



“POP en ingeniería eléctrica y energética”

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN:  
ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA**

Curso académico 2010-2011

Trabajo final de Máster:

**Aplicación de la Termoeconomía a la Ecología Industrial en  
Kalundborg**

*Director:*

***Sergio Usón Gil***

*Autor:*

***Jorge Costa Sorolla***

*Codirector:*

***Alicia Valero Delgado***

Septiembre de 2011



**Escuela de  
Ingeniería y Arquitectura  
Universidad Zaragoza**



**RESUMEN**

La motivación del presente trabajo es aplicar la Termoeconomía a la Ecología industrial, y en consecuencia, se establece como objetivo principal: la aplicación de un análisis termoeconómico sobre el modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg. De este modo y como iniciativa pionera, se podrá cuantificar mediante una metodología termoeconómica el ahorro obtenido en el ecoparque industrial que mayor reconocimiento goza en el ámbito de la Ecología Industrial.

La estructura que se ha seguido en el desarrollo del trabajo se divide en tres partes, las cuales se incluyen en tres anexos bien diferenciados.

En primer lugar, fruto de una extensa y laboriosa búsqueda bibliográfica, se expone una detallada descripción cualitativa y cuantitativa sobre el modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg, atendiendo a los participantes, flujos y beneficios que lo caracterizan.

En segundo lugar, se define un caso de estudio basado en el modelo de Simbiosis Industrial descrito en la primera parte del trabajo. A partir del caso de estudio definido, se elabora un modelo termodinámico que permite caracterizarlo en términos de exergía mediante el correspondiente análisis exergético.

Por último, se aplica el análisis termoeconómico al caso de estudio caracterizado en la segunda parte del trabajo obteniéndose los resultados deseados.

En cuanto a los resultados obtenidos, permiten asignar precios justos a los flujos de las integraciones y demuestran en términos termoeconómicos el ahorro sustancial de recursos que supone el modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg, aportando una razón de peso para justificar la integración de procesos en la toma de decisiones para futuros ecoparques industriales.



## ÍNDICE

### MEMORIA

<b>1. Introducción</b> .....	<b>4</b>
1.1 Objeto.....	5
1.2 Alcance.....	5
1.3 Metodología.....	5
<b>2. Ecología Industrial</b> .....	<b>5</b>
<b>3. Termoeconomía</b> .....	<b>6</b>
<b>4. Aplicación de la Termoeconomía a la Ecología Industrial</b> .....	<b>8</b>
<b>5. Modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg</b> .....	<b>8</b>
5.1 Integrantes .....	9
5.2 Flujos.....	11
5.3 Beneficios ambientales.....	14
<b>6. Caso de estudio</b> .....	<b>15</b>
<b>7. Análisis termoeconómico</b> .....	<b>19</b>
7.1 Estructura productiva.....	19
7.2 Coste exergético.....	20
7.3 Impacto en fuel.....	22
<b>8. Conclusiones</b> .....	<b>25</b>
8.1 Síntesis.....	25
8.2 Aportaciones.....	26
8.3 Perspectivas .....	26
<b>9. Bibliografía</b> .....	<b>26</b>

### ANEXO 1: SIMBIOSIS INDUSTRIAL EN KALUNDBORG

<b>1. Introducción</b> .....	<b>32</b>
<b>2. Ecología Industrial</b> .....	<b>32</b>
2.1 Antecedentes.....	32
2.2 Concepto .....	33
2.3 Ecoparque industrial .....	37

<b>3. Modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg .....</b>	<b>39</b>
3.1 Antecedentes.....	39
3.2 Concepto de Simbiosis Industrial.....	40
3.3 Integrantes .....	41
3.4 Desarrollo cronológico .....	49
3.5 Flujos.....	54

## **ANEXO 2: DEFINICIÓN Y ANÁLISIS EXERGÉTICO DEL CASO DE ESTUDIO**

<b>1. Introducción.....</b>	<b>67</b>
<b>2. Planteamiento .....</b>	<b>67</b>
<b>3. Caso base.....</b>	<b>68</b>
3.1 Estructura física.....	68
3.2 Modelo termodinámico .....	70
3.3 Resultados anuales .....	83
<b>4. Caso alternativo.....</b>	<b>85</b>
4.1 Estructura física.....	85
4.2 Modelo termodinámico .....	86
4.3 Resultados anuales .....	91

## **ANEXO 3: ANÁLISIS TERMOECONÓMICO**

<b>1. Introducción.....</b>	<b>93</b>
<b>2. Termoeconomía.....</b>	<b>93</b>
2.1 Antecedentes.....	93
2.2 Fundamentos.....	93
<b>3. Diagnóstico termoeconómico.....</b>	<b>99</b>
3.1 Antecedentes.....	99
3.2 Fundamentos.....	100
<b>4. Análisis termoeconómico aplicado al modelo de Simbiosis Industrial.....</b>	<b>107</b>
4.1 Estructura productiva.....	107
4.2 Modelo fuel-producto .....	110

4.3	Coste exergético.....	113
4.4	Malfunción, disfunción e irreversibilidad.....	115
4.5	Impacto en fuel .....	119

## 1. Introducción

Estamos asistiendo a una gran crisis medioambiental, resultado de la actividad industrial y de la explosión demográfica a partir de la Revolución Industrial. Además, desde el punto de vista del consumo de recursos, el actual modelo de desarrollo no es sostenible.

Con el desarrollo de la ciencia y la tecnología es posible que se aplacen los problemas medioambientales, aunque para solventar la insostenibilidad del modelo actual hay que romper con el fetiche del crecimiento y corregir el uso que se le está dando al mundo natural. Para ello, la economía debe partir de la realidad física, y así poder conocer lo mejor posible los límites naturales. Cada vez hay más autores que defienden esta visión multidisciplinar, denominada Economía Ecológica. Entre las nuevas propuestas de pensamiento de la Economía Ecológica, cabe destacar la Termoeconomía, que busca unificar la física con la economía para establecer los costes físicos del uso de los recursos naturales, incorporando en su valoración monetaria los costes por degradación.

Si nos centramos en la industria, motor del desarrollo económico actual, un factor primordial de la actual crisis medioambiental ha sido organizar los sistemas de producción de modo lineal, lo cual maximiza el consumo de recursos y la producción de residuos respecto a la organización en ciclos cerrados, donde los materiales y la energía puedan reutilizarse de modo que el residuo de un proceso constituya un recurso para otro proceso.

Como modelo alternativo y sostenible al desarrollo industrial tradicional surgió a finales del siglo XX el innovador concepto de la Ecología Industrial. Puede parecer a primera vista que “ecología” e “industria” son términos contradictorios, ya que suele asociarse la contaminación con la industria. Sin embargo, la Ecología Industrial parte de la premisa de que no es necesario inventar un mundo sostenible, puesto que ya existe y está a nuestro alrededor. En consecuencia, la Ecología Industrial plantea una analogía directa entre los sistemas naturales y las actividades industriales, de modo que los diseños biológicos de la naturaleza sean emulados como modelos de comportamiento para la sostenibilidad.

Definitivamente, ante la existencia de un mundo finito donde cada generación impone límites a la siguiente, la Termoeconomía y la Ecología Industrial constituyen dos herramientas para acercarnos a la sostenibilidad en el sistema económico y en la industria, que pueden asegurar las posibilidades de las generaciones futuras.

En este contexto, el presente trabajo se basa en la idea pionera de aplicar la Termoeconomía a la Ecología Industrial y su interés fundamental reside en que, por primera vez, se emplea la Termoeconomía como herramienta de análisis en un ecoparque industrial, y concretamente, en el modelo de Simbiosis Industrial de



Kalundborg, el cual es reconocido por la comunidad científica internacional como un referente en la aplicación de la Ecología Industrial.

### **1.1 Objeto**

La motivación para la elaboración del presente trabajo es aplicar la Termoeconomía a la Ecología Industrial, y concretamente a un caso real. En consecuencia, se establece como objetivo principal la realización de un análisis termoeconómico sobre el modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg que permita cuantificar los ahorros obtenidos.

### **1.2 Alcance**

El alcance del trabajo viene limitado por la información disponible sobre el modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg. Debido a su continua evolución y expansión, el ecoparque industrial ha alcanzado tal grado de madurez que hace que la realización de un análisis termoeconómico completo del mismo sea excesivamente complejo de abordar, e incluso imposible sin contar con la colaboración de los actores principales, que son los que pueden aportar la información necesaria. Por consiguiente, considerando los principales flujos intercambiados se ha optado definir un caso de estudio simplificado, aunque riguroso y representativo, del modelo de Simbiosis Industrial para poder llevar a cabo el análisis termoeconómico.

### **1.3 Metodología**

La metodología seguida para la realización del trabajo se divide en las siguientes fases:

- 1º Búsqueda bibliográfica.
- 2º Análisis de los flujos de materiales y energía.
- 3º Definición del caso de estudio.
- 4º Cálculo exergético mediante el software *EES*.
- 5º Análisis termoeconómico mediante el software *TAESS*.
- 6º Resultados
- 7º Conclusiones.

## **2. Ecología Industrial**

Desde finales del siglo XX se abre paso el innovador concepto de la Ecología Industrial. Tradicionalmente se ha considerado que la fabricación comienza cuando las materias primas entran en el proceso de producción y termina con la expedición del producto acabado. La Ecología Industrial va más lejos, considera las fuentes de abastecimiento de materias primas, los efectos de su extracción y el destino final del producto una vez agotada su vida útil, entre otros aspectos.

En la bibliografía se establece que el momento preciso de aparición de la Ecología Industrial fue la publicación del artículo *Strategies for manufacturing* (Frosch y Gallopoulos, 1989). Dicho artículo despertó un gran interés entre los ingenieros preocupados por la degradación del medioambiente y frustrados por el carácter errático de las políticas adoptadas para remediarlo.

La Ecología Industrial gira en torno a la idea introducida por Frosch y Gallopoulos de plantear una analogía directa entre la industria y los sistemas naturales. Al igual que en un ecosistema biológico, en un ecosistema industrial cada proceso debe ser visto como una parte dependiente e interrelacionada de un todo o un sistema mayor. De este modo, la Ecología Industrial explora nuevas posibilidades de integración entre empresas como resultado de una reestructuración de las actividades industriales convencionales; y en respuesta al conocimiento cada vez más completo sobre sus impactos ambientales.

En los ecosistemas naturales se pueden identificar cadenas alimenticias formadas por productores y consumidores quienes, gracias a un metabolismo equilibrado, permiten que los ecosistemas perduren en el tiempo. Trasladar esta idea al sistema industrial permite maximizar la eficiencia de los procesos, logrando que los residuos puedan ser reutilizados y generando un encadenamiento productivo.

En el sistema planteado por la Ecología Industrial, denominado “ecosistema industrial”, se busca la interacción entre cuatro grandes grupos de actores diferentes: los que extraen las materias primas a partir de los recursos naturales, las empresas de fabricación, las empresas relacionadas con las actividades de reciclaje de residuos y los consumidores finales.

Puesto que los agentes industriales se organizan generalmente en polígonos industriales, surge también el concepto de ecoparque industrial, definido como una comunidad de empresas que cooperan entre sí, compartiendo sus recursos (información, materiales, residuos, recursos humanos, energía, etc.) para alcanzar un beneficio económico y social. A su vez, se reducen los impactos sobre el medioambiente, se obtiene una mayor competitividad y un menor consumo de recursos.

En el anexo 1 se describe la Ecología Industrial con mayor detalle.

### **3. Termoeconomía**

La Termoeconomía puede definirse como una teoría general de ahorro de energía que conecta la física con la economía mediante la segunda ley de la Termodinámica (Valero y Torres, 2005).

Se centra en los mecanismos de degradación de la calidad de la energía, los cuales se traducen en conceptos tales como coste, consumo unitario, malfunción, disfunción, impacto en fuel, etc.

Según Valero y Torres (2005), la Termoeconomía proporciona métodos para:

- Evaluar la cantidad y calidad de las pérdidas energéticas.
- Evaluar el coste de las pérdidas en términos de consumo de recursos.
- Aplicar a diferentes niveles de decisión sobre sistemas energéticos.

Sus aplicaciones principales son las siguientes (Valero y Torres, 2005):

- Asignación de precios a productos en base a criterios físicos.
- Optimización de variables específicas de procesos para minimizar el coste de producción.
- Detectar ineficiencias y calcular sus efectos económicos.
- Evaluación de varias alternativas de diseño u operación.
- Sintetizar e integrar procesos.

El análisis termoeconómico permite aplicar las herramientas de la Termoeconomía al diagnóstico y a la optimización de sistemas energéticos complejos. Sin embargo, el diagnóstico termoeconómico es probablemente la aplicación más desarrollada.

Diagnóstico es el arte de descubrir y entender los signos de malfunción y cuantificar sus efectos. En el caso de la Termoeconomía, el efecto de dicha malfunción se cuantifica en términos de consumo adicional de recursos para mantener la producción, en calidad y cantidad (Uche, 2000).

Por consiguiente, el diagnóstico termoeconómico de la operación de sistemas energéticos complejos se aplica para diagnosticar las causas del consumo adicional de fuel de una planta en operación debido a las ineficiencias de sus componentes.

Los objetivos del diagnóstico termoeconómico son los siguientes (Valero y Torres, 2005):

- Identificar las malfunciones de cada componente de un sistema térmico.
- Evaluar sus efectos sobre la eficiencia global de la planta.
- Determinar dónde, cómo y qué cantidad de recursos consumidos pueden ser ahorrados.

La metodología a seguir es:

1. Modelo físico de la planta.
2. Modelo fuel-producto.
3. Determinación de consumos exergéticos unitarios.

4. Cálculo de costes exergéticos unitarios.
5. Determinación de las malfunciones.
6. Cálculo de las disfunciones.
7. Cálculo del coste de las malfunciones.
8. Determinación del impacto en fuel.

En el anexo 3 se presentan los fundamentos de la Termoeconomía y del diagnóstico termoeconómico.

#### **4. Aplicación de la Termoeconomía a la Ecología Industrial**

Definido el objeto del presente trabajo y una vez introducida la Ecología Industrial y la Termoeconomía surge la siguiente cuestión: ¿por qué aplicar la Termoeconomía a la Ecología Industrial? La respuesta parte de la base de que la integración de procesos industriales mediante intercambios mutuos de recursos, productos y residuos implica, entre otros beneficios, ahorros energéticos. Y el modo más objetivo para cuantificar dichos ahorros es mediante las leyes de la termodinámica (Valero et al, 2010).

Es decir, se trata de tener en consideración no sólo la primera ley de la termodinámica, la cual indica que la energía se conserva transformándose de una forma a otra, sino también la segunda ley de la termodinámica, que reconoce la existencia de formas de energía más útiles y menos degradadas que otras. Por tanto, la combinación de ambas leyes indica que no es una cuestión de cantidad de energía ahorrada, sino de la calidad de esa energía, es decir, de su contenido exergético.

El presente trabajo trata de aplicar las metodologías que la Termoeconomía actualmente está aplicando al análisis, optimización y diagnóstico de sistemas energéticos, tales como centrales térmicas, a la Ecología Industrial, y concretamente al complejo modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg. El análisis termoeconómico puede ayudar a resolver problemas importantes tales como, identificar posibles integraciones, mejorar la eficiencia, cuantificar los beneficios obtenidos por la integración o determinar los precios en base a criterios físicos (Valero et al, 2010).

Conviene destacar que el presente trabajo es pionero en la utilización de la Termoeconomía como herramienta de análisis en ecoparques industriales. Por tanto, se puede afirmar que la Ecología Industrial representa un campo de aplicación emergente para el análisis termoeconómico.

#### **5. Modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg**

El ejemplo práctico más reconocido mundialmente en el ámbito de la Ecología Industrial es el de la ciudad danesa de Kalundborg, en el cual se acuñó la palabra de Simbiosis Industrial. Constituye la primera referencia de creación de una red de

intercambios entre diversas industrias localizadas en un área común y su éxito ha generado un aumento del apoyo institucional para la implantación de esta estrategia en otros lugares.

La experiencia empezó cuando unas pocas empresas trataron de minimizar el consumo de agua subterránea empleando agua de un lago cercano. A raíz de ello, con el tiempo se ha establecido una compleja red de intercambios cooperativos en tres áreas: agua, energía y subproductos, adoptando también la denominación de ecoparque o ecosistema industrial.

En el anexo 1 se describe en profundidad el modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg.

### 5.1 Integrantes

Actualmente, el modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg está constituido por cinco participantes principales más otros diez participantes secundarios:

Nº	Participante	Actividad
1	<i>Asnaes</i>	Central térmica de carbón con cogeneración
2	<i>Statoil</i>	Refinería de petróleo
3	<i>Novo Group</i>	Compañía farmacéutica y de biotecnología
4	<i>Gyproc</i>	Fabricación de placas de yeso
5	Municipio de Kalundborg	Sistema de calefacción central
6	<i>Kara/Noveren</i>	Tratamiento de residuos
7	<i>RGS 90</i>	Tratamiento de tierras contaminadas
8	<i>Inbicon</i>	Fabricación de bioetanol
9	<i>Nordisk Aluminat</i>	Fabricación de aluminatos
10	<i>Aalborg Portland</i>	Fabricación de cemento y otros pavimentos
11	<i>Aluscan</i>	Anodizado y cromado de metales
12	Piscifactoría	Producción de salmón y trucha de mar
13	Planta de fertilizantes	Fabricación de sulfatos
14	Explotaciones ganaderas	Granjas de cerdos
15	Explotaciones agrícolas	Cultivo de trigo y otras plantas

Tabla 1 – Participantes de la Simbiosis Industrial de Kalundborg (Elaboración propia)

En la siguiente figura se muestra un plano aéreo del área industrial de Kalundborg:

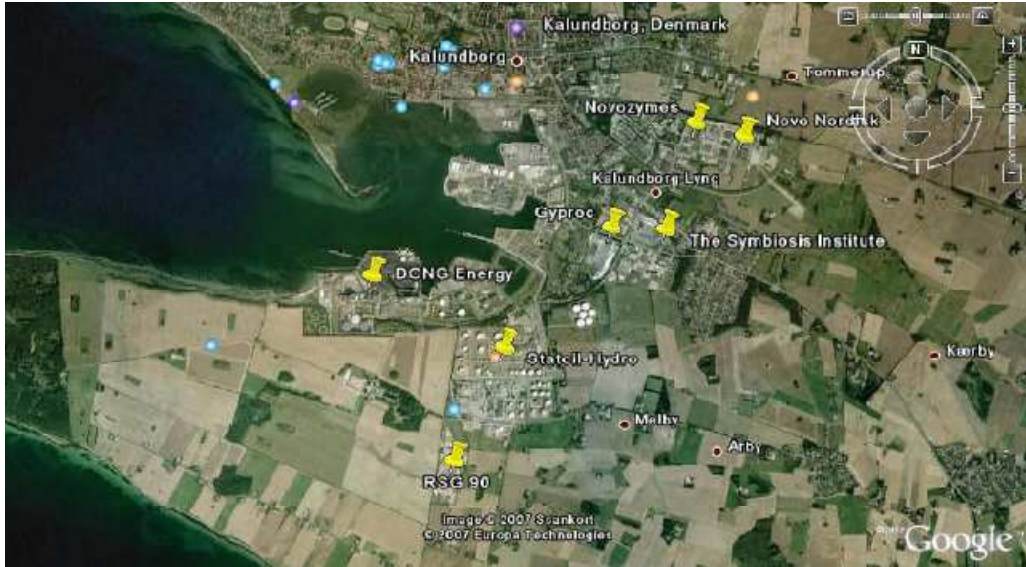


Figura 1 – Vista aérea del ecoparque industrial de Kalundborg (Fuente: Andersen, 2011)

El modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg existente en la actualidad se representa de forma esquematizada mediante la siguiente figura:

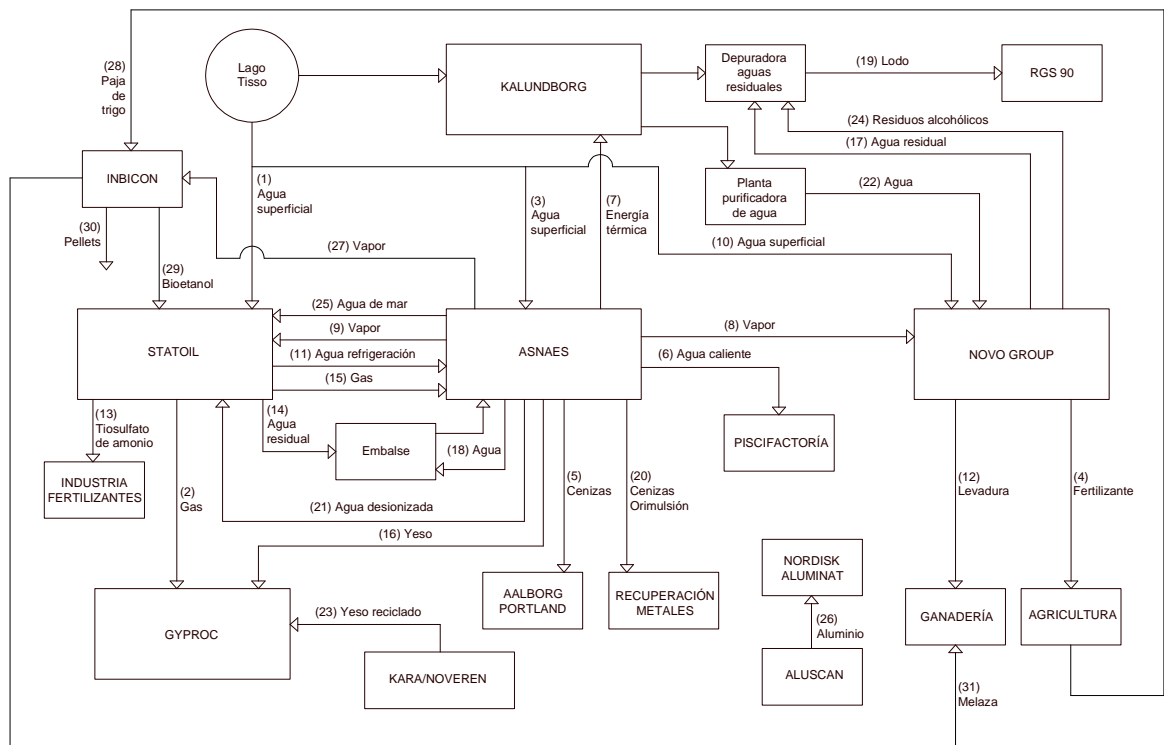


Figura 2 – Esquema del modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg (Elaboración propia a partir de Andersen, 2011)

## 5.2 Flujos

La red de intercambio de recursos entre los distintos participantes de la Simbiosis Industrial está compuesta por 31 flujos, los cuales se pueden clasificar en tres categorías:

### a) Flujos hídricos

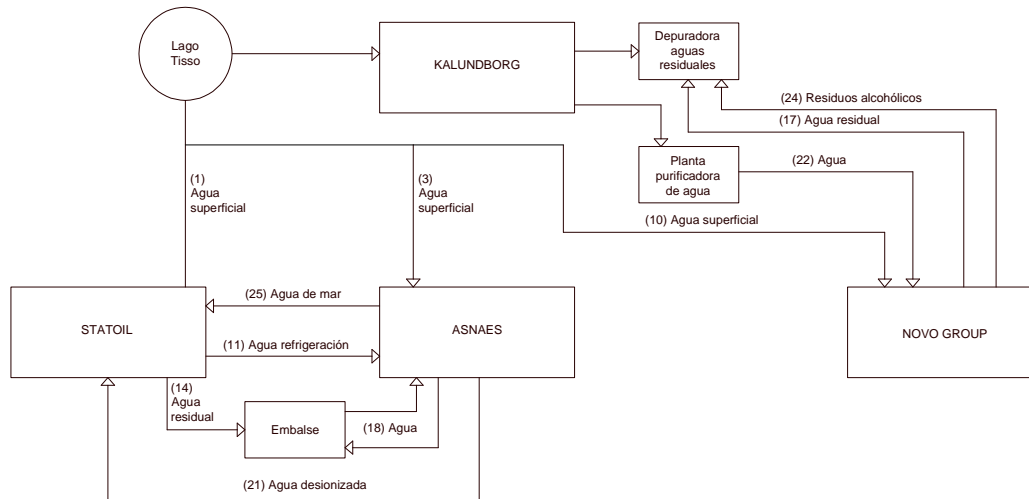


Figura 3 – Flujos hídricos de la Simbiosis Industrial (Elaboración propia a partir de Andersen, 2011)

El caudal anual de cada uno de los flujos hídricos mostrados en la figura 3 se detalla en la tabla siguiente:

Nº	Flujos hídricos	Cantidad (m <sup>3</sup> /año)	Fuente	
1	Agua superficial	1.600.000 m <sup>3</sup>	Jacobsen, 2006	
3	Agua superficial	686.000 m <sup>3</sup>		
10	Agua superficial	491.000 m <sup>3</sup>		
11	Agua de refrigeración	483.000 m <sup>3</sup>		
14	Agua residual	9.000 m <sup>3</sup>		
17	Agua residual	2.300.000 m <sup>3</sup>		
18	Agua	200.000 m <sup>3</sup>		
21	Agua desionizada	50.000 m <sup>3</sup>		
22	Agua purificada	-		-
24	Residuos alcohólicos	-		-
25	Agua de mar	-	-	

Tabla 2 – Caudal de los flujos hídricos de la Simbiosis Industrial

b) Flujos energéticos

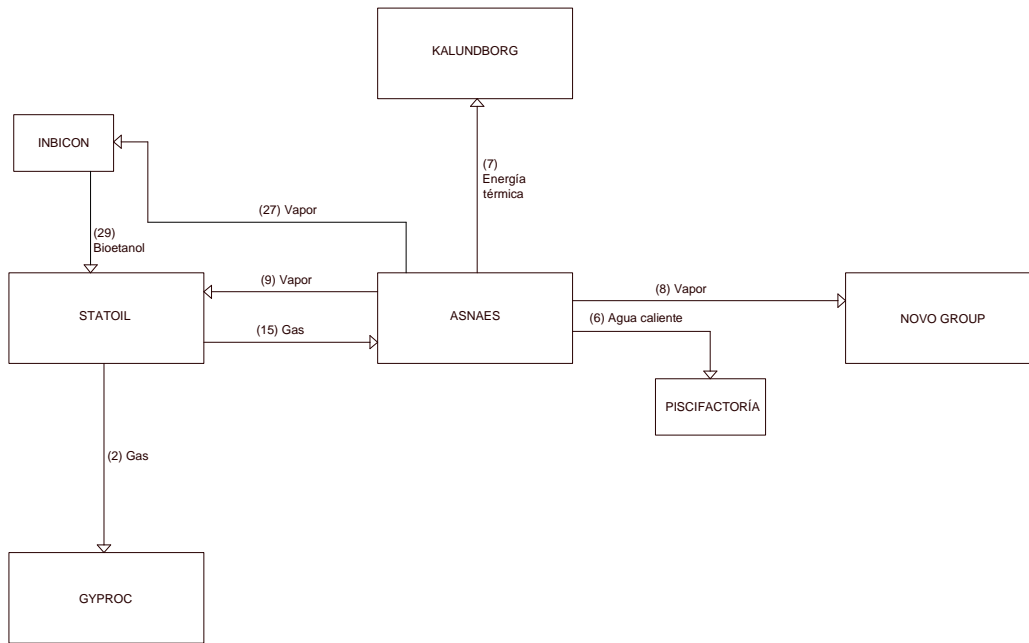


Figura 4 – Flujos energéticos de la Simbiosis Industrial (Elaboración propia a partir de Andersen, 2011)

En la siguiente tabla se muestra la cantidad anual, en unidades de energía o masa, de cada uno de los flujos energéticos de la figura 4:

Nº	Flujos energéticos	Cantidad anual	Fuente
2	Gas	8.000 t	Lowe, 2001
6	Agua caliente	390.000 GJ	Jacobsen, 2006
7	Energía térmica	931 TJ	Jacobsen, 2006
8	Vapor	1.500 TJ	www.symbiosis.dk
9	Vapor		
15	Gas	60.000 t	Lowe, 2001
27	Vapor	-	-
29	Bioetanol	4.300 t	www.inbicon.com

Tabla 3 – Caudal de los flujos energéticos de la Simbiosis Industrial



c) Flujos de subproductos

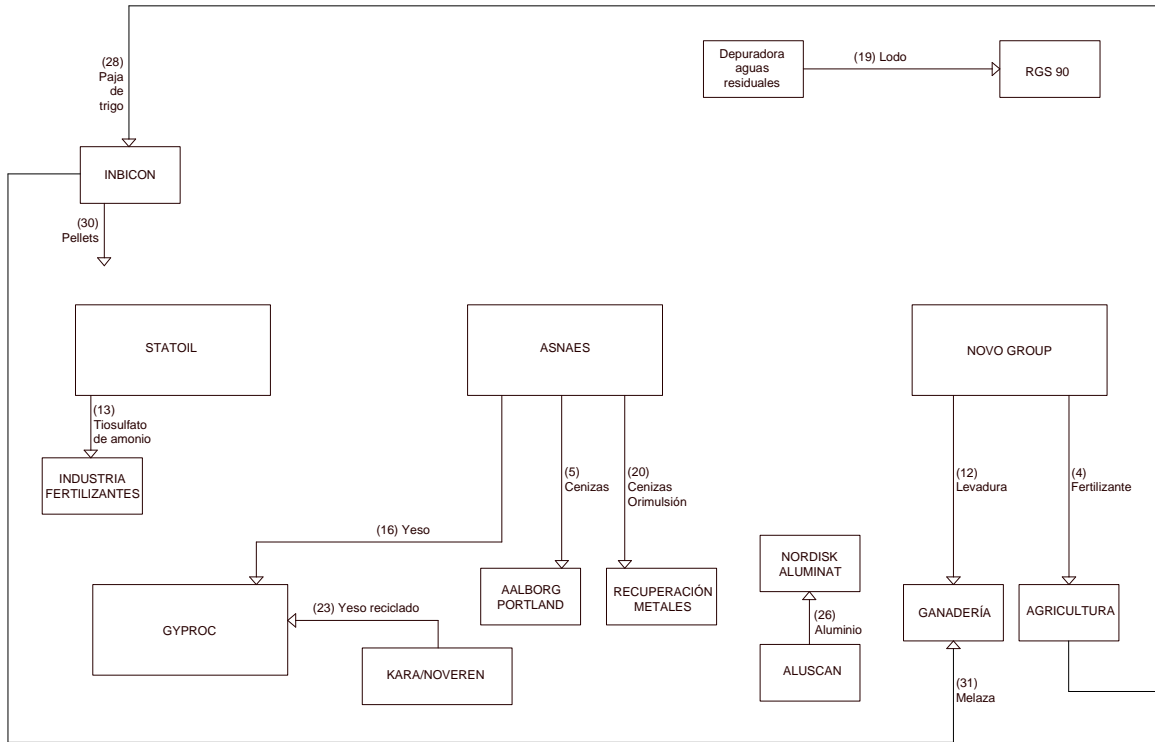


Figura 5 – Flujos de subproductos de la Simbiosis Industrial (Elaboración propia a partir de Andersen, 2011)

A continuación puede observarse el caudal másico o volumétrico anual de los flujos de subproductos que aparecen en la figura 5:

Nº	Flujos de subproductos	Cantidad anual	Fuente
4	Fertilizante	150.000 t	www.symbiosis.dk
5	Cenizas	200.000 t	Lowe, 2001
12	Levadura	92.000 m <sup>3</sup>	www.novonordisk.com
13	Tiosulfato de amonio	2.800 t	Lowe, 2001
16	Yeso	80.000 t	Lowe, 2001
19	Lodo	-	-
20	Cenizas Orimulsión	-	-
23	Yeso reciclado	8.000 t	Grann, 1997
26	Aluminio	-	-
28	Paja de trigo	30.000 t	www.inbicon.com
30	Pellets	8.250 t	www.inbicon.com
31	Melaza	11.100 t	www.inbicon.com

Tabla 4 – Caudal de los flujos de subproductos de la Simbiosis Industrial

### 5.3 Beneficios ambientales

Los beneficios ambientales asociados a la Simbiosis Industrial están determinados por ahorros en el consumo de agua, combustible y materia prima, dichos ahorros conllevan disminuir los residuos generados así como las emisiones de contaminantes, como se muestra en la tabla siguiente:

		Ahorro anual
<b>Agua</b>	Subterránea	1.900.000 m <sup>3</sup>
	Superficial	1.000.000 m <sup>3</sup>
<b>Combustible</b>	Petróleo	20.000 t
	Carbón	30.000 t
<b>Materia prima/residuo</b>	Ceniza	200.000 t
	Yeso	80.000 t
<b>Emisiones evitadas</b>	SO <sub>2</sub>	25.000 t
	CO <sub>2</sub>	175.000 t

Tabla 5 – Principales beneficios ambientales de la Simbiosis Industrial (Lowe, 2001)

Sin embargo, es complejo determinar todos los beneficios globales de la Simbiosis Industrial, puesto que muchos de los flujos presentes en el ecosistema industrial generan un doble beneficio. En el caso de los flujos de residuos, su valorización conlleva por un lado evitar la “eliminación” de dicho residuo, y por el otro se evita el consumo de la materia prima, así como de todos los recursos asociados a la obtención de la misma, que sería necesario si no se llevara a cabo la valorización.

Por ejemplo, los procesos de desulfuración en la central térmica y la refinería, además de evitar la emisión de dióxido de azufre a la atmósfera, producen yeso y tiosulfato de amonio respectivamente. La valorización de estos dos residuos supone para los emisores evitar su “eliminación”, y para los receptores, en el caso del yeso se reduce la importación de yeso natural, mientras que en el caso del tiosulfato de amonio se ahorra en materias primas y recursos correspondientes a su obtención. Con las cenizas ocurre exactamente lo mismo, su valorización repercute en una menor necesidad de clinker, y por tanto de los recursos necesarios para su fabricación. El fertilizante y la levadura suministrada por *Novo Group* disminuyen la cantidad de residuos generados y a su vez evitan el consumo de nuevas materias primas y recursos asociados a la fabricación de ambos productos.

En el caso de los flujos energéticos, como por ejemplo el gas excedente de la refinería o la energía térmica residual de la central, en origen conlleva evitar su disipación al medioambiente, mientras que para los receptores repercute en un ahorro sustancial de combustible.

En cuanto a los flujos hídricos, el principal beneficio ambiental alcanzado es el ahorro en el consumo de agua, focalizado en sus inicios en la sustitución de agua subterránea por agua superficial, y más tarde en la reutilización.

Además, en términos económicos también se han alcanzado beneficios sustanciales. Como ejemplo, para el año 2000 ya se habían invertido 75 millones de dólares en 19 proyectos con un ahorro estimado de 15 millones de dólares (Cervantes et al, 2009).

## 6. Caso de estudio

La aplicación de la Termoeconomía al modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg precisa de la definición de un caso de estudio sobre dicho modelo que permita su caracterización en términos de exergía. En este sentido, la información técnica recopilada sobre los flujos intercambiados limita el alcance del caso de estudio establecido. Sin embargo, fruto de una extensa y laboriosa búsqueda bibliográfica, se ha elaborado un caso de estudio que incluye los flujos más representativos de la Simbiosis Industrial de Kalundborg.

El caso de estudio gira en torno a la central térmica, puesto que representa el corazón de la Simbiosis Industrial, y tiene en consideración las integraciones principales en las que ésta participa:

1. Gas excedente  
Suministro de gas excedente de la refinería que anteriormente se quemaba en antorchas para su aprovechamiento en la caldera de la central térmica. Sustituye parte del carbón consumido en la central.
2. Vapor de proceso  
Extracción de vapor en las turbinas de la central térmica para su utilización en procesos productivos en *Novo Group* y *Statoil*.
3. Vapor *District Heating*  
Extracción de vapor en las turbinas de la central térmica para el abastecimiento del sistema de calefacción central de la ciudad de Kalundborg.
4. Agua caliente  
Aprovechamiento de agua de mar caliente a baja temperatura procedente del condensador de la central térmica en la piscifactoría.
5. Cenizas

Utilización de las cenizas y escorias generadas en la combustión de carbón de la central térmica como materia prima, en sustitución del clinker, para la fabricación de cemento.

6. Yeso

Utilización del yeso generado en el proceso de desulfuración de los gases de combustión de la central térmica como materia prima en la fabricación de placas de yeso. Sustituye la importación de yeso natural desde España.

A fin de evaluar el efecto que tiene la Simbiosis Industrial en el ahorro de recursos, el caso de estudio definido se divide en un caso base y un caso alternativo. El caso base simula la situación referente a la Simbiosis Industrial con las seis integraciones consideradas:

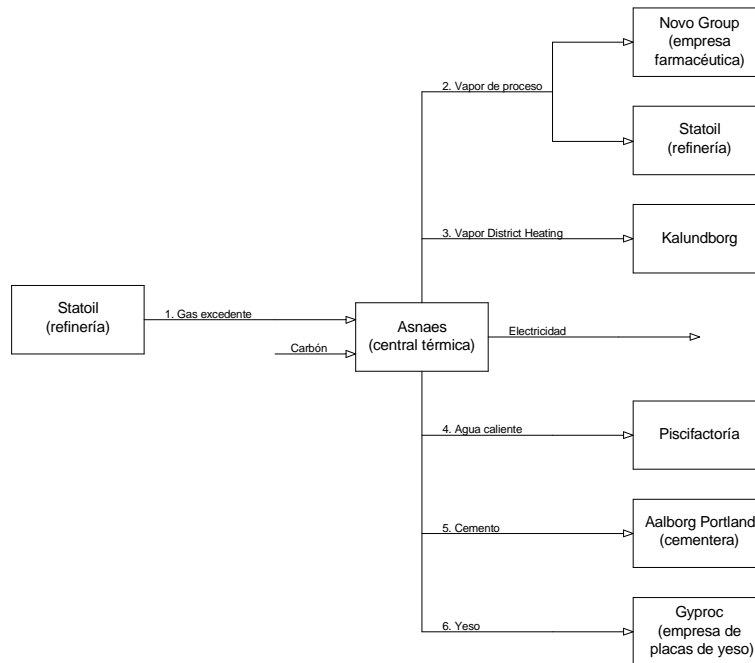


Figura 6 – Esquema del caso base (Elaboración propia)

Mientras que el caso alternativo mostrado en la figura 7, simula una situación ficticia donde no existe integración entre las partes de modo que los flujos simbióticos son sustituidos por otros obtenidos mediante procesos convencionales. Es decir, el gas excedente se quema en una antorcha originando un consumo de carbón adicional en la central, las integraciones de vapor y agua caliente se sustituyen por calderas de gas natural, las cenizas se sustituyen por clinker producido en un horno y el yeso es importado desde España mediante transporte marítimo.

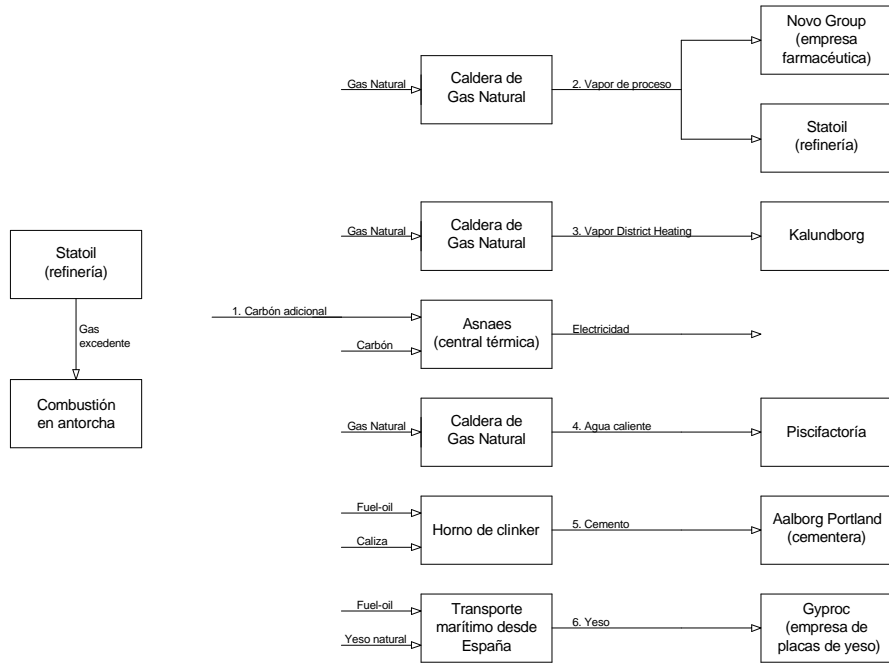


Figura 7 – Esquema del caso alternativo (Elaboración propia)

El diagrama físico definido para la representación de ambos casos es el siguiente:

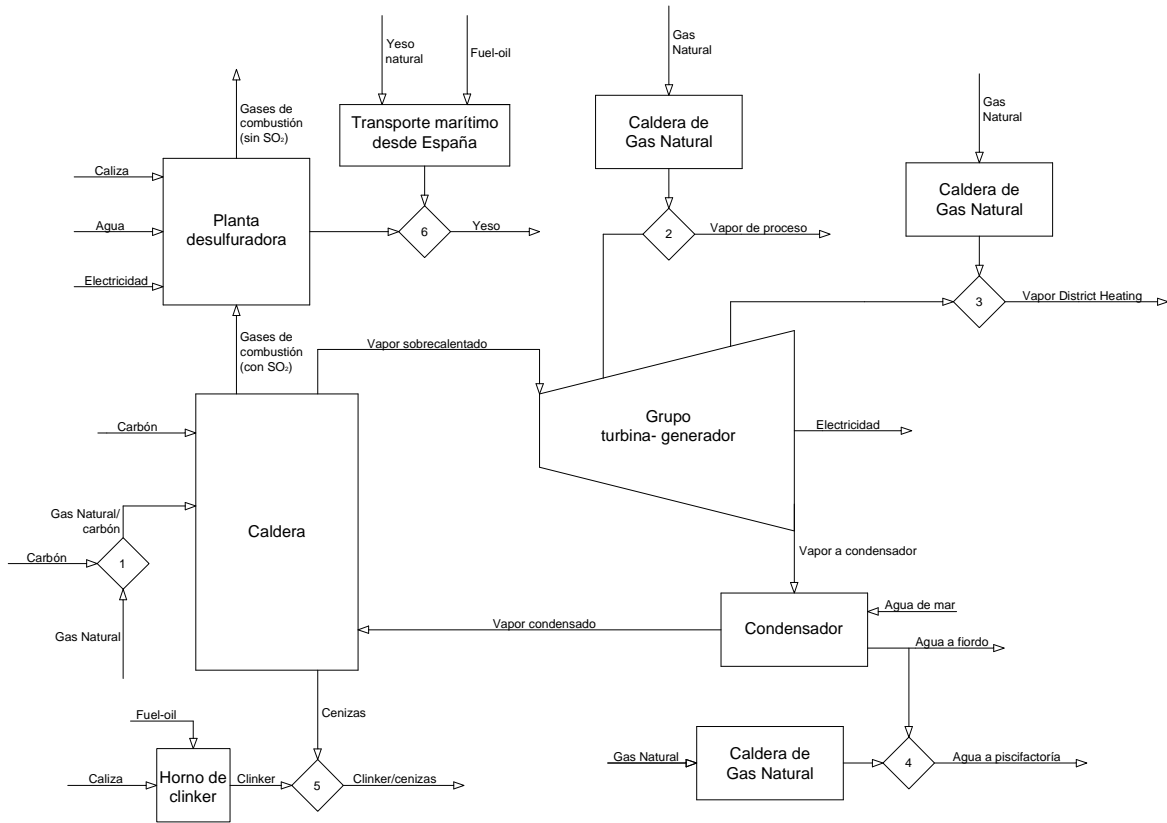


Figura 8 – Diagrama físico del caso de estudio (Elaboración propia)

En el anexo 2 se describe el modelo termodinámico del caso de estudio, cuya elaboración se ha visto dificultada por la falta de información técnica sobre las integraciones consideradas. Como solución, se han buscado procesos similares en la bibliografía para poder adoptar las hipótesis necesarias y/o obtener datos técnicos.

Los resultados del modelo termodinámico se muestran en la siguiente tabla, donde aparecen para los dos casos considerados los valores exergéticos de cada uno de los flujos:

Flujo	$B_{anual}$ [GWh/año]	
	Caso base	Caso alternativo
Carbón	10.376	10.591
Gas excedente*	841,7	841,7
Electricidad central	3.968	3.968
Ceniza*	21,79	22,24
Dióxido de azufre	25,98	26,51
Caliza desulfuración	1,933	1,973
Agua desulfuración	4,51	4,604
Yeso*	2,036	2,078
Electricidad desulfuración	24,8	24,8
Vapor proceso	193,4	193,4
Vapor <i>District Heating</i>	63,8	63,8
Agua piscifactoría*	14	14
Vapor turbina	4.487	4.487
Gas Natural proceso	-	495,8
Gas Natural <i>District Heating</i>	-	307,7
Gas Natural piscifactoría	-	254,4
Caliza producción clinker	-	16,26
Fuel-oil producción clinker	-	213,4
Clinker	-	59,51
Yeso natural	-	2,036
Fuel-oil transporte yeso	-	9,703

Tabla 6 – Exergía anual de los flujos del caso de estudio (Elaboración propia)

Los flujos marcados con un asterisco representan aquellos que en el caso alternativo, al no considerar su aprovechamiento, deben ser disipados al no poder evitar su generación.

Se ha considerado únicamente el proceso de disipación mediante una antorcha para el gas excedente de la refinería, puesto que dada la magnitud en términos de exergía de dicho flujo, no puede obviarse.

Partiendo del análisis realizado en el anexo 1 sobre el modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg, el anexo 2 se dedica exclusivamente al caso de estudio, en él se define su estructura física y se elabora el modelo termodinámico que lo representa.

## 7. Análisis termoeconómico

La aplicación del análisis termoeconómico al caso de estudio definido en el anexo 2 se realiza mediante el software *TAESS*, el cual está basado en *Excel* y puede descargarse en la web [www.exergoecology.com](http://www.exergoecology.com). En el presente apartado se resume el análisis termoeconómico realizado, el cual se trata en profundidad en el anexo 3.

### 7.1 Estructura productiva

El punto de partida del análisis termoeconómico es la estructura productiva, que es la representación gráfica de la distribución de flujos del sistema. Además, la estructura productiva contiene la definición fuel-producto de cada componente, es decir, sus flujos describen las relaciones productivas entre los componentes basadas en el diagrama físico, de modo que las flechas de entrada hacia los componentes son los fueles y las flechas de salida son los productos, aunque no implica que dichos flujos coincidan con los flujos físicos del diagrama físico.

En la figura siguiente se muestra la estructura productiva del caso de estudio:

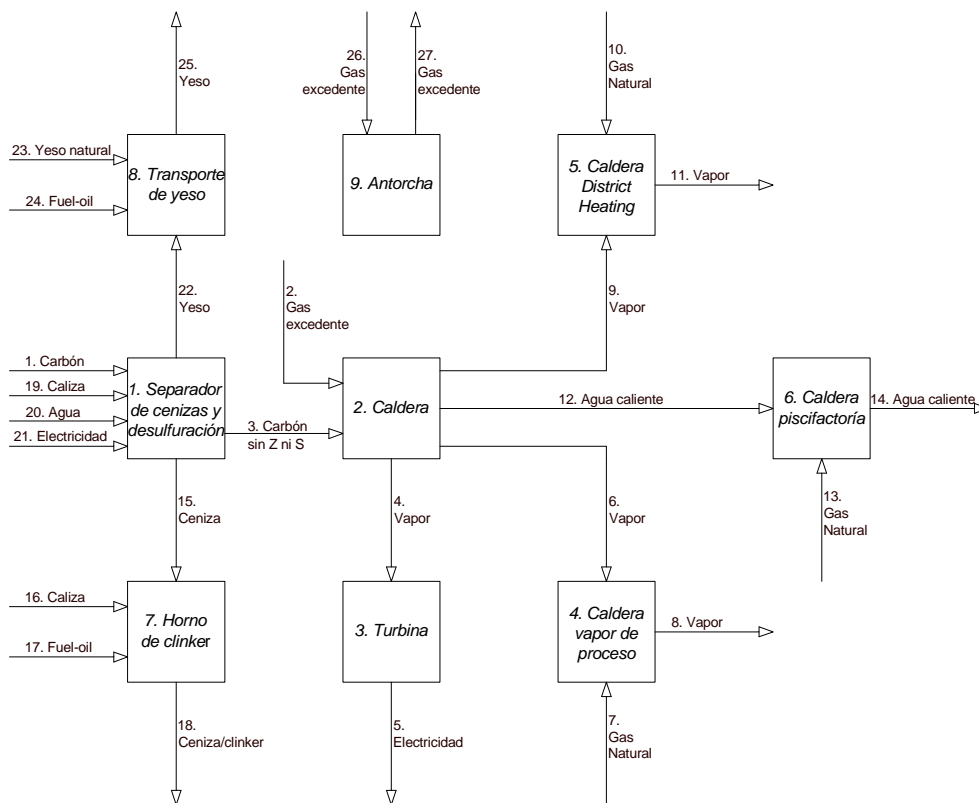


Figura 9 – Estructura productiva del caso de estudio (Elaboración propia)

El aspecto más importante de la estructura productiva definida es que los componentes que representan las integraciones consideradas no operan del mismo modo para los dos casos considerados, es decir, en el caso integrado actúan como uniones conectadas con la central térmica sin consumir los recursos externos planteados, mientras que en el caso sin integración actúan como procesos aislados de la central térmica consumiendo recursos externos. Esta particularidad ha supuesto una problemática en la definición de la estructura productiva, ya que dicha estructura cambia de un caso a otro, por lo que el diagnóstico no es tan sencillo como en un sistema convencional en el que únicamente existen degradaciones de equipos.

Una vez definida la estructura productiva se obtienen los costes y se aplica el diagnóstico termoeconómico mediante las ecuaciones detalladas en el anexo 3. Lo cual se realiza mediante *TAESS*, donde se introducen las exergías de cada uno de los flujos para las dos situaciones a comparar: con integración (caso base) y sin integración (caso alternativo). Además, junto a los valores exergéticos de los flujos, debe introducirse la definición fuel-producto que representa la estructura productiva.

## 7.2 Coste exergético

El coste exergético unitario se define como la cantidad de recursos, medidos en términos de exergía, necesarios para obtener una unidad de producto. Su utilidad práctica es establecer de forma objetiva el precio de los productos de cada componente.

Por tanto, el análisis de costes permite cuantificar de forma objetiva el coste que se ahorra con cada una de las integraciones planteadas.

En la tabla siguiente se muestran los costes exergéticos unitarios del producto de cada componente que se han obtenido para los dos casos considerados:

<b>Coste exergético unitario del producto</b>		
<b>Componente</b>	<b>Con integración</b>	<b>Sin integración</b>
1 Separador + desulfuración	1,0054	1,0076
2 Caldera	2,3591	2,5550
3 Turbina	2,6676	2,8891
4 Caldera vapor de proceso	2,3591	2,5636
5 Caldera District Heating	2,3591	4,8229
6 Caldera piscifactoría	2,3591	18,1714
7 Horno clinker	1,0054	3,8592
8 Transporte yeso	1,0054	5,7657
9 Antorcha	1,0000	1,0000

**Tabla 7 – Costes exergéticos unitarios del producto de los componentes**



En la tabla 7 puede observarse como se incrementa el coste exergético unitario de los componentes que representan las integraciones, a excepción de la antorcha. Este incremento se debe al hecho de sustituir las integraciones, las cuales actuaban como uniones en el caso integrado, por procesos alternativos que lógicamente consumen recursos y generan siempre irreversibilidad.

Particularizando en los componentes del sistema conviene destacar lo siguiente:

- **Separador + desulfuración:**  
Su incremento es insignificante y se debe al hecho de considerar en el caso sin integración que los flujos de cenizas y yeso suponen irreversibilidades propias del componente. Por tanto, era de esperar que su coste se mantenga prácticamente constante teniendo en cuenta que los procesos de separación de cenizas y desulfuración no tienen porqué modificar su rendimiento exergético.
- **Caldera y turbina:**  
La turbina mantiene su eficiencia exergética mientras que en la caldera varía de modo insignificante al incrementar su irreversibilidad con el agua de refrigeración que era enviada a la piscifactoría y en el caso sin integración debe ser disipada en el condensador. Sin embargo, puede observarse un ligero incremento en el coste de ambos componentes, cuyo origen está en la asignación de una parte del coste de la antorcha. Por tanto, cabe destacar que el coste del residuo incrementa ligeramente el coste del producto de la caldera y por consiguiente, de la electricidad generada debido a la disipación del gas excedente en la antorcha.
- **Caldera vapor de proceso:**  
La caldera auxiliar de proceso es menos eficiente en términos exergéticos que la caldera de la central térmica, sin embargo en el caso sin integración se observa que poseen prácticamente el mismo coste. Por tanto, lo que hace que ambos costes se igualen es el hecho de incrementar el coste de la caldera de la central térmica por la disipación del gas excedente.
- **Caldera *District Heating*:**  
Comparando ambos casos, puede observarse como el coste de la caldera de *District Heating* se incrementa más del doble. Esto es debido a la baja eficiencia exergética que conlleva el proceso de generar energía térmica para *District Heating*, de menor temperatura que el vapor de proceso, a partir de gas natural respecto al caso integrado donde queda demostrado que son necesarios menos de la mitad de recursos.

- **Caldera piscifactoría:**  
Por encima de todos los costes destaca el de la caldera de la piscifactoría, el cual puede calificarse de aberrante debido a la pésima eficiencia exergética que supone generar energía térmica de baja temperatura a partir de gas natural. En este sentido, la conclusión que puede extraerse es que cuanto menor exergía posea la energía térmica generada menor será el rendimiento exergético y mayor será su coste. Entonces, este es el motivo por el cual en las calderas auxiliares de proceso y *District Heating* se obtienen menores costes, ya que el cociente exergía-energía del producto que generan es más elevado.
- **Horno de clinker y transporte de yeso:**  
Cabe destacar el incremento del coste del horno de clinker y del transporte de yeso, el cual se multiplica prácticamente por 4 y por 6 respectivamente. Se debe también a la ineficiencia exergética que conlleva tener que consumir recursos externos para producir o transportar dichos productos. Además, cabe destacar que el coste de las cenizas y del yeso en el caso integrado es prácticamente la unidad, lo que significa que cualquier proceso real que se plantee en el caso sin integración, por muy eficiente que sea, supondrá incrementar el coste asociado a dichos productos.

### 7.3 Impacto en fuel

El análisis de costes unitarios exergéticos es muy útil para asignar a los productos un coste en base a criterios físicos. Sin embargo, no aporta información acerca del ahorro de recursos que supone la integración de procesos. Por tanto, para conocer el ahorro de recursos hay que recurrir al diagnóstico termoeconómico.

El diagnóstico proporciona, entre otros resultados, el impacto en fuel, el cual se define como el consumo adicional de combustible y se expresa como la diferencia entre el consumo de recursos en el caso integrado y en el caso sin integración. En el caso de estudio del presente trabajo el impacto en fuel supone el ahorro exergético que conlleva la situación de integración respecto a la situación alternativa convencional. Según se indica en las tablas siguientes dicho ahorro es mayor a 1.500 GWh/año.

Una vez conocido el ahorro alcanzado, es de suma importancia conocer las causas que lo generan, para lo cual se observa la descomposición del impacto en fuel.

Los resultados del diagnóstico termoeconómico se resumen de manera muy concisa en las dos tablas siguientes, donde aparece desglosado el impacto en fuel de dos formas distintas. La primera es mediante variaciones de irreversibilidad, productos y flujos de residuo, como se muestra en la tabla 8:

<b>Componente</b>	$\Delta I$ [GWh/año]	$\Delta P_s$ [GWh/año]	$\Delta P_r$ [GWh/año]	$\Delta F_T$ [GWh/año]
1 Separador + desulfuración	25	0	0	<b>25</b>
2 Caldera	-357	0	0	<b>-357</b>
3 Turbina	0	0	0	<b>0</b>
4 Caldera vapor de proceso	302	0	0	<b>302</b>
5 Caldera District Heating	244	0	0	<b>244</b>
6 Caldera piscifactoría	240	0	0	<b>240</b>
7 Horno clinker	170	38	0	<b>208</b>
8 Transporte yeso	10	0	0	<b>10</b>
9 Antorcha	0	0	842	<b>842</b>
<b>TOTAL</b>	<b>635</b>	<b>38</b>	<b>842</b>	<b>1.514</b>

Tabla 8 – Análisis del impacto en fuel basado en la irreversibilidad

Puede observarse que para descomponer el impacto en fuel en irreversibilidades sólo es necesario aplicar un análisis exergético. Pero lo importante es que desde este punto de vista lo que se hace es mostrar cómo afectan en el impacto en fuel de un componente los cambios en el funcionamiento de todos los componentes. Prueba de ello es la caldera de la central térmica, la cual hace disminuir el impacto en fuel global del sistema porque ha reducido su producción, y por tanto su irreversibilidad, a pesar de mantener su eficiencia exergética constante. En otras palabras, no consume menos porque funcione mejor, sino porque otros componentes le obligan a producir menos.

Entonces queda claro que esta primera forma no refleja exactamente cómo contribuye cada componente al ahorro generado.

En términos termoeconómicos puede explicarse el motivo por el cual la irreversibilidad no aporta la información más útil del diagnóstico termoeconómico: dado que la irreversibilidad es la suma de las malfunciones y disfunciones en un componente, la descomposición del impacto en fuel en irreversibilidades está considerando el consumo de recursos asociados a dos factores: a la variación del consumo unitario del propio componente (malfunción) y a la variación de su producción debida a malfunciones en otros componentes (disfunción).

Por consiguiente, para averiguar la contribución real de cada componente al ahorro generado se recurre a fijar el foco de atención en el consumo de recursos asociado a la malfunción de cada componente, denominado: coste de la malfunción.

A continuación se muestra la segunda forma de descomponer el impacto en fuel global, la cual se basa en el coste de malfunción, variación de productos y flujos de residuos:

Componente	$MF$ [GWh/año]	$MF^*$ [GWh/año]	$c_p^e \Delta P_s$ [GWh/año]	$c_p^e \Delta P_r$ [GWh/año]	$\Delta F_T$ [GWh/año]
1 Separador + desulfuración	24	24	0	0	24
2 Caldera	9	16	0	0	16
3 Turbina	0	0	0	0	0
4 Caldera vapor de proceso	302	38	0	0	38
5 Caldera District Heating	244	157	0	0	157
6 Caldera piscifactoría	240	221	0	0	221
7 Horno clinker	62	62	146	0	208
8 Transporte yeso	10	10	0	0	10
9 Antorcha	0	0	0	842	842
<b>TOTAL</b>	<b>892</b>	<b>527</b>	<b>146</b>	<b>842</b>	<b>1.514</b>

Tabla 9 – Análisis del impacto en fuel basado en el coste de malfunción

En la tabla 9 puede observarse la contribución real de cada componente en el ahorro de recursos del sistema. Por tanto, las contribuciones más llamativas son debidas a los componentes siguientes:

- **Calderas auxiliares**  
Demuestran en términos de impacto en fuel que la producción autónoma de energía térmica es menos eficiente que el abastecimiento desde la caldera de la central térmica. Además, puede comprobarse que cuanto menor exergía específica tenga la energía térmica generada, mayor impacto en fuel conlleva. Es por ello que la caldera de vapor proceso apenas incrementa el impacto en fuel, mientras que la caldera de la piscifactoría lo hace notablemente.
- **Horno de clinker**  
El horno de clinker tiene asociado un impacto en fuel originado fundamentalmente por la sustitución de su producto original, las cenizas, por otro de mayor exergía como es el clinker. También contribuye en su impacto en fuel el consumo de recursos externos que conlleva la producción de clinker.
- **Antorcha**  
Su impacto en fuel es el que más peso tiene de todos, y es consecuencia de la generación de un residuo de elevada exergía que debe ser disipado al sustituir el aprovechamiento del gas excedente en la central por un consumo adicional de carbón.

Por último, en relación a los costes de malfunción de las calderas auxiliares puede observarse un hecho curioso: el coste de la malfunción es menor que la malfunción. Entonces surge la siguiente cuestión: ¿cómo es posible si el coste de malfunción es el

producto entre la malfunción y el coste exergético unitario, el cual es siempre mayor a uno? Pues esto es debido a que el coste de malfunción de un componente se calcula como una suma de productos, y dado que la malfunción de dichas calderas origina por un lado un coste de malfunción positivo en el ambiente al consumir sus recursos, y por otro un coste de malfunción negativo al disminuir la producción de la caldera de la central, hace que dichos productos sean de signo opuesto y se compensen parcialmente según el valor de cada producto malfunción-coste. En la matriz de malfunciones mostrada en el anexo 3 pueden observarse las malfunciones citadas que originan esta peculiaridad.

## 8. Conclusiones

### 8.1 Síntesis

Después de muchas horas de dedicación y esfuerzo conviene recalcar que el presente trabajo cumple el objeto que motivó su realización y puede afirmarse con rotundidad que la implementación del análisis termoeconómico sobre el caso de estudio del modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg ha sido plenamente satisfactoria. Prueba de ello es que se han cumplido los objetivos del diagnóstico (Valero y Torres, 2005):

- Identificar las malfunciones de cada componente de un sistema térmico.
- Evaluar sus efectos sobre la eficiencia global de la planta.
- Determinar dónde, cómo y qué cantidad de recursos consumidos pueden ser ahorrados.

Del modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg, conviene destacar la aportación de beneficios socio-económicos, el aumento de la eficiencia en el uso de materiales y la mejora de la calidad ambiental. En este sentido, se ha comprobado como un ecoparque industrial supone una estrategia encaminada hacia el cierre del ciclo de materia que puede contribuir al desarrollo sostenible. Sin embargo, la experiencia de Kalundborg denota que aún existe mucho margen de mejora puesto que, a pesar de la gran heterogeneidad de flujos intercambiados, no hay que olvidar que las empresas más importantes del ecoparque, *Asnaes* y *Statoil*, se basan en combustibles fósiles.

El análisis termoeconómico sobre el caso de estudio basado en el ecoparque industrial de Kalundborg ha aportado una serie de resultados que refuerzan la idea de que cada una de las integraciones analizadas es más ventajosa que su alternativa convencional. Por tanto, la conclusión principal que puede extraerse es que las integraciones de procesos en la industria son eficaces y eficientes tanto en términos económicos, energéticos como ambientales. Prueba de ello es la disminución del coste físico de los productos, el ahorro de materia prima y la disminución de los residuos generados.

## 8.2 Aportaciones

Cabe destacar que el presente trabajo es pionero en la utilización de la Termoeconomía como herramienta de análisis en ecoparque industriales. Lo cual ha contribuido a que en el futuro se tenga en consideración la Ecología Industrial dentro del campo de aplicación del análisis termoeconómico.

Además, el aspecto más relevante que puede aportar el presente trabajo ha sido la definición de una estructura productiva novedosa capaz de representar sistemas productivos que poseen la particularidad de cambiar su estructura según el modo de operación.

Por otro lado, todo parece indicar que la carencia de datos técnicos sobre el modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg supone un motivo más que suficiente para que no se haya elaborado ningún estudio completo acerca de tan reconocida experiencia. Sin embargo, en el presente trabajo se ha conseguido definir un caso de estudio que simule el ecoparque industrial de Kalundborg de manera representativa y a la vez fiable. Por consiguiente, la realización del análisis termoeconómico ha sido posible gracias a la extensa búsqueda bibliográfica llevada a cabo y a la elaboración de un modelo termodinámico riguroso.

Todo ello ha contribuido a la obtención de unos resultados de gran interés, ya que han permitido cuantificar los ahorros obtenidos en el ecoparque industrial de Kalundborg, y además hacerlo por primera vez desde el prisma de la Termoeconomía.

## 8.3 Perspectivas

Las perspectivas surgidas a raíz del presente trabajo son muchas, dado que no cabe duda que la Ecología Industrial representa un campo de estudio emergente y prometedor para la aplicación de las metodologías termoeconómicas.

Pueden destacarse como futuras líneas de investigación las siguientes propuestas: aplicar el análisis termoeconómico a más integraciones existentes en el modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg, extender su aplicación a más ejemplos reales, identificar posibles integraciones en polígonos industriales existentes, mejorar el diagnóstico termoeconómico de modo que permitiera tratar los cambios de estructura productiva de un modo más sistemático, mejorar el software *TAESS*, etc.

## 9. Bibliografía

Andersen, M. *"Kalundborg Industrial Symbiosis"*. Resource Efficiency, Green Week, Brussels, 2011.

ATSDR. *"Toxicological Profile for Fuel Oils"*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, 1995.

Ayres, R.U.; Ayres, L.W. "*Industrial Ecology. Towards Closing the Materials Cycle*". Edward Elgar, 1996.

Bermejo, R. "*Fundamentos de ecología industrial*". Cuadernos Bakeaz, nº 44, 2001.

Bejan, A.; Tsatsaronis G.; Moran, M.J. "*Thermal Design and Optimization*". Wiley-IEEE, 1996.

Bilgen, S.; Kaygusuz, K. "*The calculation of the chemical exergies of coal-based fuels by using the higher heating values*". Applied Energy, 85, pp. 776-885, 2008.

Cervantes, G. "*Desarrollo Sostenible*". Edicions UPC, 2005.

Cervantes, G.; Sosa, R.; Rodríguez, G.; Robles, F. "*Ecología industrial y desarrollo sustentable*". Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 13-1, pp. 63-70, 2009.

Chertow, M.R. "*Uncovering Industrial Symbiosis*". Journal of Industrial Ecology, vol. 11, nº 1, pp. 11-30, 2007.

Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructuras. "*Resolución de 9 de marzo de 2009, por la que se modifica la Autorización Ambiental Integrada de la instalación industrial Central Térmica de Lada con emplazamiento en Langreo, promovida por la empresa Iberdrola Generación, S.A.U., al objeto de incluir la Planta de Desulfuración del Grupo IV*". Boletín Oficial del Principado de Asturias nº 195, 2009.

El-Haggar, S. "*Sustainable industrial design and waste management: cradle-to-cradle for sustainable development*". Academic Press, 2007.

Ehrenfeld, J.R.; Chertow M.R. "*Industrial Symbiosis: the legacy of Kalundborg*". A Handbook of Industrial Ecology, pp. 334-347. Edward Elgar Publishing, 2002.

Erlach, B.; Serra, L.; Valero, A. "*Structural theory as standard for thermoeconomics*". Energy Conversion & Management, vol. 40, pp.1627-1649, 1999.

Erkman, S. "*Industrial Ecology: a new perspective on the future of the industrial system*". Swiss Med Wkly, 2001.

Fernández, R. "*Nueva perspectiva global en la estrategia medioambiental*". Ingeniería química, nº 401, pp. 99-106, 2003.

Frosch R.A.; Gallopoulos N.E. "*Strategies for manufacturing*". Scientific American, 261(3), pp.144-152, 1989.

Grann, H. "*The Industrial Symbiosis at Kalundborg, Denmark*". The Industrial Green Game, pp. 117-123. National Academies Press, 1997.

Hermann, W.A. "Quantifying global exergy resources". *Energy*, 31(12), pp. 1685-1702, 2005.

Izaola, B. "El ecosistema industrial de Kalundborg: Competitividad, sostenibilidad y calidad de vida". *Territorios inteligentes: dimensiones y experiencias internacionales*, pp. 193-210. Betbiblo, 2008.

Jacobsen, N.B. "Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark. A Quantitative Assesment of Economic and Environmental Aspects". *Journal of Industrial Ecology*, vol. 10, nº 1-2, pp.239-255, 2006.

Larsen, M.; Bech, M.; Bidstrup, T.; Christensen, N.P.; Vangkilde-Pedersen, T.; Biede, O. "Kalundborg case study, a feasibility study of CO2 storage in onshore saline aquifers". Geological Survey of Denmark and Greenland, Ministry of the Environment, 2007.

Lowe, E.A. "Creating by-product resource exchanges: strategies for eco-industrial parks". *Journal of Cleaner Production*, vol. 5, pp. 57-65, 1998.

Lowe, E.A. "Eco-industrial Park Handbook for Asian Developing Countries. A Report to Asian Development Bank". Environment Department, Indigo Development, Oakland, CA, 2001.

Lowe, E.A.; Warren J.; Moran S. "Discovering Industrial Ecology". Columbus, Battelle Press, 1997.

Lozano, M.A.; Valero, A. "Determinación de la exergía para sustancias de interés industrial". *Ingeniería química*, vol. 204, pp. 119-128, 1986.

Manahan S.E. "Introducción a la química ambiental". Reverte, 2007.

Masters G.M. "Renewable and efficient electric power systems". Wiley-IEEE, 2004.

Mommer, B. "La Orimulsión: verdades científicas y mentiras políticas". *Interciencia*, vol. 29, nº 1, pp. 11-12, 2004.

Moran, M.J.; Shapiro, H.N. "Fundamentos de termodinámica técnica". Reverte, 2004.

Nag, P.K. "Power Plant Engineering". Tata McGraw-Hill Education, 2008.

Ordóñez, S.; Díaz, E.; Orviz, P. "Desafíos tecnológicos de la nueva normativa sobre medio ambiente industria". Universidad de Oviedo, 2007.

Pérez, E.; Torres, C. "TAESS. Thermo-economic Analysis of Energy System Software". CIRCE. Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos, 2007.



Pinzón, A. "*La simbiosis industrial en Kalundborg*". DEARQ, Revista de Arquitectura de la Universidad de los Andes, nº 4, pp. 155-160, 2009.

Randolph J.; Masters G.M. "*Energy for sustainability: technology, planning, policy*". Island Press, 2008.

Ray, H.S.; Singh, B.P.; Bhattacharjee S.; Misra, V.N. "*Energy in minerals and metallurgical industries*". Allied Publishers, 2005.

Renedo, C.J. "*Sistemas a escala urbana: District Heating y District Cooling*". Curso de Postgrado Construcción Sostenible, UPV-EHU, 2007.

Torres, C. "*Exergoeconomía Simbólica. Metodología para el análisis termoeconómico de los sistemas energéticos*". Universidad de Zaragoza, 1991.

Torres, C.; Valero, A.; Serra, L.; Royo, J. "*Structural theory and thermoeconomic diagnosis Part I. On malfunction and dysfunction analysis*". Energy and Conversion Management, 43, pp. 1503-1518, 2002.

Torres, C.; Valero, A.; Pérez, E. "*Guidelines to develop software for thermoeconomic analysis of energy systems. Part I: The thermoeconomic model. Part II: Application to thermoeconomic diagnosis*". Proceedings of ECOS, Padova, Italy, June 25-28, vol.1, pp. 435-451, 2007.

Torres E.V. "*Estudio del funcionamiento del sistema de enfriamiento de una central termoeléctrica mediante el análisis exergoeconómico*". ESIME, Instituto Politécnico Nacional, México, 2004.

Twardowska, I. "*Solid waste: assessment, monitoring and remediation*". Gulf Professional Publishing, 2004.

Uche, J. "*Análisis termoeconómico y simulación de una planta combinada de producción de agua y energía*". Universidad de Zaragoza, 2000.

UNCTAD. "*Review of maritime transport 2005*". United Nations Conference on Trade and Development, 2006.

Usón, S.; Valero, A. "*Thermoeconomic Diagnosis of Energy Systems*". Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010.

Valero A.; Correas, L.; Zaleta, A.; Lazzaretto, A.; Verda V.; Reini, M.; Rangel, V. "*On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy systems malfunctions. Part 1: the TADEUS problem*". Energy, vol. 29, pp. 1875-1887, 2004a.

Valero A.; Correas, L.; Zaleta, A.; Lazzaretto, A.; Verda V.; Reini, M.; Rangel, V. “*On the thermoeconomic approach to the diagnosis of energy systems malfunctions. Part 2: Malfunction definitions and assessment*”. Energy, vol. 29, pp. 1889-1907, 2004b.

Valero, A.; Lozano, M.A.; Muñoz, M. “*A general theory of exergy saving*”. ASME, 2-3, pp. 1-9, 1986.

Valero, A.; Torres, C. “*Thermoeconomic Analysis*”. Ed. Frangopoulos C.A., en *Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)*, Developed under the Auspices of the UNESCO, Eolss Publishers, Oxford, UK, 2005.

Valero, A.; Usón, S; Torres, C; Valero, A. “*Application of Thermoeconomics to Industrial Ecology*”. Entropy, 12, pp. 591-612, 2010.

Valero, A.; Valero A. “*Fundamentals of Energy Thermodynamics and Exergy Analysis*”. Thermoeconomic Course, Máster en Energías Renovables y Eficiencia Energética, Universidad de Zaragoza, 2009.

WCED. “*Our Common Future*”. Oxford University Press, 1987.

Woods, T.L.; Garrels, R.M. “*Thermodynamic Values at Low Temperature for Natural Inorganic Materials: An Uncritical Summary*”. Oxford University Press, 1987.

#### Páginas web

Agencia Europea de Medio Ambiente: [www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)

*Aluminat*: [www.aluminat.dk](http://www.aluminat.dk)

*Aluscan*: [www.aluscan.dk](http://www.aluscan.dk)

Ayuntamiento de Kalundborg: [www.kalundborg.dk](http://www.kalundborg.dk)

*BWE*: [www.bwe.dk](http://www.bwe.dk)

Centro de Simbiosis Industrial: [www.symbiosis.dk](http://www.symbiosis.dk)

*Dong Energy*: [www.dongenergy.com](http://www.dongenergy.com)

*Gyproc*: [www.gyproc.dk](http://www.gyproc.dk)

*Inbicon*: [www.inbicon.com](http://www.inbicon.com)

*Novo Nordisk*: [www.novonordisk.com](http://www.novonordisk.com)

*Statoil*: [www.statoil.com](http://www.statoil.com)

*Novozymes*: [www.novozymes.com](http://www.novozymes.com)

*SeaRates*: [www.searates.com](http://www.searates.com)

*The Exergoecology Portal*: [www.exergoecology.com](http://www.exergoecology.com)