportunities and services with an economic and environmental benefit substantially higher than the baseline.

## Keywords

Industrial synergy, industrial symbiosis, network.

## 1 Introduction

The concept of Industrial Symbiosis (IS) is part of a new field of recent study called Industrial Ecology (IE). This new discipline, works mainly with the existing material and energy flows across different systems, including from the finished goods to the factories that produce them, and at different scales such as regional, national and even a global level point of view. As described by Graedel & Allenby (2003), IE "*is a systemic vision which seeks to optimize the whole material cycle from their virgin extraction, through the finished material, the component, the final product, the product obsolescence and its final disposal*". On the basis of IE, IS incorporates many elements that emphasize the idea of completing cycles within an industrial process and the reuse of materials from a broad perspective of the system concept. More particularly, IS focuses on these flows through networks of businesses and other organizations within the local and regional economy as a means to focus industrial development from an environmentally sustainable standpoint. IS involves traditionally separated sectors given their different activities within a community approach, providing a competitive advantage through a physical exchange of materials, energy, water and/or sub products. The key of IS is on the collaboration and synergistic possibilities offered by geographic proximity of the entities involved (Chertow, 2004). IS term was coined in the small town of Kalundborg, Denmark, where spontaneously, had emerged a dense network of interactions between the entities that formed the town's industrial park (Domenech and Davies, 2011). There are cases like Ulsan (Won et al., 2006), in which these networks were developed intentionally, that implements the theoretical IS knowledge and proves possible to achieve a more sustainable industrial activity while improving economic development at the same time.

A life cycle perspective ensures a broader approach that is not limited only to the processes that occur within an installation or plant, but will consider the full set of environmental impacts that occur in each stage of development, and the industrial use given to each of the materials involved. Focusing on the case of IS, the life cycle approach is useful when evaluating opportunities for developing symbiosis and the existence of possible synergies, where the situation of the life cycle of a product makes the residual flows can be considered useful for other use within the life cycle of another product.

The aim of this work is to design a methodology for creating synergy networks in an industrial complex following a defined structure and extrapolated to any event contemplated. This research uses the context of a previous study (INGEPRO, 2012) to create an appropriate methodology for the design of a feasible preliminary synergy network. The cited project

(INGEPRO, 2012) preliminarily identified the synergies available between large production and manufacturing companies, located in an industrial complex in the city of Torrelavega, in Northern Spain. The network design is supported on from a shortlist of synergies within an industrial area, which have been identified on the previous study (INGEPRO, 2012).

Based on the phase's structure made by Fernández et al. (2010), this work includes the steps of selection of synergies technically feasible and economic and environmental analysis of alternatives. The ultimate goal pursued by the generated method is to reach an initial design of an industrial synergy network technically feasible and economically viable to ensure environmental and social benefit, achieving a more sustainable development of the complex activity. From this method, we try to simulate the effects and advantages obtained, intentionally and quantified, and establish a fixed line of work that facilitates the creation of an industrial symbiosis network in an industrial area.

## 2 Theoretical Methods

### 2.1 Industrial Symbiosis Synergies

Industrial symbiosis (IS) proposes the implementation of synergies that advance in terms of sustainable development, so that should ensure the coexistence of a benefit, not only economic but also social and environmental. In previous experiences and network design study, the focus is primarily on savings and economic potential of the implementation of synergies. While affordability is necessary, the approach yields information life cycle environmental and economic, which should be quantified in the design options of the network.

The nature of these innovative industrial networks is supported on the concept of “synergy”. According to the Royal Academy of the Spanish Language, synergy means the improvement obtained through a partnership between two or more companies seeking a profit greater than that obtained individually. This association is favored by geographical proximity between the members participating in the synergy.

The collaborative relationship between companies should be aimed at reducing environmental impacts by reducing natural resource consumption and waste generation. Moreover, this relationship should bring economic benefits or cost reductions that encourage the establishment of the relationship. From previous experiences and projects such as (Outters, 2006) or the one developed in Geneva (Massard & Erkman, 2007), the

previous collaboration opportunities are classified in two major groups called mutualization and substitution activities.

Substitution synergy: The consumption of an inflow of a company is replaced by a residual output from another company, to produce a reduction of resources consumption and environmental impacts generation. This implementation of substitution synergies strengthens cycle closing, increasing flow recirculation within the system.

Mutualization synergy: The integration of the whole infrastructure and services required for the system companies, which can be used together, reducing the demand for resources.

Genesis Synergy: The creation of new activities and relocation of the existing ones in the system given the existence of business opportunity. These advantages concerning the transfer of the production facility must compensate the costs and risks assumed by the company by changing its spatial location (Sterr & Ott, 2004). New activities will be implemented in the system only if they contribute to a greater sustainability of the whole. This third type implements both substitution and mutualization synergies.

## 2.2 Supply Chain and synergy network analogy

Fernández et al. (2010) presents in her work a system model for study which holds only to industrial activities in the considered area where the complex is located, simplifying and making more feasible the analysis. In this paper we use the same system for the study of the methodology of IS networks design.

From the model of behavior of the system under study presented by Fernández et al. (2010), which includes any industrial activity area, we can find many similarities with the behaviour that shows a supply chain in any of the activities implicated in an industrial complex. These suggest an analogy between the two concepts that offers a new approach for analyzing the methodologies and strategies within the IS.

Blanchard (2010) defines supply chain as: "*The sequence of events that cover the entire lifecycle of a product or service from conception until it is consumed*". Within this broad definition, there are less complex models representing the same way the concept of supply chain.

The Council of Supply Chain Management Professionals (CSCMP) also provides a description of the term in the same line. Considers that the Supply Chain includes many companies, starting with unprocessed raw materials and ending with the final consumer using the finished products. All suppliers of goods and services and all clients are included in the chain as a link, like material and computer exchanges in the logistics process,

from acquisition of raw materials to delivery of finished products to the end user.

Due to the breadth of the concept, there is a wide range of models of supply chain. The Supply Chain Operations References or SCOR model (figure 1), which was approved by the Supply Chain Council (SCC), has been developed by the consulting firm PRTM and has become a reference for the management of the supply chain. It is a model that covers from the supplier's supplier to customer's customer (Supply Chain Council, 2010).

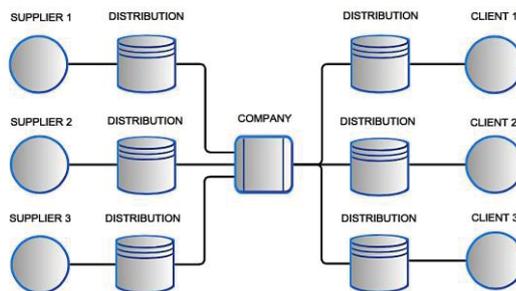


Figure 1: SCOR model

The model designed to define an industrial synergy also maintains the analogy with the SCOR model proposed by the SCC. In this paper, the supply chain model is simplified to a subset of the initial SCOR model (figure 1). This model includes from the supplier company to delivery to the customer or destination, omitting any event beyond such limits thereby adjusting the boundaries of the system under study.

Given the analogy between the concepts of supply chain and IS network, it can be designed a theoretical model of industrial synergy that represents the wide variety of them that can occur in a network given the three types considered in this work. Model structure may include any possible case so that all of them are represented by a single idea that suits each case as necessary (figure 2).

Each of the elements or entities in both models also maintains a direct analogy in concept. The origin within the synergy model maintains a direct relationship with a supply chain provider concept. In both cases both entities provide a flow of resources or products that will be further processed or directly distributed to their respective destinations.

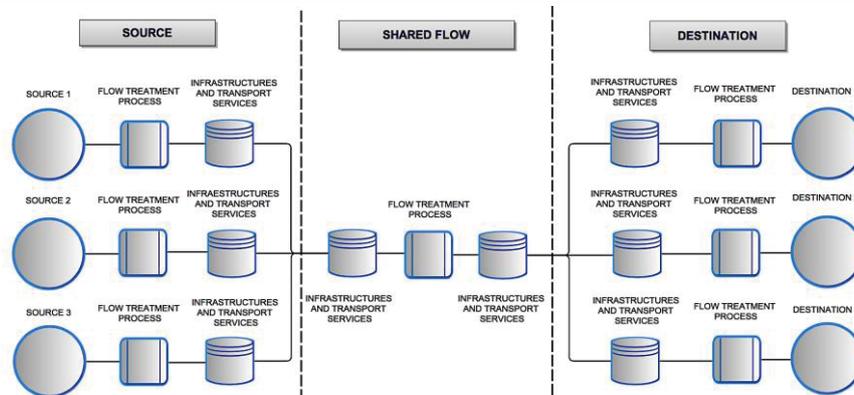


Figure 2: Synergy model

The customer or receiver of the finished products within the supply chain concept corresponds to the destination entity considered in the model of industrial synergy. These entities act as sinks of the final product and are where the flux ends. The production work within a supply chain maintains a direct analogy with the processes used for the adaptation of a flow in an industrial synergy. They can be a series of successive processes to achieve the desired product nature. The flexibility of the model enables to omit some elements that even may not be necessary and are omitted when working with the model. Finally the distribution labour, not only of the finished product to the customer, but also of any flow movement along the supply chain, have their equivalence in concept with transport infrastructure and services that are represented in the synergy model. In this case all product or flow movements are covered by a single entity to simplify the concept, and in addition add versatility when establishing the parameters that define the personality of the entity.

### 3 Methodology for Networks Analysis

#### 3.1 Preliminary selection of synergies

Based on the preliminary synergies get from the identification stage, a selection task of the synergies that will form the symbiosis network is performed. The selection uses linear weighting (scoring) so that under previously established criteria should be considered as priorities for its simplicity and feasibility. The six criteria are summarized in table 1.

Table 1: Synergy preference criteria

<b>SYNERGY PREFERENCE CRITERIA</b>			
<b>Supply capacity</b>		<b>Availability of technology</b>	
Low or non-existent investment	1	Mature technology of easy application	1
Shared technology investment	0.75	Mature technology of complex application	0.75
Acquisition of new facilities collectively	0.5	Low mature technology	0.5
Individual investment	0.25	Developing technology	0.25
<b>Flow Purity</b>		<b>Infrastructure, Facilities and Services Needed</b>	
Fully compatible	1	Infrastructure and services available	1
Similar flows	0.75	Infrastructure and services of new shared creation	0.75
Low compatibility flows	0.5	Individual infrastructure need and simple creation services	0.5
Incompatible flows	0.25	Individual infrastructure need and complex creation services	0.25
<b>Forecasting of technological and industrial investment</b>		<b>Coefficient of specific weight of exchanged flow over the total production (CSW<sub>i</sub>)</b>	
Complete supply coverage	1	Key flow for production	1
High supply coverage (>80%)	0.75	High priority of synergy implementation	0.75
Medium supply coverage (>50%)	0.5	Medium priority of synergy implementation	0.5
Low supply coverage (<50%)	0.25	Low priority of synergy implementation	0.25

The weighting of the criteria is identical in all cases (1 point), using a priority selection scale for each of the four alternatives of 0.25 to one, being 0.25 the case that less meets each criterion and 1 for each case that best meets your specifications.

The last criterion, coefficient of specific weight of exchanged flow over the total production refers to the importance of implementing a synergy for a

particular flow comparing the amount of exchanged flow with the global activity of the company. The coefficient is calculated by equation (1):

$$CSW_j = (Q_j/Pr_j) / \max CSW \quad (1)$$

Where  $CSW$  is the coefficient of specific weight,  $Q$  the amount of flow exchanged and  $Pr$  the total production of the company, both measured in tons per year. The values are normalised in order to simplify the comparison between companies in a relative way.

The chosen synergies will be those with the highest score from the ones selected in previous studies. The score will be calculated by equation (2):

$$S_j = \sum_i w_j r_{ij} \quad (2)$$

Where  $S$  is the final score of each synergy,  $w$  the weighting of each criterion that in this case is 1 for all of them, and  $r$  the score of each of the options set for each criterion.

The 26 preliminary synergies detected on the previous study are evaluated based on the selective criteria. This assessment enables to prioritize the most relevant for next evaluations. Once the rating of each synergy is done, the technical feasibility of the selected synergies is evaluated. This evaluation comprises both an economic and environmental study, which guarantees the sustainability approach of the synergies network to be designed.

### 3.2 Economical feasibility of the synergies network

The evaluation of the economic feasibility of implementing each synergy individually and as a whole network should be supported on the estimation with an order of magnitude definition of the capital and operating and maintenance costs in each case, calculating the savings that will suppose the new synergy management compared with the case which was performed prior to its implantation. From the annual savings identified, it can be estimated the payback period of the initial investment that the companies involved will have to face.

In order to estimate the costs associated with the implementation of a synergy, two distinct parts to its calculation are proposed. First a part of processing or treatment of the synergy flow is considered and then another

part of transportation and transfer of the flow between each of the entities involved. In the first part, the Module Costing Technique, which was developed by Turton et al. (2003) and based on previous works, is used. The equipment module costing technique is a common technique to estimate the cost of a new plant. It is generally accepted as the best for marking preliminary cost estimates. From this method, both the capital costs and the costs of operation and maintenance of the new facilities are obtained. In the second part, the transport cost estimation has been considered for two types of flow, fluid flow and solid flow. For the transport of fluids in pipes, the calculation is simplified for piping and pumping stations. According to Parker (2004) the whole capital costs of the construction of a pipeline for the transport of fluids can be estimated. The U.S. Army Corps of Engineers (2011) estimated the initial cost for the erection of a new pumping station. For the operation and maintenance costs of this infrastructure, the Miriam Vale Shire Council (2007) raises its estimate for both pipelines and pumping station from percentages of the capital cost, over 1% and 2.5% respectively. In the transport of solids case, the cost is estimated for road transport, basing this calculation on the prices offered by the software ACOTRAM (data of 2008), which is a Wizard Transportation Costing offered by the Ministry of Public Works and Transport of the Government of Spain. In case of occurrence of the generation of a new activity associated with the implantation of synergy, not contemplated in the module costing technique, the costs associated with this activity should be estimated in a specific way. An example is the generation of WWTP for treatment of urban wastewater. In this case the Barnstable County Wastewater Cost Task Force (2010) estimates both the capital and operation and maintenance costs for the case of a wastewater treatment station from the study of previous cases.

As a result of this economical analysis, those synergies which does not fulfill the profitability requirements are discard from the methodology. The ones proved to be economically viable continue being analyzed in order to study their environmental impact.

### **3.3 Environmental feasibility of the synergies network**

The objective of this analysis is to compare the environmental impact of the selected synergies that has been tested economically viable. For this purpose a life cycle analysis of the operation with the implementation of synergy case is carried out and compared with a life cycle analysis of the base scenario in which the synergy is not implemented. The carbon footprint is used as an indicator to compare both scenarios.

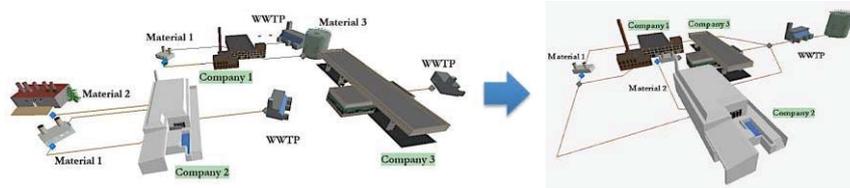


Figure 3: Example of initial case and the implementation of the synergy network

The calculation of the total emission of gases of an entity is impossible in practice due to the large number of variables that should be contemplated and the required data for this purpose, coupled with the fact that carbon dioxide can be created naturally within an activity without need for human factors. Wright et al. (2010) have suggested a more practicable definition: "*A measure of the total amount of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>) emissions of a defined population, system or activity, considering all relevant sources, sinks and storage within the spatial and temporal boundary of the population, system or activity of interest. Calculated as carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>e) using the relevant 100-year global warming potential (GWP100).*"

Based on this indicator, any synergy would be environmentally feasible when the carbon footprint of the new flow management after the synergy implantation is reasonably lower than the one left by the previous management. It must be considered the carbon footprint of the construction process of the new facilities and their life cycle assessment, so that the recovery time of the initial environmental impact (in carbon footprint measuring) before the implementation of synergy in the production process can be quantified.

Finally, after passing the whole analysis, those synergies that guarantee their sustainability formed the preliminary IS synergy network to be implemented in first place like in the example shown in figure 3.

## 4 Conclusion

Based on the prior identification of synergies in an industrial area, a methodology to prioritize a set of them and select those technically feasible for implementation is defined. For this purpose a working model for an industrial synergy has been designed based on the analogy of the supply chain model. As an ultimate goal of this work, a synergy network should be projected from the selection made following the proposed method.

At this point, future lines of research should be considered. First the methodology developed might be debugged to improve the selection process and the analysis, in order to get the most optimal synergy network after the application of the methodology. Another line to consider is the

possibility of designing work methods for the expansion of the preliminary obtained network. Thus, the design process becomes dynamic allowing its enlargement, correction or optimization using different techniques, ensuring continuous improvement in the companies involved and increasing their competitiveness and sustainability.

## References

- Barnstable County Wastewater Cost Task Force, 2010. *Comparison of costs for wastewater management systems applicable to Cape Cod*. Association to Preserve Cape Cod.
- Blanchard, D., 2010. *Supply Chain Management Best Practices*, John Wiley & Sons. New Jersey, 2<sup>nd</sup> edition.
- Chertow, M.R., 2004. Industrial symbiosis. *Encyclopedia of Energy*, 3, pp. 407-415.
- Domenech, T. & Davies, M., 2011. Structure and Morphology of Industrial Symbiosis Networks: the Case of Kalundborg,. *Procedia- Social and Behavioural Sciences*, 10, pp. 79 - 89.
- Fernández, J.R., Ruiz, M.C. & Romero, E., 2010. Propuesta metodológica preliminar para el desarrollo de proyectos de simbiosis industrial. *XIV International Congress on Engineering Projects*. Madrid 30 June - 2 July 2010.
- Graedel, T.E. & Allenby, B.R., 2003. *Industrial Ecology*, AT&T Pearson Education, Inc. New Jersey, USA, 2<sup>nd</sup> edition.
- INGEPRO, 2012. *Bases for the development of Industrial Symbiosis projects in the municipality of Torrelavega: Information Inventory and Preliminary Synergies Analysis of three large companies (Aspla, Bridgestone and Solvay)*, University of Cantabria.
- Massard, G. & Erkman, S., 2007. A regional industrial symbiosis methodology and its implementation in Geneva, Switzerland. *3<sup>rd</sup> International Conference on Life Cycle Management from Analysis to Implementation*. Zurich, Switzerland 27-29 August 2007.
- Mirian Vale Shire Council, 2007. *Engineering estimates and financial implication of pipeline and desalination options for Agnes water and 1770*. Burns Bridge Transactions.
- Outters M., 2006. *Recommendation guide for planning and management of industrial areas through Industrial Ecology*. ECOSIND [document available in Spanish]

- Parker, N., 2004. Using Natural Gas Transmission Pipeline Costs to Estimate Hydrogen Pipeline Costs. *Institute of Transportation Studies (UCD), UC Davis*.
- 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, pp. 947-965.
- Supply Chain Council, 2010. *Supply Chain Operations Reference (SCOR) Model. Overview, Version 10.0*, [Online] Available at: [www.supply-chain.org/scor](http://www.supply-chain.org/scor). [Accessed April 2013].
- Turton, R., Bailie, R.C., Whiting, W.B., Shaeiwitz, J.A. & Bhattacharyya, D., 2012. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. Pearson Education, USA.
- U.S. Army Corps Of Engineers, 2011. *Final Project Implementation Report And Environmental Impact Statement*, Edited by South Florida Water Jacksonville District Management District.
- Won, J., Kim, J., Lee, S. & Park, H., 2006. Industrial Symbiosis as an Integrated Business/Environment Management Process: The case of Ulsan Industrial Complex. *Strategic Technology 1<sup>st</sup> International Forum*, pp. 423-428.
- Wright, L.A., Kemp, S. & Williams, I., 2011, Carbon footprinting: Towards a universally accepted definition. *Carbon Management*, 2, pp. 61-72.



# Modelling and Simulation of an Industrial Symbiosis Network as a Supply Chain

Eduardo Bayona Blanco<sup>1</sup>, María del Carmen Ruiz Puente<sup>2</sup>

<sup>1</sup>INGEPRO Research Group, Department of Transport and Projects and Processes Technology. University of Cantabria, Spain  
[eduardo.bayona@alumnos.unican.es](mailto:eduardo.bayona@alumnos.unican.es)

<sup>2</sup>INGEPRO Research Group, Department of Transport and Projects and Processes Technology. University of Cantabria, Spain  
[ruizpm@unican.es](mailto:ruizpm@unican.es)

**Abstract** *Industrial symbiosis (IS) pursues the implementation of synergies among companies in terms of ensuring the coexistence of a benefit, not only environmental but also economic and social. An analogy between the concept of supply chain and industrial synergy is proposed in this work to model an Industrial Symbiosis network as a Supply Chain (ISSC). This project starts from 26 preliminarily identified synergies between large companies of the process and manufacturing industry, located in an industrial complex in northern Spain. An analysis and selection of the identified synergies is carried out by multicriteria methods that will return the case study of the synergy network as the prototype to model and simulate. The technical, economic and environmental feasibility of each synergy and the whole eco-industrial system was verified. According to the ISSC analogy, the resulting network model is implemented computationally with a supply chain-based software tool in order to simulate the behaviour of the network in certain experimental scenarios. In this work the scenario given by the reduction of the amount of swapped resource in each synergy is shown in order to demonstrate the operating conditions under which the network remains resilient.*

## 1. Introduction

The concept of Industrial Symbiosis (IS) is part of a new field of recent study called Industrial Ecology (IE). As described by Graedel & Allenby [1], IE "is a systemic vision which seeks to optimize the whole material cycle from their virgin extraction, through the finished material, the component, the final product, the product obsolescence and its final disposal ". On the basis of IE, IS incorporates many elements that emphasize the idea of completing cycles within an industrial process and the reuse of materials from a broad perspective of the system concept. IS

involves traditionally separated sectors given their different activities within a community approach, providing a competitive advantage through a physical exchange of materials, energy, water and/or sub products. The key of IS is on the collaboration and synergistic possibilities offered by geographic proximity of the entities involved [2]. IS term was coined in the small town of Kalundborg, Denmark, where spontaneously, had emerged a dense network of interactions between the entities that formed the town's industrial park [3]. There are cases like Ulsan [4], in which these networks were developed intentionally, that implements the theoretical IS knowledge and proves possible to achieve a more sustainable industrial activity while improving economic development at the same time.

A life cycle perspective ensures a broader approach that is not limited only to the processes that occur within an installation or plant, but will consider the full set of environmental impacts that occur in each stage of development, and the industrial use given to each of the materials involved.

The aim of this work is to design a methodology for modelling and assessing synergy networks in an industrial complex that might perform as supply chains. This research uses the context of a previous study developed in an industrial complex in Northern Spain [5, 6] where previous synergies were detected.

## **2. Theoretical Methods**

### **2.1. Industrial Symbiosis Synergies**

Industrial symbiosis (IS) proposes the implementation of synergies that advance in terms of sustainable development, so that should ensure the coexistence of a benefit, not only economic but also social and environmental. In previous experiences and networks design studies, the focus is primarily on savings and economic potential of the implementation of synergies. A life cycle approach yields environmental and economic information that is important to quantify in the new network design.

The nature of these innovative industrial networks is supported on the concept of "synergy". According to the Royal Academy of the Spanish Language, synergy means the improvement obtained through a partnership between two or more companies seeking a profit greater than that obtained individually. This association is favoured by geographical proximity between the members participating in the synergy.

The collaborative relationship between companies should be aimed at reducing environmental impacts by reducing natural resource consumption and waste generation. Moreover, this relationship should bring economic benefits or cost reductions that encourage the establishment of the relationship. From previous experiences and projects such as [7] or the one developed in Geneva [8], the previous collaboration opportunities are classified in three major groups.

Substitution synergy: The consumption of an inflow of a company is replaced by a residual output from another company, to produce a reduction of resources consumption and environmental impacts generation.

Mutualisation synergy: The integration of the whole infrastructure and services required for the system companies, which can be used together, reducing the demand for resources.

Genesis Synergy: The creation of new activities and relocation of the existing ones in the system given the existence of business opportunity. These advantages concerning the transfer of the production facility must compensate the costs and risks assumed by the company by changing its spatial location [9]. This third type implements both substitution and mutualisation synergies.

## **2.2. Supply chain and industrial synergy network analogy (ISSC)**

Fernández et al. [6] present in their work a system model surrounded to the industrial complex. In this paper we use the same system for the study of the methodology of IS networks design. We can find many similarities with the behaviour that shows a supply chain in any of the activities implicated in an industrial complex. These suggest an analogy between the two concepts that offers a new approach for analysing the methodologies and strategies within the IS.

Blanchard [10] defines supply chain as: "The sequence of events that cover the entire lifecycle of a product or service from conception until it is consumed". Within this broad definition, there is a wide range of models of supply chain. The Supply Chain Operations References or SCOR model (Figure 1), which was approved by the Supply Chain Council (SCC), has been developed by the consulting firm PRTM and has become a reference for the management of the supply chain. It is a model that covers from the supplier's supplier to customer's customer [11].

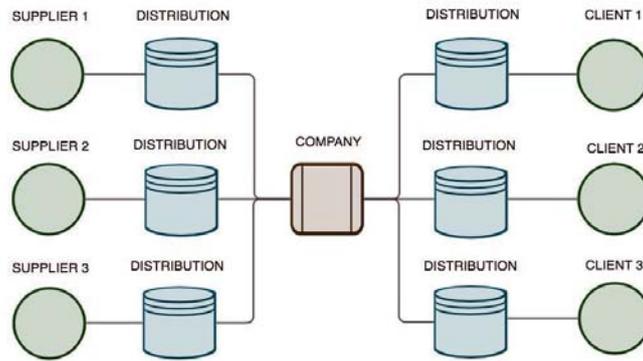


Figure 1. SCOR model [11].

The model designed to define an industrial synergy also maintains the analogy with the SCOR model proposed by the SCC. In this paper, the supply chain model is simplified to a subset of the initial SCOR model (Figure 1). This model includes from the supplier company to delivery to the customer or destination, omitting any event beyond such limits thereby adjusting the boundaries of the system under study.

Given the analogy between the concepts of supply chain and IS network, it can be designed a theoretical model of industrial synergy that represents the wide variety of them that can occur in a network given the three types considered in this work (ISSC). Model structure may include any possible case so that all of them are represented by a single idea that suits each case as necessary (Figure 2).

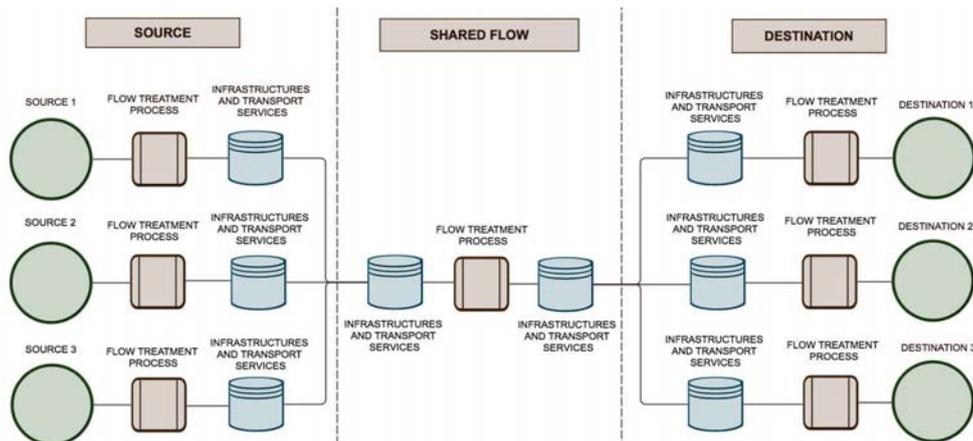


Figure 2. Industrial Symbiosis Supply Chain (ISSC) model.

The elements or entities in both models also maintain a direct analogy in concept. The 'Origin' entity in the ISSC synergy model maintains a direct relationship with the supply chain provider or supplier concept. In both cases these entities provide a flow of resources or products that will be further processed or directly distributed to their respective destinations. The 'Destination' entity considered in the ISSC model corresponds to the client or receiver of the finished products in the supply chain SCOR model. These entities act as sinks of the final product. They are where the flux ends. The production work in a supply chain maintains a direct analogy with the processes used for the adaptation of a flow in an industrial synergy ('Flow treatment process' in the ISSC). They can be a series of successive processes to achieve the desired product nature. Finally the distribution labour, not only of the finished product to the customer, but also of any flow movement along the supply chain, have their equivalence in concept with transport infrastructures and services that are represented in the ISSC synergy model. The flexibility of the model enables to omit some elements that even may not be necessary and are omitted when working with the model.

### **3. Methodology for network analysis**

#### **3.1. Preliminary selection of synergies**

The work developed by INGEPRO in 2012, identifies 19 potential synergies to be applied in the studied industrial system by comparing the input and output flows of each of the companies, finding the possible internal relationships between them [5]. Based on this 19 preliminary synergies, a selection task of the synergies that will form the symbiosis network is performed. The selection uses linear weighting (scoring) to prioritise the synergies according to the following criteria: supply capacity, availability of technology, flow purity, infrastructure, facilities and services needed, forecasting of technological and industrial investment, coefficient of specific weight of exchanged flow over the total production ( $CSW_j$ ). These criteria are designed to select the synergies whose implementation is simpler and faster in order to facilitate the creation of a primary synergy network open to expansion. The six criteria are summarized in the literature [17].

The weighting of the criteria is identical in all cases (1 point), using a priority selection scale for each of the four categories for each criterion, being 0.25 the case that less meets each criterion and 1 for each case that best meets your

specifications. The chosen synergies will be those with the highest score from the ones selected in previous studies. The score will be calculated by equation 1:

$$S_j = \sum_i w_j r_{ij} \quad (1)$$

Where S is the final score of each synergy, w the weighting of each criterion that in this case is 1 for all of them, and r the score of each of the categories set for each criterion.

The 19 preliminary synergies detected on INGEPRO's previous study are evaluated based on the selective criteria. This assessment enables to prioritize the most relevant for next evaluations. Once the rating of each synergy is done, the technical feasibility of the selected synergies is evaluated. The ones with a scoring over a predefined limit will be the ones selected for this evaluation [5].

### **3.2. Economical feasibility of the synergies network**

The evaluation of the economic feasibility of implementing each synergy individually and as a whole network should be supported on the estimation with an order of magnitude definition of the capital, operating and maintenance costs in each case, calculating the savings that will suppose the new synergy management.

In order to estimate the costs associated with the implementation of a synergy, two distinct parts to its calculation are proposed: a part of processing or treatment of the synergy flow and another part of transportation of the flow between each of the entities involved. In the first part, the Module Costing Technique, which was developed by Turton et al. [12] and based on previous works, is used. The equipment module costing technique is a common technique to estimate the cost of a new plant. It is generally accepted as the best for marking preliminary cost estimates. From this method, both the capital costs and the costs of operation and maintenance of the new facilities are obtained. In the second part, the transport cost estimation has been considered for both types of flow, fluid and solid. For the transport of fluids in pipes, the calculation is simplified for piping and pumping stations [13,14]. In the solid transport case, the cost is estimated for road transport, basing this calculation on the prices offered by the software ACOTRAM (data of 2008), which is a transportation costing software offered by the Ministry of Public Works and Transport of the Government of Spain. In case of occurrence of the generation of a new activity associated, not contemplated in the module costing

technique, the costs of this activity should be estimated in a specific way based on the Barnstable County Wastewater Cost Task Force estimation of costs [15].

As a result of this economical analysis, those synergies which does not fulfil the profitability requirements are discarded from the methodology. The ones proved to be economically viable continue being analysed in order to study their environmental impact.

### 3.3. Environmental feasibility of the synergies network

The objective of this analysis is to compare the environmental impact of the selected synergies that has been tested economically viable. For this purpose a life cycle analysis of the operation with the implementation of synergy case is carried out and compared with a life cycle analysis of the base scenario in which the synergy is not implemented. The carbon footprint is used as an indicator to compare both scenarios. Wright et al. [16] have suggested a practicable definition: "*A measure of the total amount of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and methane (CH<sub>4</sub>) emissions of a defined population, system or activity, considering all relevant sources, sinks and storage within the spatial and temporal boundary of the population, system or activity of interest. Calculated as carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>e) using the relevant 100-year global warming potential (GWP100)*". Based on this indicator, any synergy would be environmentally feasible when the carbon footprint of the new flow management after the synergy implantation is reasonably lower than the one left by the previous management.

### 3.4 Initial synergy network

Finally, after passing the whole analysis, those synergies that guarantee their sustainability formed the preliminary IS synergy network to be implemented in first place. Presenting the results of the analysis in detail is not the subject of this work, and the methodology is described in the literature [17]. Table 1 represents the 3 selected synergies to integrate the synergy network.

<b>CODE</b>	<b>SYNERGY</b>	<b>TYPE</b>
MM1	Common supplier of auxiliary material	Mutualisation
MM3	Shared management of hazardous waste	Mutualisation
MM4	Shared management of non-hazardous waste	Mutualisation

Table 1. Synergies selected after the economic and environmental analysis.

These synergies will form the new industrial symbiosis synergies network as shown in Figure 4.

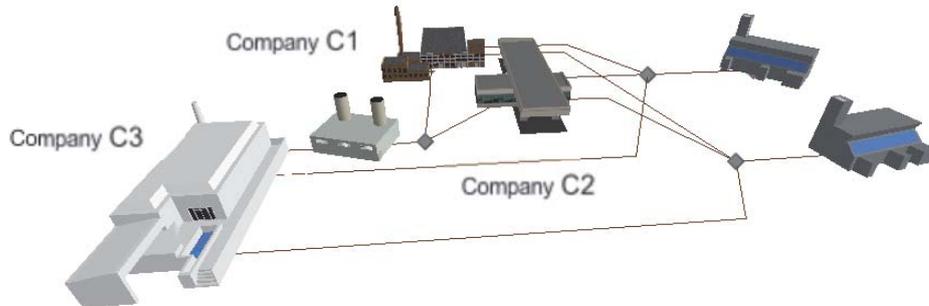


Figure 4. Initial case after the implementation of the synergy network

#### 4. Computational modelling

The analysis and behaviour of a IS network at supply chain events can be a very complex process that requires computational modelling. The ISSC analogy directly relates the entities of the industrial synergy model with a supply chain, so to make the use of industrial processes and supply chain simulation tools possible, it is necessary to guarantee that the input variables and the variables used to quantify the performance of both models are equivalent.

The simulations are performed in the intelligent object-programming environment SIMIO. Each of the entities involved in the ISSC synergy model has its direct equivalence according to the entities of a supply chain. SIMIO uses generic intelligent objects that correspond to entities in a supply chain. These objects can be defined to adapt to the characteristics of the network to be simulated. Through the network model simulation it can be quantified its variability and performance in order to analyse its resilience to perturbation. If both input (e.g. production amount, transport distance, etc.) and output (e.g. operating costs) variables used to simulate the industrial symbiosis network are equivalent to those used for a supply chain it will be proved that the behaviour of an industrial symbiosis network is analogous to a sustainable supply chain.

##### 4.1 Variables to analyse the performance of a supply chain

In order to study the largest number of performance measures available, the researchers have divided them into categories. Neely et al. [18] present some of these categories in their literature, including: quality, time, flexibility, and cost.

Although there are a large number of categories, two measures of performance used in the vast majority of supply chain models predominate [19]. These are costs and customer service.

Costs correspond both to the capital costs and inventory investment and the operating costs of the company. In turn, the customer service variables include time for goods transport, possible failures in service due to lack of stock, and the customer supply capacity (production). In this work it will be consider as analysis variables two of the variables exposed by Beamon [19]: operating costs and reduction of customer supply capacity.

## **5. Resilience in synergy networks**

## **6. Results and Discussion**

Operating costs are used as the output variable in the simulation to study the response of the system to a reduction of the amount of swapped product scenario. Therefore, the input variable in the simulation is the reduction of the synergy exchanged products. Each scenario is considered for each of the synergies individually. The results for each company and the network as a unit are compared in order to find the resilience of the system. The input data used to characterize the initial case operating costs are the results of the economical analysis of each of the synergies done in the literature [17]

The scenario contemplated in this work is the reduction of amount of products supplied in each synergy. This situation will influence on the allocation of costs and profitability at the network. Considering the response of the network to the simulation and the evolution of its operating costs, it may be concluded resilience of the network to the disturbance scenario. The results of the simulation for synergies MM1, MM3 and MM4 are shown in figures 5, 6 and 7 respectively. The nomenclature of the figures includes each of the cases studied during the analysis of the initial system and the IS network. R represents the initial case of the system without the implementation of the synergy network.  $IS_i$  represents the industrial symbiosis network being  $i$  each of the simulated scenarios.  $C_{j,i}$  represents the companies of the system being  $j$  the number of each company.

As production declines, the savings produced by the implantation of MM1 synergy are reduced without getting to be null (Figure 5). Therefore the latitude of the network will be lower as the reduction of the product supply increases. The

resistance keeps low and constant along the experiment, keeping the costs the same slope for the entire simulation scenario. It can be concluded that for MM1 synergy the network has a good resilient response to reductions in production enterprises.

The operating costs of MM3 synergy descend as production becomes smaller, until it becomes zero for null production output case (Figure 6). Both latitude and resistance of the network keep constant till the 80% of the production reduction. At that point both fall to zero, reducing substantially the range between costs and raising the slope of the graph. Hence, the network will be resilient during the simulation until the product supply is reduced a 70%. At that moment the resilience of the network drops significantly.

The decrease in production, also reduces the savings caused by the implementation of MM4 synergy, reaching a critical point of profitability at the 74% of reduced production both for each of the companies and for the whole system (Figure 7). Network will not be resilient to drops of production larger than the 74% by the system companies since that situation has null latitude. For lower reductions of the production than 74% the latitude is low although it keeps almost constant along the simulation. Resistance is also low, as the slope for the graph of the simulation scenario ( $IS_{1,2}$ ) is small and remains constant. This leads to the conclusion that the network is resilient for reductions lower than 74% although it is reduced as the network approaches the critical point of profitability.

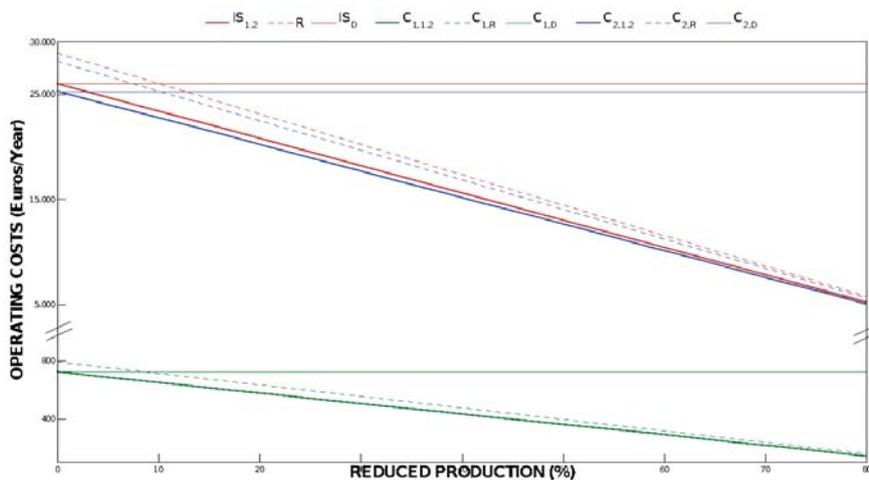


Figure 5. MM1 synergy simulation result

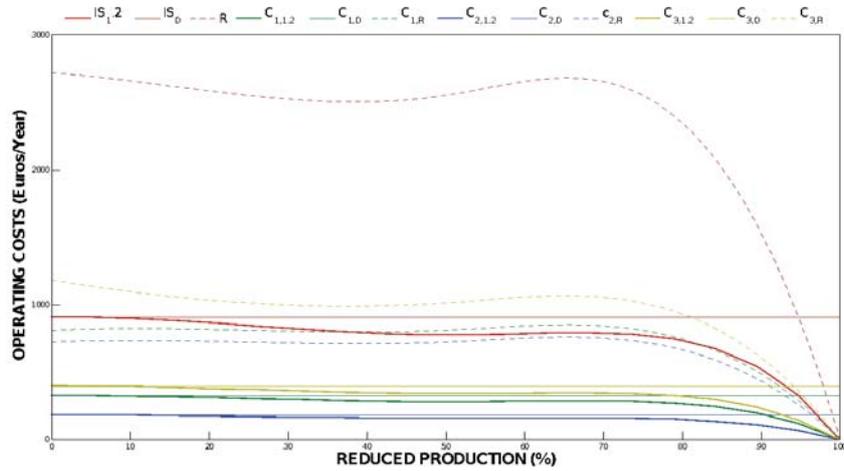


Figure 6. MM3 synergy simulation result

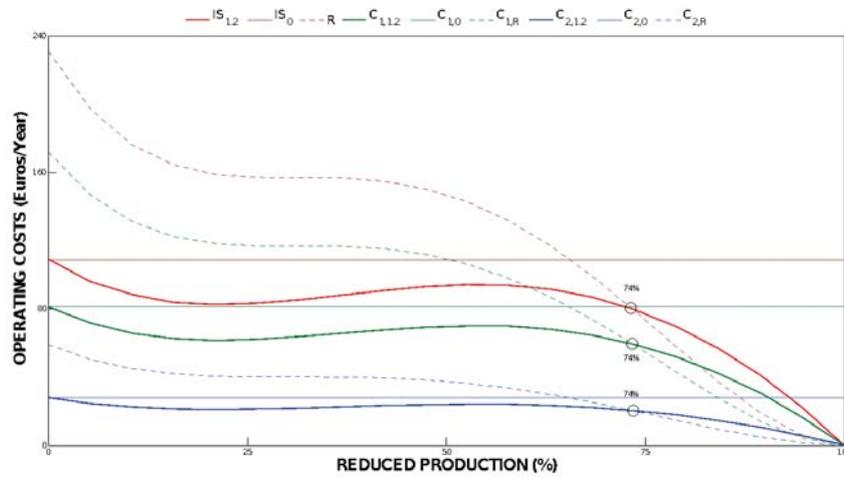


Figure 7. MM4 synergy simulation result

Based on these results, work guidelines on how to make the network resilient to potential disruptions can be obtained. Although the results are based on simulations, tendencies on the performance of the synergy network can be inferred. This can help to achieve better policies for the design and organization of the system network, such as the optimal amount of exchanged flow between companies.

## 6. Conclusion

Based on the prior identification of synergies in an industrial complex, a methodology to prioritize a set of them and select those technically feasible is defined so as to simulate under supply chain conditions. For this purpose a working model for an industrial synergy has been designed based on the analogy of the supply chain model. As an ultimate goal of this work, a synergy network should be projected following the proposed method and simulated by a computing tool in order to study the response of the network under different scenarios.

Based on the results of the simulated scenarios (in this case the exchanged resource drop), it could be found a feasible IS network against possible events during operation. Figures shown support the conclusion that the designed network would be resilient to reductions in production below 74%.

## References

- [1] Graedel, T.E. & Allenby, B.R.: Industrial Ecology, AT&T Pearson Education, Inc. New Jersey, USA, 2nd edition. (2003).
- [2] Chertow, M.R.: Industrial symbiosis. Encyclopedia of Energy, 3, p. 407-415. (2004).
- [3] Domenech, T. & Davies, M.: Structure and Morphology of Industrial Symbiosis Networks: the Case of Kalundborg,. Procedia, Social and Behavioural Sciences, 10, 79 - 89. (2011).
- [4] Won, J., Kim, J., Lee, S. & Park, H.: Industrial Symbiosis as an Integrated Business/Environment Management Process: The case of Ulsan Industrial Complex. Strategic Technology 1st International Forum, pp. 423-428. (2006).
- [5] INGEPRO: Bases for the development of Industrial Symbiosis projects in the municipality of Torrelavega: Information Inventory and Preliminary Synergies Analysis of three large companies, University of Cantabria. (2012).
- [6] Fernández, J.R., Ruiz, M.C. & Romero, E.: Propuesta metodológica preliminar para el desarrollo de proyectos de simbiosis industrial. XIV International Congress on Engineering Projects. Madrid 30 June - 2 July (2010).
- [7] Outters M.: Recommendation guide for planning and management of industrial areas through Industrial Ecology. ECOSIND. (2006). [document available in Spanish]
- [8] Massard, G. & Erkman, S.: A regional industrial symbiosis methodology and its implementation in Geneva, Switzerland. 3rd International Conference on Life Cycle Management from Analysis to Implementation. Zurich, Switzerland (2007).

- [9] Sterr, T. & Ott, T.: 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, p. 947-965. (2004).
- [10] Blanchard, D.: *Supply Chain Management Best Practices*, John Wiley & Sons. New Jersey, 2nd edition, (2010).
- [11] Supply Chain Council: *Supply Chain Operations Reference (SCOR) Model. Overview, Version 10.0*, [Online] Available at: [www.supply-chain.org/scor](http://www.supply-chain.org/scor). (2010). [Accessed: April 2013].
- [12] Turton, R., Bailie, R.C., Whiting, W.B., Shaeiwitz, J.A. & Bhattacharyya, D.: *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes*. Pearson Education, USA. (2012).
- [13] Parker, N.: *Using Natural Gas Transmission Pipeline Costs to Estimate Hydrogen Pipeline Costs*. Institute of Transportation Studies (UCD), UC Davis. (2004).
- [14] U.S. Army Corps Of Engineers: *Final Project Implementation Report And Environmental Impact Statement*, Edited by South Florida Water Jacksonville District Management District. (2011).
- [15] Barnstable County Wastewater Cost Task Force: *Comparison of costs for wastewater management systems applicable to Cape Cod*. Association to Preserve Cape Cod. (2010).
- [16] Wright, L.A., Kemp, S. & Williams, I.: Carbon footprinting: Towards a universally accepted definition. *Carbon Management*, 2, pp. 61-72. (2011).
- [17] Bayona, E., Ruiz, M.C., Romero, E., Álvarez, R.: Design of synergy network of industrial symbiosis between large companies of an industrial Complex. *International Conference on Resource Efficiency in Interorganizational Networks (ResEff 2013)*, 1, pp. 285-296. (2013).
- [18] Neely, A., Gregory, M. & Platts. K.: Performance measurement design. *International Journal of Operations and Production Management*, (1995).
- [19] Beamon B.M.: Measuring supply chain performance. *International Journal of Operations and Production Management*, 19:275–292, (2014).
- [20] Zhu, J., Ruth, M., Exploring the resilience of industrial ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 122, 65-75, (2013).
- [21] Christopher, M., Peck, H., Building the resilient supply chain. *The International Journal of Logistics Management*, 15, 1-14, (2004).
- [22] Walker, B., Holling, C.S., Carpenter, S.R., Kinzig, A., Resilience, adaptability and transformability in social-ecological systems. *Ecology and Society* 9, 5, (2004).



## **Industrial Symbiosis Network Modeling and Simulation Analogous to a Supply Chain**

Industrial symbiosis (IS) pursues the implementation of synergies among companies in terms of ensuring the coexistence of a benefit, not only environmental but also economic and social. An analogy between the concept of supply chain and industrial synergy is proposed in this work to model an Industrial Symbiosis network as a Supply Chain (ISSC). This project starts from 26 preliminarily identified synergies between large companies of the process and manufacturing industry, located in an industrial complex in northern Spain. An analysis and selection of the identified synergies is carried out by multicriteria methods that will return the case study of the synergy network as the prototype to model and simulate. The technical, economic and environmental feasibility of each synergy and the whole eco-industrial system was verified. According to the ISSC analogy, the resulting network model is implemented computationally with a supply chain-based software tool in order to simulate the behaviour of the network in certain experimental scenarios. In this work four scenarios are considered for simulation: the lack of supply of the source companies, the reduction of the amount of swapped resource in each synergy, the change of the transport capacity and distance from the system, and the increase of the operating costs of the companies. The results of these experiments are analysed in order to demonstrate the operating conditions under which the network remains resilient.

### References

Graedel, T.E, Allenby B.R, 2003. *Industrial Ecology, Upper Saddle River: Prentice Hall*, New Jersey.

Domenech, T. and Davies, M., 2011. The Role of Embeddedness in Industrial Symbiosis Networks: Phases in the Evolution of Industrial Symbiosis Networks. *Business Strategy and the Environment*, 20(5), pp. 281-296.

Zhaohua W., Bin Z. and Guilong L., 2010. Research on industrial symbiosis patterns in Eco-industrial Park based on Industrial Ecology theory, *Computer Application and System Modeling (ICCASM), 2010 International Conference on 2010*, pp. V7-669-V7-672.