

ANEXO 1: SIMBIOSIS INDUSTRIAL EN KALUNDBORG

1. Introducción

En el presente anexo se expone una visión general de la Ecología Industrial y se presenta una descripción detallada del modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg.

2. Ecología Industrial

2.1 Antecedentes

Desde la década de los 50 predominaba el concepto de “final de tubería” (*End of pipe*), el cual se basa en reducir el impacto medioambiental de las industrias mediante técnicas de control tales como filtros o depuradoras. Esta estrategia separa la industria del entorno, transfiriendo el contaminante de un medio a otro sin incentivar el ahorro y/o sustitución de recursos y sin producir beneficio económico. Aceptado el fracaso de estas técnicas, a comienzos de los años 70 aparecía el concepto de “producción limpia”, basado en técnicas preventivas, lo cual suponía un gran avance. Estas técnicas se demuestran más efectivas que las técnicas de control, tanto desde el punto de vista ambiental como económico, ya que implican la modificación de los procesos productivos para minimizar los residuos o su toxicidad; aunque siguen dirigiéndose a empresas e industrias individuales. Posteriormente, se consiguió que el medio ambiente fuera incluido dentro de la gestión global de la empresa, surgiendo el concepto de “gestión medioambiental”, tratando de combinar los aspectos técnicos necesarios para la adecuada resolución de los problemas con unas buenas prácticas de gestión empresarial.

1960 – 1970	La solución a la contaminación es la dilución.
1970 – 1980	Control de la contaminación.
1980 – 1990	Prevención de la contaminación.
1990 – ?	Gestión medioambiental. Ecología Industrial.

Tabla 10 – Evolución de la gestión medioambiental en la industria (Fuente: Fernández, 2003)

Respecto al origen de la Ecología Industrial, cabe destacar la publicación más nombrada en la literatura, el artículo *Strategies for manufacturing*, publicado en 1989 por la revista *Scientific American* y escrito por Robert Frosch (ex-administrador de la NASA y entonces director del Centro de Investigación y Desarrollo de *General Motors*) y Nicholas Gallopoulos (ingeniero colaborador de Frosch en *General Motors*). En él se introduce la idea de crear sistemas productivos que funcionen como los sistemas naturales:

“En el sistema industrial tradicional, cada operación de transformación, independientemente de las otras, consume materias primas, suministra los productos que son vendidos y los residuos que son almacenados; este método simplista debería ser reemplazado por un modelo más integrado: un ecosistema industrial [...]. Un ecosistema industrial podría funcionar como un ecosistema biológico: los vegetales sintetizan las sustancias que alimentan a los animales herbívoros, que a su vez son comidos por los animales carnívoros, y los desechos y cadáveres sirven para alimentar a otros organismos. Naturalmente no se podrá jamás establecer un ecosistema industrial perfecto, pero los industriales y consumidores deberían cambiar sus hábitos si quieren conservar o mejorar su nivel de vida, sin sufrir la degradación del ambiente” (Frosch y Gallopoulos, 1989).

A partir de entonces, la Ecología Industrial se desarrolló con fuerza, debido fundamentalmente al prestigio de la revista *Scientific American*, a la gran reputación de Frosch y Gallopoulos por su pertenencia a *General Motors* y a la publicación del conocido informe *Brundtland* en 1987, base del inicio de la expansión del concepto de desarrollo sostenible, definido como aquel que “*satisface las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras*” (WCED, 1987).

Desde entonces, la Ecología Industrial se ha ido ganando el reconocimiento del sector industrial, institucional y académico. Prueba de ello es que en 1997 nació la revista científica *Journal of Industrial Ecology* y en 2001 se inauguró la *International Society for Industrial Ecology* (Erkman, 2001).

2.2 Concepto

La Ecología Industrial es una temática interdisciplinar que intenta asimilar el funcionamiento de los sistemas industriales al de los naturales, con una interrelación entre industrias, el medio social y el natural que tienda a cerrar el ciclo de materia y a hacer eficientes los procesos internos. Examina a nivel local, regional y global los flujos y usos de materiales y energía en productos, procesos, sectores industriales y económicos centrando su atención en el papel de la industria como transformadora del entorno (Lowe, Warren y Moran, 1997).

Su principal reto es reorganizar el actual sistema industrial en profundidad, con el fin de ayudar al sistema a evolucionar su modo de operación hacia un desarrollo sostenible a largo plazo que lo haga compatible con la biosfera (Erkman, 2001).

La Ecología Industrial pretende que el sistema industrial opere de un modo más integrado, tratando de copiar lo más posible a la estructura y funcionamiento de los ecosistemas naturales. Se busca que se integre en la biosfera como un sistema más de ésta, atendiendo a las características que comparten. Ambos se componen de una

serie de organismos (naturales en un caso, empresas y consumidores en el otro) que se alimentan de flujos de materia, agua y energía para obtener productos o sustancias cuyo consumo satisface sus necesidades, garantizando la supervivencia del sistema. Por tanto, este punto de vista justifica la necesidad de considerar la actividad industrial como cíclica y simbiótica junto con la naturaleza, no lineal como se ha entendido hasta la actualidad.

Dada la analogía establecida con la naturaleza, el concepto más extendido en la bibliografía sobre Ecología Industrial es el de “ecosistema industrial”, el cual puede definirse como *“un grupo regional de firmas industriales y otras entidades, unidos juntos de una manera que les permita utilizar subproductos materiales y energía entre empresas de una manera mutuamente ventajosa”* (Manahan, 2007) o también, de un modo más idealizado, como aquel *“que captura y recicla todos los materiales internamente, consumiendo desde fuera sólo energía”* (Ayres y Ayres, 2006).

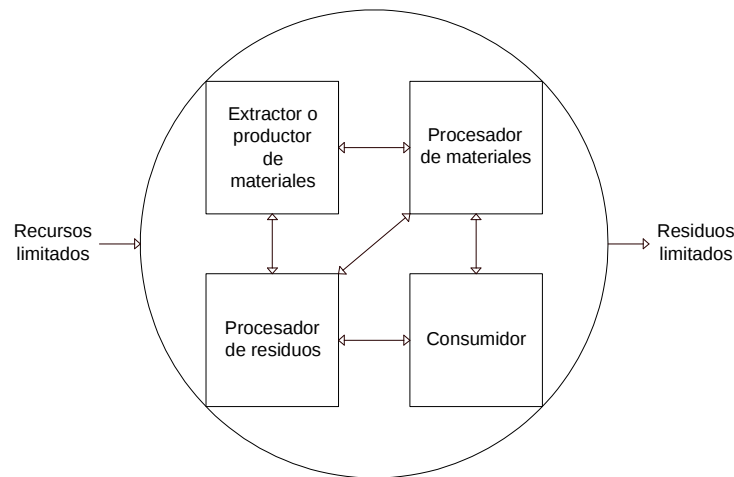


Figura 10 – Esquema de un ecosistema industrial ideal (Fuente: Bermejo, 2001)

Esta relación entre industrias quiere tender a cerrar el ciclo de materia y, por 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, tal como hacen los ecosistemas naturales (Lowe, 1998).

Pero la Ecología Industrial no se limita sólo a este método de cierre de ciclo de materia, sino que se sirve de muchos otros métodos que contribuyen a disminuir el impacto ambiental, mejorar la eficiencia y aumentar la rentabilidad, siempre tendiendo a hacia una mayor sostenibilidad (Cervantes, 2005).

Para la implementación de la Ecología Industrial es importante concretar los objetivos que ésta persigue, los cuales, atendiendo a la bibliografía consultada, pueden resumirse en cuatro objetivos básicos (Erkman, 2001):

1. Aprovechamiento sistemático de los residuos generados.
2. Minimizar la contaminación dispersa en el uso y consumo de productos y servicios.
3. Desmaterialización de la economía.
4. Minimizar la dependencia energética de los combustibles fósiles.

La consecución de los objetivos que propone la Ecología Industrial puede alcanzarse utilizando muchas y variadas herramientas (Cervantes, 2006):

- Análisis de Ciclo de Vida (ACV)
Consiste en evaluar los efectos ambientales de la actividad, proceso o producto que se esté considerando, desde “la cuna hasta la tumba”, es decir, desde el momento de la extracción de las materias primas hasta el momento en que éstas son devueltas a la naturaleza en forma de residuos o emisiones.
- Análisis de Flujo de Materia (AFM)
Cuantifica las entradas y salidas de recursos, en masa, de una economía (región o país).
- Diagramas de flujo
Diagramas donde se expresan los procesos que tienen lugar en una empresa, entidad, región, etc. Y se indican las materias primas, los residuos, emisiones y descargas, así como los materiales y energía intercambiados.
- Mercado de subproductos
Consiste en la compra-venta de residuos y/o subproductos entre entidades distintas.
- Metabolismo Industrial
Definidos como el uso de materiales y energía que fluyen a través de los sistemas industriales para su transformación y posteriormente su disposición como residuo.
- Análisis Económico Ambiental
Cuantifica las cargas económicas de un producto o servicio sobre el ambiente, basado en los costes de generación del producto y la explotación de recursos naturales para su elaboración, hasta los impactos ambientales por su posterior gestión como residuo.

- Producción más limpia

Definida como la aplicación continua de una estrategia ambiental preventiva para aumentar la eficiencia de productos, procesos y servicios y disminuir los riesgos para el hombre y el medio ambiente.

- Ecoeficiencia

Definida como la dotación de bienes y servicios a un precio competitivo, que satisfaga las necesidades humanas y la calidad de vida, al tiempo que reduzca progresivamente el impacto ambiental y la intensidad de la utilización de recursos a lo largo del ciclo de vida, hasta un nivel compatible con la capacidad de carga estimada del planeta.

- Prevención de la contaminación

Definida por la Agencia de Protección Ambiental como la reducción o eliminación de residuos en la fuente a través de la modificación de los procesos de producción, promoviendo el uso de sustancias no tóxicas o menos tóxicas, implementando técnicas de conservación y reutilizando materiales en lugar de incorporarlos al flujo de residuos.

Respecto al campo de aplicación, la Ecología Industrial puede aplicarse a diferentes escalas: a nivel de empresa, entre industrias y a nivel regional/global (Ehrenfeld y Chertow, 2002).

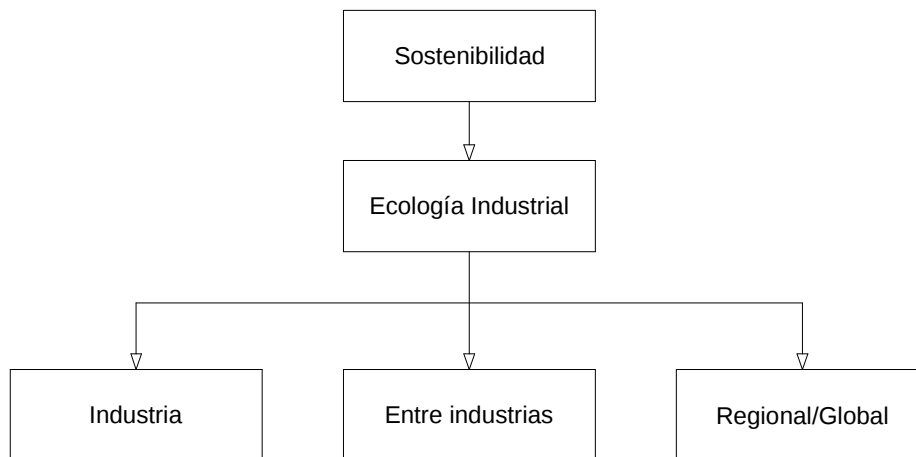


Figura 11 – Escalas de aplicación de la Ecología Industrial (Fuente: Ehrenfeld y Chertow, 2002)

Es fácil imaginar los beneficios económicos y medioambientales que este método comporta, ya que al ahorro de recursos se suma la minimización de residuos y la disminución de cargas contaminantes. A todo esto cabe añadir la mejora de la imagen

ambiental de las empresas, entidades y municipios y la mayor relación y colaboración dentro del sector industrial y del sector industrial con el medio social y natural (Lowe, 1998).

2.3 Ecoparque industrial

La aplicación práctica de la Ecología Industrial implicó la aparición del término ecoparque industrial, debido fundamentalmente al interés de generar desarrollo económico a partir del desarrollo industrial que pueda generar la aplicación de la Ecología Industrial.

El concepto de ecoparque industrial fue desarrollado por *Indigo Development* a principios de los años 90 y se define como un conjunto de actividades industriales ubicadas en una misma área geográfica, las cuales tratan de mejorar su gestión medioambiental, económica y social a través de la colaboración y cooperación entre ellas pudiendo compartir información, energía, materiales, residuos, infraestructuras, recursos humanos, etc. Al trabajar conjuntamente, la comunidad busca alcanzar un beneficio colectivo mayor que la suma de los beneficios individuales que cada empresa pueda obtener con la optimización propia individualizada (Lowe, 2001).

El objetivo principal es que las empresas obtengan ahorros económicos minimizando sus impactos ambientales. Para ello es imprescindible superar el concepto tradicional de parque industrial en el cual se implantan industrias bajo ningún criterio organizativo. Un ecoparque industrial debe estar diversificado de manera que existan industrias que empleen como materia prima los residuos de otras. Esto implica que las empresas tengan una escala adecuada, capaz de aprovechar los subproductos. Por tanto, esta evolución requiere la cooperación y planificación a largo plazo entre las empresas y un mecanismo que la garantice.

Según Lowe (2001), adicionalmente al concepto de ecoparque industrial, existen dos categorías más a considerar:

- Intercambio de subproductos

El concepto de intercambio de subproductos se observa en la literatura con multitud de denominaciones: ecosistema industrial, sinergia de subproductos, simbiosis industrial, etc. Consiste en crear un sistema de comercialización de materiales, energía, agua y subproductos entre las empresas, dentro de un ecoparque industrial, zona y/o región. Los participantes pretenden dar uso a los recursos que no aprovechan para reducir la contaminación, reducir los costes de eliminación y a menudo, obtener nuevos ingresos económicos.

- Ecorred industrial

Una ecorred industrial puede incluir empresas independientes, empresas en parques o ecoparques industriales y las organizaciones de gestión del parque. Los miembros colaboran para mejorar su rendimiento y crear los servicios e instalaciones compartidas. Una forma de colaboración es el intercambio de subproductos.

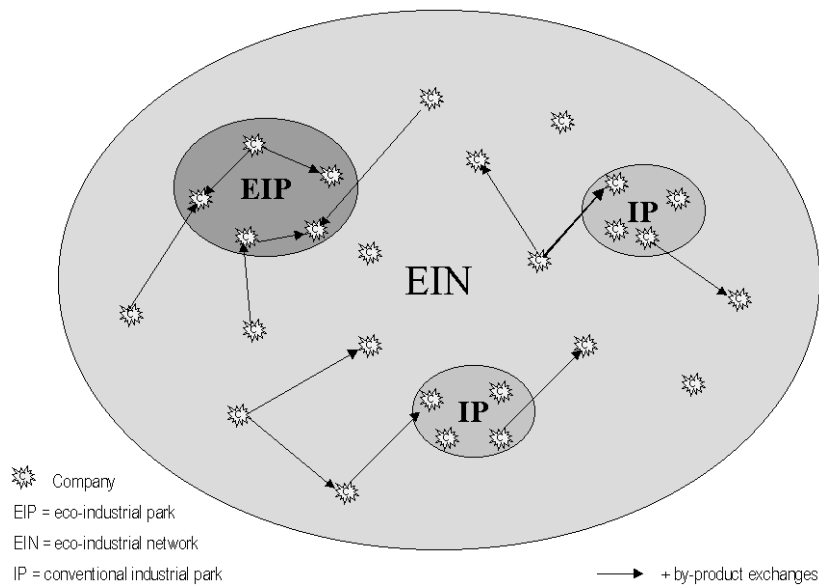


Figura 12 – Ecorred industrial (Fuente: Lowe, 2001)

Los beneficios generales que podrán obtener las empresas como resultado del trabajo conjunto en un ecoparque industrial son:

- Uso eficiente de recursos.
- Reducción impacto ambiental.
- Tratamiento conjunto de residuos.
- Acceso a la información.
- Capacidad de negociación.
- Potencial para atraer proyectos I+D+i.
- Desarrollo conjunto de proyectos.
- Mejora de las condiciones de la zona.
- Atracción de nuevas empresas y arraigo de las existentes.
- Prestigio internacional.

3. Modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg

3.1 Antecedentes

A 100 kilómetros al oeste de Copenhague se encuentra Kalundborg, ciudad que posee una zona industrial al margen de la costa danesa. Allí nació y se desarrolló sin planificación alguna una red de intercambio de residuos, a la que se le dio el nombre de Simbiosis Industrial y que ha sido hasta la fecha, el programa más completo en cuanto a intercambio de subproductos de refiere. Nació prácticamente por casualidad cuando unas pocas empresas, tratando de reducir costes y cumplir con la legislación medioambiental del país, buscaron alternativas en la gestión de sus residuos y el aprovechamiento del agua subterránea (Cervantes et al, 2009).

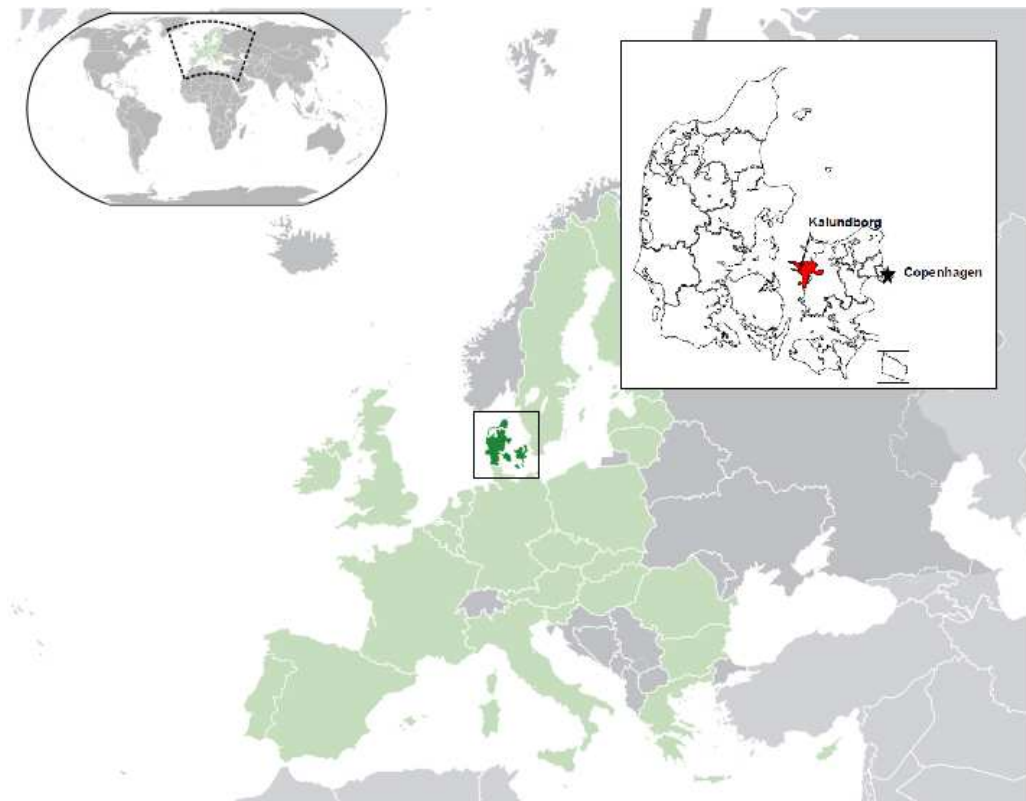


Figura 13 – Localización de Kalundborg (Elaboración propia a partir de varias fuentes)

Cabe destacar que la ciudad de Kalundborg posee un estrés hídrico importante en lo que se refiere a agua subterránea, lo cual obligó a los consumidores masivos a implantar medidas que aseguraran un consumo razonable de tan valioso recurso hídrico. Con esta premisa se inició una nueva conciencia de valoración de la reserva natural al definir cuál era el ambiente natural que debía ser mantenido bajo cualquier circunstancia, puesto que desempeñaba funciones ambientales primordiales e

irreemplazables. De este modo se propició el aprovechamiento de materiales intangibles que fluían a través de las industrias de la ciudad. Usualmente, éstos se convertían en residuos, pero con este cambio estructural pasaron a ser administrados como subproductos para generar ahorros (Pinzón, 2009).

3.2 Concepto de Simbiosis Industrial

El modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg, también denominado ecosistema o ecoparque industrial, se basa esencialmente en conectar físicamente a empresas vecinas de cara al intercambio prolongado de agua, materiales (transformación de residuos en subproductos utilizables por otras empresas) y energía, con el fin de reducir costes de producción y tratamiento de residuos.

No existe una definición estándar para la Simbiosis Industrial, sin embargo puede expresarse como el intercambio de materiales entre varios sistemas productivos de forma que el residuo de uno es materia prima para otros y su implantación promueve una red de empresas (Cervantes et al, 2009).

En general, se consideran tres posibles oportunidades en el intercambio de recursos (Chertow, 2007):

1. Reutilización de subproductos
2. Compartir infraestructura
3. Provisión conjunta de servicios

Puesto que la idea es conectar físicamente empresas vecinas de cara al intercambio prolongado de agua, energía y subproductos, las claves de la Simbiosis Industrial son la colaboración y las posibilidades de sinergia que ofrece la proximidad geográfica (Chertow, 2007).

Para distinguir la Simbiosis Industrial de otros tipos de intercambios, se utiliza la “Heurística 3-2”, la cual establece como criterio mínimo que al menos tres entidades diferentes deben participar en el intercambio de al menos dos tipos de recursos para ser considerado como un caso básico de Simbiosis Industrial. Además, ninguna de las tres entidades puede basar su actividad industrial en el reciclaje (Chertow, 2007).

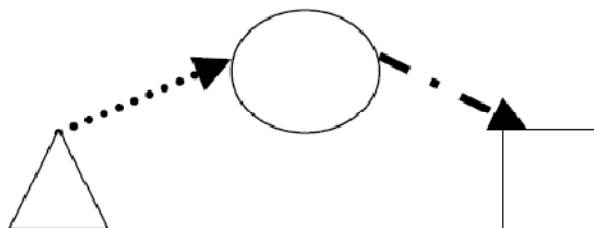


Figura 14 – Heurística 3-2 (Fuente: Chertow, 2007)

3.3 Integrantes

Conviene destacar que el proceso de gestación del modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg descansa en la cooperación, que se ve facilitada por la convivencia de sus protagonistas en la pequeña ciudad de Kalundborg.

En la actualidad el ecosistema industrial de Kalundborg lo forman principalmente cinco integrantes: *Asnaes DONG Energy* (central térmica), *Statoil* (refinería), *Gyproc* (fabricante de placas de yeso), *Novo Group* (empresa farmacéutica y de biotecnología) y la ciudad de Kalundborg; los cuales, junto a otros diez componentes, configuran el modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg:

1. Asnaes

Central térmica perteneciente a la empresa *DONG Energy*. Se abastece principalmente de carbón y opera como central de cogeneración produciendo tanto energía eléctrica como térmica.

Es la central con mayor capacidad en generación eléctrica de Dinamarca. Las unidades de producción 1 y 2 se pusieron en funcionamiento en los años 1959 y 1961, mientras que las unidades 3 y 4 en 1967 y 1968. La unidad 5, la más nueva y grande de la central, comenzó a producir a partir de 1981. La unidad 1, la más antigua de la central, dejó de operar en 1998 después de 210.000 horas de funcionamiento, y cuatro años más tarde, en 2002, le tocó el turno a la unidad 3.



Figura 15 – Central térmica *Asnaes* (Fuente: www.dongenergy.com)

Por tanto, la central térmica *Asnaes* posee actualmente tres unidades de producción (2, 4 y 5), cuenta con una potencia eléctrica de 1.057 MW y una potencia térmica de 602 MW. Sin embargo, las unidades 2 y 5 son las únicas

que se encuentran en funcionamiento después de que, en 2008, la unidad 4 fuera retirada de la producción diaria quedando como unidad de repuesto.

En la tabla siguiente se detallan los datos técnicos de las tres unidades de producción existentes actualmente en la central térmica *Asnaes*:

	Unidad 2	Unidad 4	Unidad 5
Puesta en funcionamiento	1961	1968	1981
Rehabilitación	1989, 2002	-	2004
Combustible	Carbón/petróleo	Carbón/petróleo	Carbón/petróleo
Presión vapor (bar)	155	180	180
Temperatura vapor (°C)	545	545	545
Potencia eléctrica (MW)	147	270	640
Potencia calefacción central (MW)	100	-	150
Potencia vapor (MW)	144	50	158
Modo de operación	Carga máxima	Reserva	Carga base
Producción (h/año)	1500	-	6200

Tabla 11 – Datos técnicos de las unidades de producción de *Asnaes* (Fuente: Larsen et al, 2007)

En la central se llevan a cabo tareas de mantenimiento continuamente y ha sido mejorada técnicamente en numerosas ocasiones con el fin de reducir su impacto en el medio ambiente y/o alargar la vida de algunas de sus unidades. La unidad 2, la más antigua de las tres existentes, se ha renovado en dos ocasiones, en 1989 y 2002, lo que ha permitido ampliar su vida útil unos 15 años más. En 2004 se instaló un sistema de desnitrificación catalítica selectiva con amoníaco para la unidad 5, mediante la cual se redujeron un 85% las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) a la atmósfera. Al mismo tiempo se amplió la vida útil de la unidad, como mínimo, hasta el año 2016. Tanto la unidad 2 como la 5, cuentan con sistemas de desulfuración y separación de cenizas volantes de los gases de combustión. La desulfuración se lleva a cabo mediante una lechada de caliza que permite la eliminación del dióxido de azufre de los gases de combustión con una eficiencia superior al 98%. Mientras que la separación de las cenizas volantes producidas por la combustión del carbón son separadas de los gases mediante un precipitador electrostático. Sin embargo, la unidad 4, la que actúa como unidad de repuesto, no está equipada con los sistemas de desnitrificación ni desulfuración.

La central térmica está preparada para consumir tanto carbón como petróleo, aunque el carbón es el principal combustible de las unidades 2, 4 y 5, quedando el petróleo como combustible de reserva. *DONG Energy* importa carbón para sus centrales desde numerosos países del mundo, como puedan

ser: Polonia, Rusia, Colombia, Noruega, Indonesia, Sudáfrica, Australia o China. El carbón es transportado mediante barco y almacenado en la central, donde se tiene una capacidad de almacenamiento de 1,5 millones de toneladas. Mientras que los tanques de petróleo pueden almacenar hasta 470.000 toneladas.

Asnaes constituye el corazón del ecosistema industrial dado que además de ser el principal productor primario de energía del ecoparque, es el componente que más activamente participa en el intercambio de subproductos.

2. Statoil

Statoil es la mayor refinería de petróleo de Dinamarca, la cual posee una capacidad para procesar 550.000 toneladas de petróleo al año. Su actividad industrial consiste en la obtención de productos petrolíferos a partir de petróleo crudo y condensado.



Figura 16 – Refinería *Statoil* (Fuente: www.statoil.com)

La refinería se puso en funcionamiento en 1961, aunque a lo largo de los años ha ido ampliándose. En 1995, se llevó a cabo la puesta en marcha de una planta de destilación de petróleo condensado, el cual se caracteriza por ser un petróleo más liviano. La construcción de dicha planta permitió a la refinería procesar gran cantidad de petróleo condensado y producir gasolina con bajo contenido en benceno. De hecho, en 1997, *Statoil* comenzó a comercializar en Dinamarca gasolina con tan sólo un 1% de benceno, y actualmente, también comercializa gasolina y gasóleo con un contenido de azufre de sólo un 0,001%.

Statoil produce gases licuados del petróleo, nafta, gasolina, queroseno, gasóleo, fueloil ligero y pesado, mientras que su principal mercado se sitúa en Dinamarca, Noruega, Suecia y el noroeste de Europa.

La refinería procesa mayoritariamente petróleo de la plataforma continental noruega aunque también recibe petróleo de Oriente Medio. Todo el petróleo es transportado hasta la refinería mediante petroleros y la mayoría de los productos obtenidos también son transportados vía marítima. Anualmente, alrededor de 730 barcos llegan al puerto de la refinería.

3. *Novo Group (Novo Nordisk y Novozymes)*

Novo Nordisk es una empresa farmacéutica y de biotecnología que tiene como producto más importante la insulina. La planta industrial de Kalundborg fue construida en 1969, situándose como la más grande de la empresa. En el año 2000, se lleva a cabo una reestructuración empresarial que da lugar a la creación de *Novozymes*, empresa dedicada a la producción de enzimas industriales. Desde entonces, *Novo Nordisk* y *Novozymes* operan independientemente pero comparten la fábrica de Kalundborg bajo el nombre de *Novo Group*. Actualmente, entre ambas poseen más de 4.000 empleados.



Figura 17 – *Novo Nordisk y Novozymes* (Fuente: www.novonordisk.com)

Su fuerte y rápida expansión a lo largo de los últimos años ha supuesto también una mayor demanda de recursos en forma de agua y energía, lo cual ha impulsado medidas de ahorro para limitar el volumen de recursos empleados por unidad producida y cumplir los objetivos establecidos. También se ha actuado contra otros impactos tales como los olores o las emisiones de enzima y se han desarrollado procesos para el tratamiento y eliminación de residuos líquidos, principalmente biomasa y aguas residuales.

Aproximadamente la mitad de las materias primas empleadas son productos agrícolas que contienen almidón y proteínas y menos del 1% son sustancias peligrosas para el medio ambiente o para la salud. Los residuos líquidos de los procesos de producción se dividen en dos categorías: la biomasa que comprende los residuos de nutrientes, microorganismos y agua; y las aguas residuales que contienen pequeñas cantidades de materia orgánica y sales nutrientes. El 95% del nitrógeno y el 99% del fósforo que contienen dichos residuos líquidos se reciclan produciendo abono para la agricultura y levadura que sirve como suplemento alimenticio para cerdos.

4. Gyproc

Gyproc es una empresa que pertenece al grupo *Saint-Gobain* y se dedica a la fabricación de placas de yeso para construcción. Se inauguró en 1972 y produce anualmente más de 200.000 m² de paneles de yeso.



Figura 18 – Gyproc (Fuente: www.gyproc.dk)

El yeso utilizado en *Gyproc* proviene de tres fuentes diferentes, por un lado se procesa yeso reciclado de demoliciones, obras y centros de reciclaje, por otro lado se recibe yeso “industrial”, el cual se obtiene en el proceso de

desulfuración de gases de combustión en centrales térmicas de carbón, y por último yeso de origen natural procedente de España. Además, se emplea también papel reciclado en la fabricación del cartón-yeso.

El programa gestión ambiental que se lleva a cabo en *Gyproc* tiene como objetivos: minimizar los residuos, el consumo energético y las emisiones en la fabricación de sus productos. De hecho, más de la mitad de las materias primas utilizadas en la fabricación de placas de yeso proceden del reciclaje o son subproductos de otros procesos. Con la instalación de intercambiadores de calor se ha logrado una optimización en la recuperación de calor a lo largo de todo el proceso de producción. También se han implantado medidas que han permitido que se reduzca tanto el consumo de agua como los vertidos generados.

5. Municipio de Kalundborg

El municipio de Kalundborg posee 20.000 habitantes y está situado en la costa oeste de la isla de Zealand en Dinamarca. Desde 2007, la municipalidad de Kalundborg agrupa también los municipios de Goerlev, Hvidebaek, Bjersted y Hong; sumando una superficie de 604 km², 160 km de costa y una población de 49.000 habitantes. Por el este limita con Goerlev, Hvidebaek y Bjersted. Por el norte limita con el estrecho de Samsø frente a la isla de Samsø y la bahía e isla de Sejrø. Por el oeste está el gran estrecho que lo separa de la isla de Funen. Al sur está la bahía de Jammerlang. Es decir, Kalundborg está rodeado de agua por tres lados, en frente de los municipios de Samsø y Juelsminde.

El puerto marítimo de Kalundborg es uno de los principales puertos de Dinamarca. Es un puerto pesquero, de transporte de personas y de mercancías; alrededor de 50 empresas alquilan sus servicios, las cuales mueven 3,5 millones de toneladas anuales de mercancías en sus 800.000 m² de superficie portuaria.

Kalundborg se sitúa como la mayor región industrial de las afueras de Copenhague. De hecho, aproximadamente el 9% de las emisiones globales de CO₂ de Dinamarca proceden de las industrias de Kalundborg. A raíz de ello, Kalundborg se ha caracterizado por su preocupación por el medio ambiente; a lo largo de los años ha hecho hincapié en la importancia de la sostenibilidad y la promoción de tecnologías respetuosas con el medio ambiente que le ha permitido configurar la red de intercambio de recursos energéticos, hídricos y de residuos denominada Simbiosis Industrial. La ciudad de Kalundborg es partícipe del ecosistema industrial a través del sistema de calefacción central

(*District Heating*) y de la estación depuradora de aguas residuales, la cual en 2008 destacaba por ser la más grande, moderna y eficiente del norte de Europa (www.symbiosis.dk).

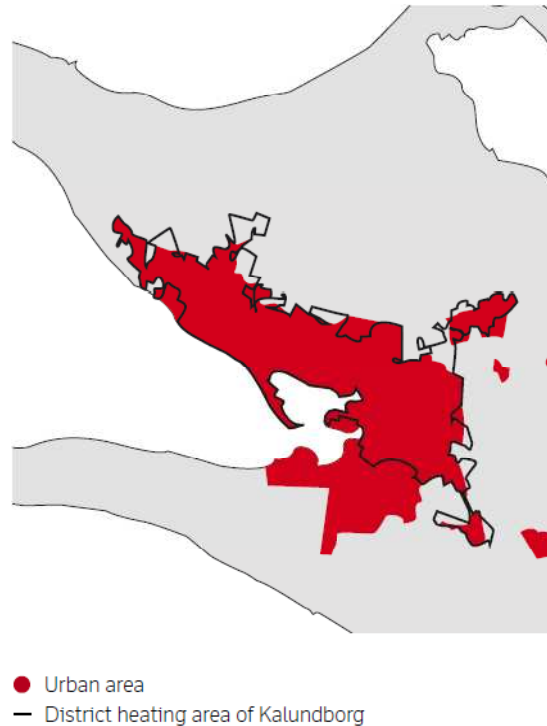


Figura 19 – Área de suministro de *District Heating* (Fuente: www.dongenergy.com)

6. Kara/Noveren

Es la empresa más grande de la isla de Zealand dedicada al tratamiento de residuos. Más del 80% de los residuos recibidos se recicla obteniendo nuevas materias primas en forma de papel, plástico, vidrio, metal o material para la construcción. Mientras que los residuos domésticos de más de 150.000 hogares, alrededor de 1,5 millones de toneladas anuales, son incinerados proporcionando electricidad y calor a más de un tercio de estos hogares.

7. RGS 90

RGS 90, anteriormente *Biotechnisk Jordrens Soilrem*, se dedica al reciclaje de residuos cuya actividad se centra en el tratamiento de tierras contaminadas por hidrocarburos, solventes orgánicos y metales pesados. Los contaminantes se eliminan mediante un proceso denominado biorremediación, basado esencialmente en la capacidad de los microorganismos para degradar de forma natural ciertas sustancias tóxicas transformándolas en otras químicamente distintas e inocuas.

8. Inbicon

Inbicon es una compañía propiedad de *DONG Energy* que posee una planta de producción de bioetanol de segunda generación a partir de paja de trigo. La planta fue inaugurada en noviembre de 2009 y desde entonces ha operado a escala casi comercial.

9. Nordisk Aluminat

Nordisk Aluminat se ubica en Kalundborg en el año 1991 y centra su actividad en la fabricación de productos químicos a partir de aluminio. Basa su producción en distintos tipos de aluminatos los cuales se emplean en multitud de procesos industriales como por ejemplo en el tratamiento de aguas residuales o en la proyección de hormigón por vía húmeda.

10. Aalborg Portland

Aalborg Portland es una empresa situada en Korsør, a unos 50 kilómetros de Kalundborg, que se dedica a la fabricación de una amplia gama de cementos y otros pavimentos. Perteneció al grupo cementero italiano *Cementir Holding*. *Aalborg Portland* es el único fabricante en Dinamarca de cemento gris y blanco con una capacidad anual de 3 millones de toneladas.

11. Aluscan

La empresa *Aluscan* está especializada en recubrimientos y tratamientos superficiales de metales, especialmente en el anodizado y cromado. Se ubica al igual que *Aalborg Portland* en Korsør.

12. Piscifactoría

La piscifactoría pertenece a *Asnaes* y se puso en funcionamiento con el objetivo de minimizar la contaminación térmica originada por el agua de refrigeración de la central térmica. Dispone de 57 estanques y su capacidad de producción es de 200 toneladas de salmón y trucha de mar al año.

13. Planta de fertilizantes

La planta de fertilizantes pertenece a *Statoil* y utiliza un proceso patentado por *Denmark's Haldor Topsøe* que permite la producción de fertilizante a partir del azufre obtenido en las unidades de desulfuración de la propia refinería.

14. Explotaciones ganaderas

Las granjas de cerdos consumen la levadura comercializada por *Novo Group* que sirve como suplemento alimenticio rico en proteínas, mientras que la melaza obtenida en la producción de bioetanol también se destina a alimentación animal.

15. Explotaciones agrícolas

Las explotaciones agrícolas por un lado reciben gratuitamente fertilizante obtenido a partir de residuos líquidos de *Novo Group* y por otro lado suministran desechos agrícolas a *Inbicon*.

El ecosistema industrial cuenta asimismo con un Centro de Simbiosis Industrial. Dicho proyecto está financiado por sus socios a través de una cuota anual de 10.000 €. El centro cuenta con dos personas contratadas y es responsable de las siguientes actividades:

- Recogida de información sobre simbiosis industrial y otros ejemplos de ecología industrial.
- Comunicación de la experiencia del proyecto de simbiosis industrial.
- Organización de visitas.
- Coordinación de estudios sobre la simbiosis industrial.
- Consulta sobre nuevos proyectos de simbiosis.
- Contribución para formar nuevos proyectos de simbiosis.

De cara al futuro, los retos del Centro de Simbiosis Industrial de Kalundborg son:

- Incluir fuentes de energía renovables tales como biomasa, biogás, energía solar o energía geotérmica.
- Minimizar al máximo el uso de recursos hídricos naturales mediante la reutilización de aguas residuales.
- Innovar nuevas formas de aprovechar los residuos generados.

3.4 Desarrollo cronológico

Dada la gran cantidad y diversidad de proyectos que conforman a día de hoy el ecosistema industrial de Kalundborg, cabe destacar la importante y laboriosa búsqueda bibliográfica realizada, puesto que son escasas las fuentes bibliográficas que aportan información detallada sobre los distintos flujos existentes, y más aún sobre los proyectos implantados recientemente.

Se ha creído oportuno incluir un desarrollo cronológico con los hitos más destacables del modelo de Simbiosis Industrial para mostrar la evolución que ha sufrido desde sus inicios hasta la actualidad y además facilitar la comprensión de la compleja red de intercambio de subproductos existente.

1959 – Apertura central térmica de carbón (*Asnaes*).

1961 – Apertura refinería de petróleo (*Statoil*) y construcción de una tubería de suministro de agua desde el lago Tisso.

1970 – Apertura planta de fabricación de placas de yeso (*Gyproc*).

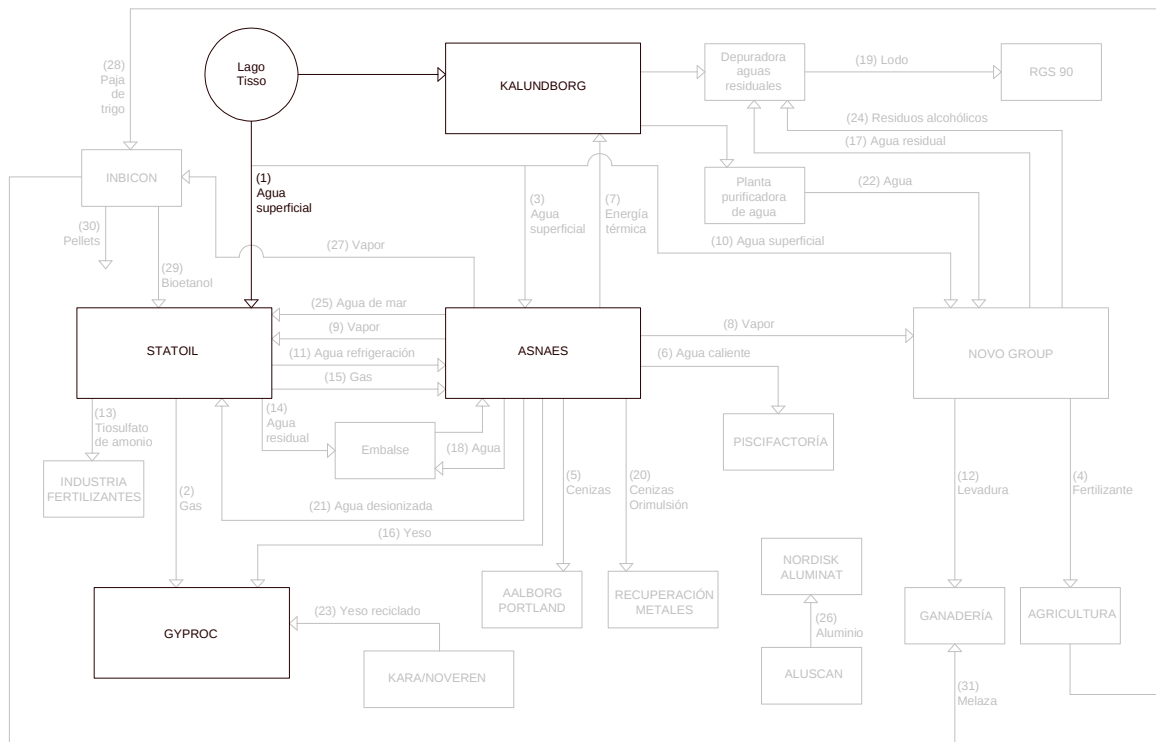


Figura 20 – Estado Simbiosis Industrial en 1970 (Elaboración propia a partir de Andersen, 2011)

1972 – Construcción de una tubería que suministra a *Gyproc* gas butano excedente desde *Statoil*.

1973 – Ampliación de la central térmica, lo cual conlleva la construcción de una conexión con la tubería que abastece hídricamente a la refinería desde el lago Tisso.

1976 – *Novo Nordisk* comienza a distribuir gratuitamente biomasa residual a los agricultores.

1979 – La central térmica comienza a suministrar ceniza a fábricas de cemento como *Aalborg Portland*.

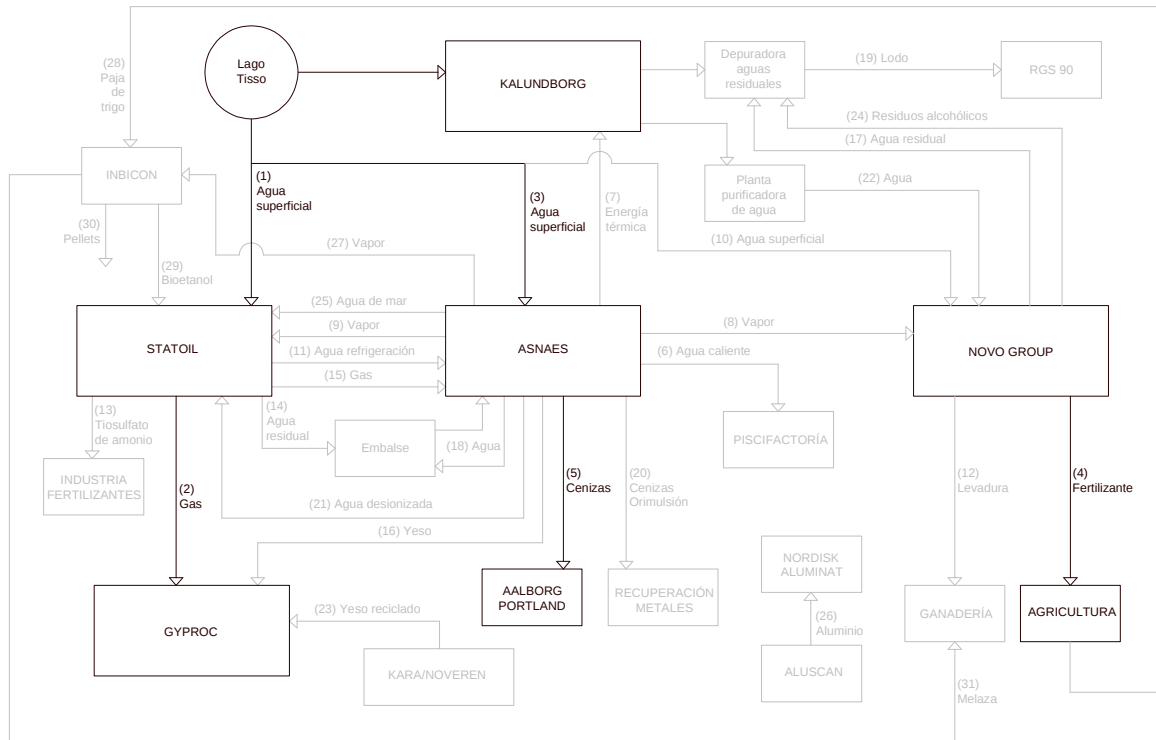


Figura 21 – Estado Simbiosis Industrial en 1980 (Elaboración propia a partir de Andersen, 2011)

1981 – El Ayuntamiento de Kalundborg completa la red de distribución de *District Heating* utilizando energía térmica de la central térmica.

1982 – Finaliza la construcción de la infraestructura de abastecimiento de vapor desde la central térmica a las empresas *Novo Nordisk* y *Statoil*.

1987 – *Statoil* finaliza la construcción de una tubería para suministrar agua de refrigeración a la central térmica.

1989 – La central térmica comienza a emplear agua salada proveniente del proceso de refrigeración del condensador de la central en una piscifactoría.

1989 – *Novo Nordisk* incrementa su demanda de agua y alcanza un acuerdo con el Ayuntamiento de Kalundborg, *Asnaes* y *Statoil* para conectarse a la red de abastecimiento de agua desde el lago Tisso.

1989 – *Novo Nordisk* empieza a suministrar levadura procedente de la producción de insulina a explotaciones ganaderas.

1990 – *Statoil* finaliza la construcción de una planta de desulfuración de gas donde se recupera el azufre, el cual se vende como materia prima para una empresa de fabricación de ácido sulfúrico (*Kemira*).

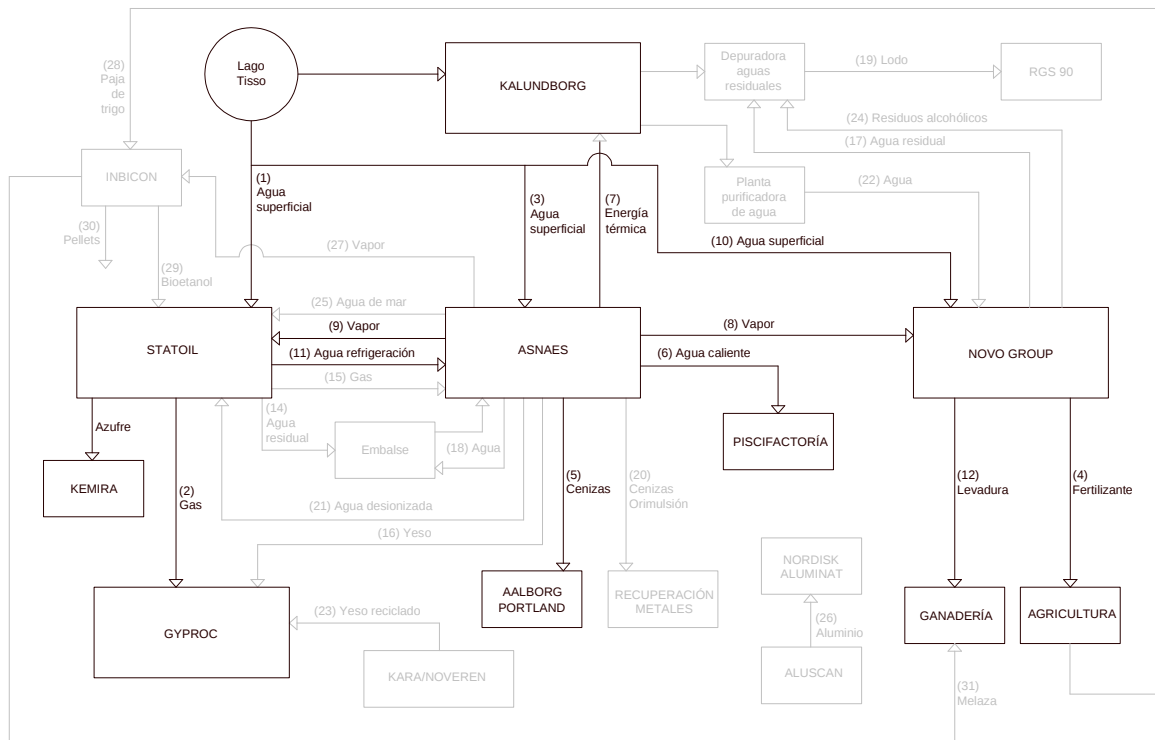


Figura 22 – Estado Simbiosis Industrial en 1990 (Elaboración propia a partir de Andersen, 2011)

1991 – Construcción de una tubería que suministra agua residual tratada proveniente de *Statoil* para su utilización en la central térmica.

1992 – Construcción de una tubería desde *Statoil* para abastecer de gas excedente a la central térmica como combustible suplementario.

1992 – *Statoil* deja de vender azufre a *Kemira*, el cual se comienza a utilizar para producir fertilizante líquido.

1993 – *Asnaes* termina la construcción de la unidad de desulfuración de los gases de combustión. El proceso genera yeso, el cual es vendido a *Gyproc*.

1994 – *Asnaes* comienza a utilizar Orimulsión como combustible hasta 2003.

1995 – Construcción de una tubería de aguas residuales de *Novo Nordisk* a la estación de depuración de aguas residuales de la ciudad de Kalundborg.

1995 – *Asnaes* construye un embalse con una capacidad para almacenar 200.000 metros cúbicos de agua.

1998 – *RGS 90* se comienza a abastecer de lodos procedentes de la estación de depuración de aguas residuales de Kalundborg.

2000 – La ceniza derivada de la combustión de Orimulsión se envía a una empresa de Reino Unido especializada en la recuperación de metales.

2000 – *Novo Nordisk* lleva a cabo una escisión empresarial creando *Novozymes*, la nueva empresa se dedica a la producción de enzimas industriales.

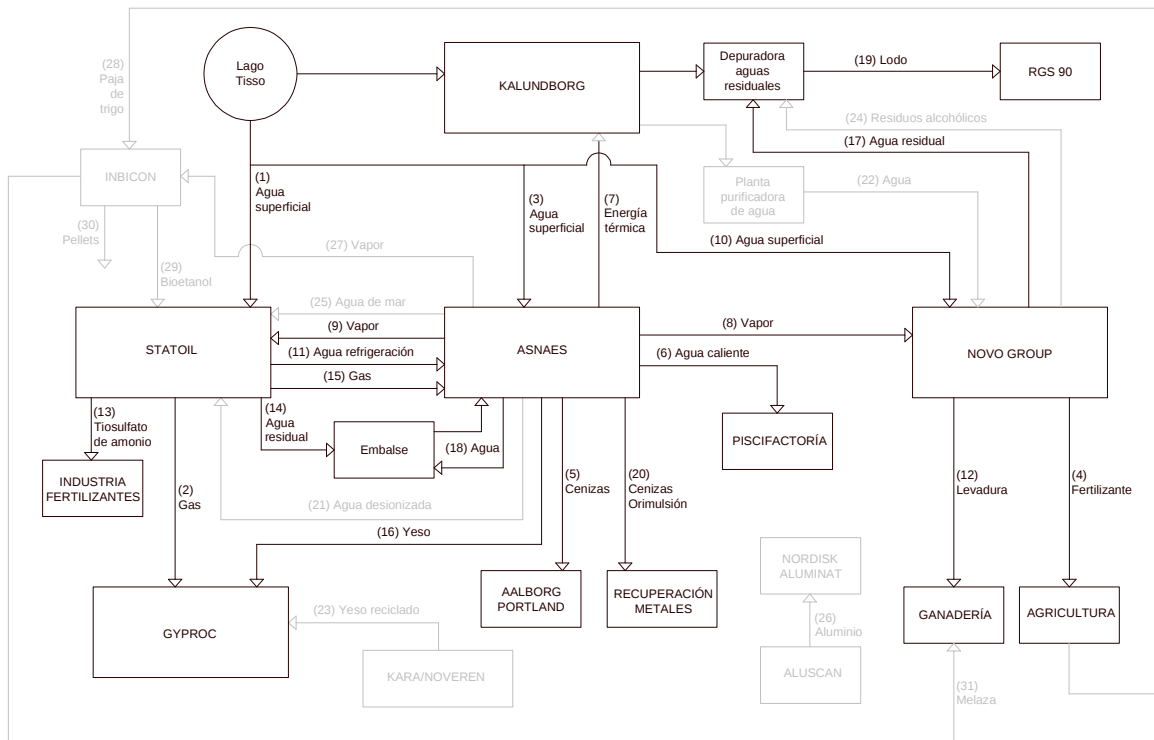


Figura 23 – Estado Simbiosis Industrial en 2000 (Elaboración propia a partir de Andersen, 2011)

2002 – *Asnaes* comienza a suministrar agua desionizada a *Statoil*.

2004 – Ampliación en *Novo Group* que conlleva la construcción de una nueva infraestructura de abastecimiento de agua purificada desde Kalundborg.

2005 – *Kara/Noveren* comienza a suministrar yeso reciclado para su reutilización en *Gyproc*.

2006 – Construcción de una tubería que bombea residuos alcohólicos procedentes de *Novo Group* a la estación de depuración de aguas residuales municipal.

2007 – *Asnaes* empieza a suministrar agua de mar a *Statoil*.

2008 – *Aluscan* envía lodos residuales que contienen aluminio a la empresa *Aluminat Nordisk*.

2009 – Apertura de *Inbicon*, empresa dedicada a la producción de bioetanol de segunda generación. Se abastece de biomasa residual procedente del sector agrícola

y de vapor procedente de *Asnaes*. Suministra el bioetanol producido a *Statoil* y convierte sus residuos en biocombustible y alimento para animales.

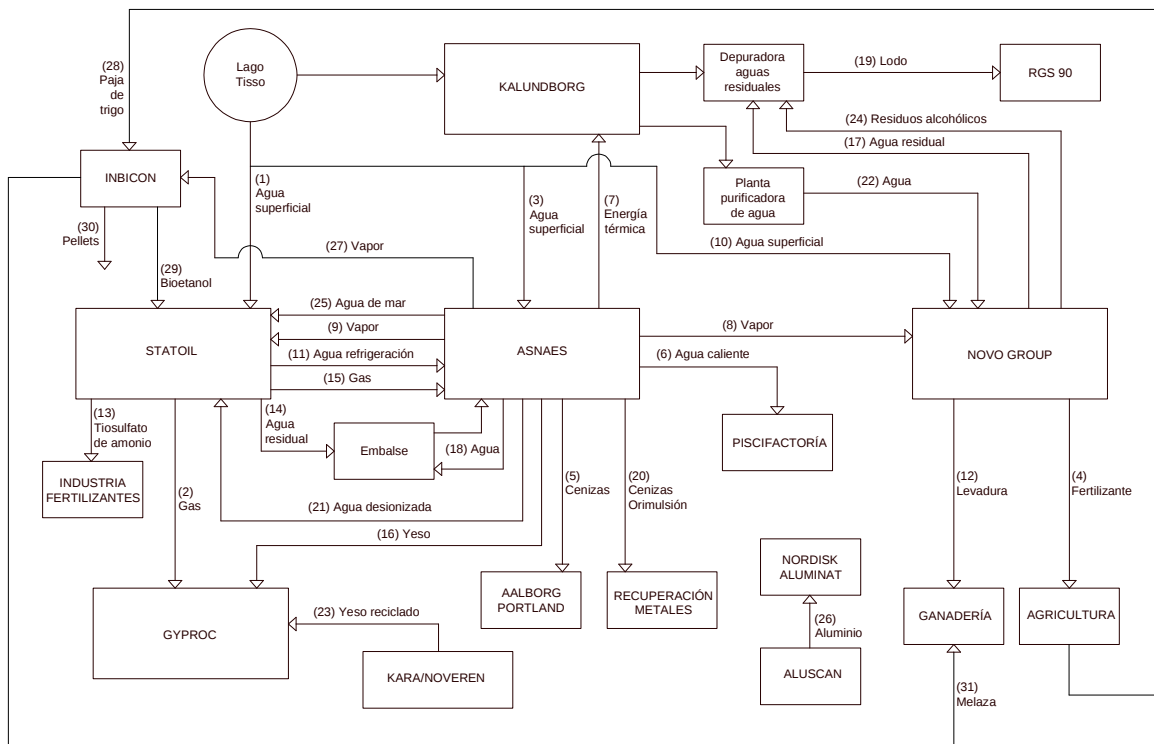


Figura 24 – Estado Simbiosis Industrial en 2009 (Elaboración propia a partir de Andersen, 2011)

3.5 Flujos

El objetivo final de la búsqueda bibliográfica realizada es conocer cualitativa y cuantitativamente todos los flujos que configuran la Simbiosis Industrial. Cualitativamente, son pocas las fuentes consultadas que aporten información detallada al respecto, en general tratan la Simbiosis Industrial a grandes rasgos y de forma redundante entre unas y otras. A pesar de ser el modelo que mayor reconocimiento goza en la aplicación de la Ecología Industrial, no existe ningún estudio completo del mismo. Cuantitativamente, son aún menos las fuentes que aporten datos concretos sobre los flujos, ni siquiera en la página web del Centro de Simbiosis Industrial se tratan todos los flujos existentes. En este sentido, existe el hándicap de lograr que las empresas participantes saquen a la luz públicamente datos actualizados sobre los flujos que forman parte de la Simbiosis Industrial.

Sobre los datos numéricos recopilados de la bibliografía consultada, ya sea por variaciones en el volumen de producción o cambios en los procesos productivos, en algunos casos varían sustancialmente de unos años a otros. Este hecho dificulta en gran medida la caracterización cuantitativa de los flujos si no se analiza cada uno de los flujos.

En la siguiente tabla se muestran resumidos los flujos que configuran la Simbiosis Industrial, con los datos recopilados:

Nº	Flujo	Tipo	Cantidad anual	Fuente
1	Agua superficial	Hídrico	1.600.000 m ³	Jacobsen, 2006
2	Gas	Energético	8.000 t	Lowe, 2001
3	Agua superficial	Hídrico	686.000 m ³	Jacobsen, 2006
4	Fertilizante	Subproducto	150.000 t	www.symbiosis.dk
5	Cenizas	Subproducto	200.000 t	Lowe, 2001
6	Agua caliente	Energético	390.000 GJ	Jacobsen, 2006
7	Energía térmica	Energético	931 TJ	Jacobsen, 2006
8	Vapor	Energético	1.500 TJ	www.symbiosis.dk
9	Vapor	Energético		
10	Agua superficial	Hídrico	491.000 m ³	Jacobsen, 2006
11	Agua refrigeración	Hídrico	483.000 m ³	Jacobsen, 2006
12	Levadura	Subproducto	92.000 m ³	www.novonordisk.com
13	Tiosulfato de amonio	Subproducto	2.800 t	Lowe, 2001
14	Agua residual	Hídrico	9.000 m ³	Jacobsen, 2006
15	Gas	Energético	60.000 t	Lowe, 2001
16	Yeso	Subproducto	80.000 t	Lowe, 2001
17	Agua residual	Hídrico	2.300.000 m ³	Jacobsen, 2006
18	Agua	Hídrico	200.000 m ³	Jacobsen, 2006
19	Lodo	Subproducto	-	-
20	Cenizas Orimulsión	Subproducto	-	-
21	Agua desionizada	Hídrico	50.000 m ³	Jacobsen, 2006
22	Agua purificada	Hídrico	-	-
23	Yeso reciclado	Subproducto	8.000 t	Grann, 1997
24	Residuos alcohólicos	Hídrico	-	-
25	Agua de mar	Hídrico	-	-
26	Aluminio	Subproducto	-	-
27	Vapor	Energético	-	-
28	Paja de trigo	Subproducto	30.000 t	www.inbicon.com
29	Bioetanol	Energético	4.300 t	www.inbicon.com
30	Pellets	Subproducto	8.250 t	www.inbicon.com
31	Melaza	Subproducto	11.100 t	www.inbicon.com

Tabla 12 – Caudal de los flujos de la Simbiosis Industrial

Conviene destacar que cada intercambio ha sido objeto de una negociación separada y confidencial, lo que ha dado lugar a múltiples formas de transacción: venta directa, trueque, derecho a la obtención de un buen precio a cambio de construir la infraestructura de transporte, etc. Al estar las empresas localizadas en lugares próximos, pueden negociarse residuos a bajo precio.

A continuación se describen cada uno de los flujos hídricos, energéticos y de subproductos que configuran el ecosistema industrial de Kalundborg:

Flujos hídricos

El déficit de agua subterránea que posee Kalundborg se intensificó a medida que las industrias locales fueron ampliando su tamaño, y en consecuencia, su consumo. Con el fin de minimizar esta problemática, diversas iniciativas de ahorro públicas y privadas se han llevado a cabo a lo largo de las últimas décadas.

Según Jacobsen (2006), la primera estrategia consistió en reemplazar el consumo de agua subterránea por agua superficial en las industrias con mayor consumo. Prueba de ello fue la construcción de sistemas de suministro de agua desde el lago Tisso a *Statoil*, *Asnaes* y *Novo Nordisk* en los años 1961, 1973 y 1989 respectivamente. La segunda estrategia fue optimizar el uso del agua en los procesos de producción impulsando la reutilización y diversificar las fuentes hídricas externas. Y la tercera estrategia significó la potabilización del agua superficial y la importación de agua subterránea desde regiones cercanas.

Estas tres estrategias han permitido la creación de un sistema diversificado de abastecimiento de agua en la zona reforzado por la cooperación entre las diferentes industrias. De hecho, la central térmica *Asnaes* cubre sus necesidades hídricas a partir de cinco fuentes diferentes:

1. Agua superficial del lago Tisso (junto con *Statoil* y *Novo Group*)
2. Agua de mar
3. Agua subterránea
4. Agua de refrigeración de *Statoil*
5. Agua residual de *Statoil*

FLUJO: Agua superficial	NÚMERO: 1, 3 y 10
ORIGEN: lago Tisso	DESTINO: <i>Asnaes</i> , <i>Statoil</i> y <i>Novo Group</i>

Asnaes capta agua del lago Tisso junto otras empresas participantes en el ecosistema industrial: *Novo Group* y *Statoil*. El agua superficial es tratada adecuándola para su utilización en caldera y generar vapor. En consecuencia, se produce un ahorro en el consumo de agua subterránea, siendo reemplazado por agua superficial; durante el periodo 1990-2002 la central térmica ha empleado 6,9 millones de metros cúbicos de agua procedente del lago Tisso, mientras que el conjunto de industrias *Asnaes*, *Novo Group* y *Statoil*, durante el mismo periodo, puede decirse que han ahorrado más de 30

millones de metros cúbicos como resultado de la sustitución de agua subterránea por agua superficial. Además, el plazo de la recuperación de la inversión ha sido satisfactorio para las tres empresas involucradas.

FLUJO: Agua de refrigeración	NÚMERO: 11
ORIGEN: <i>Statoil</i>	DESTINO: <i>Asnaes</i>

La central térmica reemplaza una parte del consumo de agua superficial empleando agua de refrigeración suministrada por *Statoil*, lo cual supone un aprovechamiento en cascada. Es decir, se suministra agua superficial a *Statoil* que la utiliza como agua de refrigeración, la cual además de sustituir el consumo de agua subterránea se envía posteriormente a *Asnaes* donde, después de aplicarle un tratamiento, se le da un segundo uso como agua de caldera para la producción de vapor y para desulfurar los gases de combustión. Este aprovechamiento en cascada ha permitido a *Asnaes* reducir su consumo de agua superficial del lago Tisso en más de 7,6 millones de metros cúbicos durante el periodo 1990-2002. En términos económicos, considerando el coste del proyecto de inversión y el precio del agua de refrigeración, que corresponde a la mitad del precio del agua superficial, en el año 2002 se habían ahorrado aproximadamente 228.000 dólares. Cabe destacar que toda reducción del consumo de agua superficial es muy positivo, ya que debe tenerse en cuenta que todo ahorro supone alargar la vida del actual sistema conjunto de canalización de agua desde el lago Tisso, y al mismo tiempo, mantener el consumo de agua por debajo de la disponibilidad anual de agua del lago que en 2004 era de 5 millones de metros cúbicos.

Por otra parte, la central térmica obtiene un ahorro indirecto debido a un efecto del aprovechamiento en cascada, es decir, el agua de refrigeración se encuentra a una temperatura de en torno a 30 °C, que corresponde con la temperatura requerida para el tratamiento que permite utilizarla como agua para caldera. De este modo, *Asnaes* evita la inversión para llevar a cabo la instalación de un sistema de precalentamiento. De la misma manera, *Statoil* obtiene también un extraordinario ahorro indirecto, ya que de lo contrario habría tenido que tratar el agua de refrigeración antes de poder verterla.

FLUJO: Agua residual	NÚMERO: 14
ORIGEN: <i>Statoil</i>	DESTINO: <i>Asnaes</i>

Statoil canaliza hacia *Asnaes* agua residual tratada donde sustituye parte del consumo de agua superficial y de refrigeración. Aproximadamente 9.000 metros cúbicos de

agua residual se suministraron a la central térmica en 2002, y más de 1,1 millones de metros cúbicos en el periodo 1992-2002, reemplazando así el uso de agua superficial y de refrigeración en procesos secundarios de la central. El beneficio económico directo para la central térmica se obtiene por la sustitución de agua superficial por agua residual mientras que para la refinería supone evitar la descarga del vertido al medio natural y por consiguiente, el tratamiento del mismo para cumplir la legislación correspondiente.

FLUJO: Agua	NÚMERO: 18
ORIGEN: <i>Asnaes</i>	DESTINO: <i>Asnaes</i>

Además, *Asnaes* posee un programa de reciclaje interno en el que mediante un embalse de 200.000 m³ se almacenan y reciclan aguas residuales de la central térmica y de la refinería. El embalse permite también drenar el agua de los campos de alrededor y aumentar el periodo de tiempo entre el consumo y la descarga. Esto permite la reutilización de la misma agua varias veces reduciendo así el consumo exterior.

La implantación de estos proyectos de intercambio simbiótico en forma de agua permite a *Asnaes* utilizar únicamente agua de baja calidad en la planta de desulfuración de gases de combustión, potenciando así el aprovechamiento en cascada y reduciendo el consumo de agua de más alta calidad. De este modo, se dispone de mayor cantidad de agua de alta calidad para fines que así lo precisen como las calderas de generación de vapor o procesos de la industria farmacéutica.

FLUJO: Agua desionizada	NÚMERO: 21
ORIGEN: <i>Asnaes</i>	DESTINO: <i>Statoil</i>

A lo largo de los años el vapor se ha ido desarrollando en un producto comercial cuyo precio viene determinado por el mercado. Lo cual ha hecho que aumente la volatilidad en el precio del vapor producido en *Asnaes*, afectando así a sus consumidores.

A diferencia de *Novo Group*, *Statoil* posee las instalaciones necesarias para generar vapor de forma autónoma, utilizándolas cuando se encarece el precio del mismo y disminuyendo el suministro desde *Asnaes*. Sin embargo, este hecho también ha significado que la cooperación entre ambas empresas se extienda también al intercambio de agua de caldera. El aumento de la producción propia de vapor en la refinería supone en ocasiones la escasez de agua de caldera para su planta de generación de vapor. Por otra parte, la central térmica tiene un exceso de capacidad

permanente en sus instalaciones de tratamiento de agua para su uso en caldera. Por tanto, el suministro de agua de caldera de *Asnaes* a *Statoil* ha permitido a la refinería eliminar sus picos de demanda y así evitar la inversión que conllevaría la ampliación de su planta de tratamiento. La infraestructura necesaria para llevar a cabo este intercambio supuso una inversión entre seis y siete veces menor a la que hubiera supuesto la ampliación y permite el suministro de cerca de 50.000 metros cúbicos anuales de agua tratada para generar vapor en la misma refinería. Y además, de este modo *Asnaes* compensa la disminución en el suministro de vapor a la refinería.

FLUJO: Agua residual

NÚMERO: 17

ORIGEN: *Novo Group*

DESTINO: *Kalundborg*

El agua residual de *Novo Nordisk* y *Novozymes* es tratada en una planta de tratamiento propia a fin de reducir el contenido en materia orgánica y sales nutrientes. Después, es enviada a la estación de depuración de aguas residuales de Kalundborg.

FLUJO: Agua purificada/Residuos alcohólicos

NÚMERO: 22/25

ORIGEN: *Kalundborg/Novo Group*

DESTINO: *Novo Group/Kalundborg*

En el año 2003 se inicia una importante ampliación de 7.000 m² en *Novo Nordisk* con el objetivo de incrementar su capacidad de producción de insulina, de hecho, actualmente suministra el 40% de la demanda mundial de insulina. La ampliación se desarrolla en tres fases: la primera durante 2003-2004, la segunda en 2005 y la tercera en 2006. Dicha ampliación conlleva, entre otras infraestructuras, la construcción de una planta purificadora de agua y además supone el envío de residuos alcohólicos desde la empresa hasta la estación municipal de depuración de aguas residuales.

FLUJO: Agua de mar

NÚMERO: 26

ORIGEN: *Asnaes*

DESTINO: *Statoil*

Se desconoce el propósito de este flujo, aunque teniendo en cuenta que *Asnaes* emplea agua de mar para condensar el vapor procedente de las turbinas, lo cual provoca en el flujo de agua un incremento en su temperatura, se puede pensar que su aprovechamiento pueda ser de carácter térmico, como ocurre en el proyecto de la piscifactoría.

Flujos energéticos

FLUJO: Vapor de proceso	NÚMERO: 8 y 9
ORIGEN: <i>Asnaes</i>	DESTINO: <i>Statoil y Novo Group</i>

Como ya se ha indicado, *Asnaes* opera como central de cogeneración, lo cual le permite disponer de energía térmica útil en forma de vapor para su venta a las empresas colindantes: *Statoil* y *Novo Group*. *Statoil* recibe de *Asnaes* aproximadamente el 15% de sus necesidades de vapor, el cual utiliza en el proceso de destilación del petróleo y en tareas secundarias, como por ejemplo, para calentar tanques o tuberías. Mientras que *Novo Nordisk* y *Novozymes*, emplean vapor en tareas de calentamiento y esterilización.

En 1982, ante la necesidad de renovar sus calderas, *Novo Nordisk* decide construir la primera tubería de vapor hasta la central térmica, esta nueva infraestructura le asegura una capacidad máxima de suministro de 55 toneladas por hora y le permite recuperar la inversión en un plazo de dos años. A finales de los años noventa se reconoce que es necesaria una mayor capacidad de la infraestructura existente dada la expansión de *Novo Nordisk*. Entonces, se plantea un pronóstico de la necesidad de vapor durante el periodo 1999-2005 y se valoran tres posibles actuaciones para poder garantizarlo del modo más económico posible. El primer escenario consiste en ampliar la infraestructura existente entonces, el segundo contempla la compra de vapor generado de forma independiente a un proveedor y la tercera sugiere la producción de vapor de forma independiente y autónoma. De las tres soluciones planteadas, la primera resultó ser la más rentable, así que en 2001 se puso en funcionamiento una nueva tubería de vapor entre *Asnaes* y *Novo Nordisk*. En la tabla 13 se muestra resumida una comparativa del coste de cada uno de los escenarios planteados, en comparación con el primero al que se le asigna un valor adimensional de 100.

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Precio tonelada vapor	100	108	100
Inversión	100	174	120

Tabla 13 – Comparativa del coste del vapor consumido en *Novo Nordisk* (Fuente: Jacobsen, 2006)

En la actualidad, la solución adoptada sigue siendo económicamente satisfactoria para ambas empresas en comparación con las soluciones alternativas. Por tanto, la justificación de emplear la energía térmica útil que dispone la central térmica radica en argumentos tanto económicos como medioambientales, respecto a la producción autónoma.

FLUJO: Energía térmica	NÚMERO: 7
ORIGEN: Asnaes	DESTINO: Kalundborg

La central térmica suministra energía térmica al sistema de calefacción central de la ciudad de Kalundborg desde el año 1981. Por aquel entonces, el mundo entero estaba inmerso en la Segunda Crisis del Petróleo (1979), tan sólo cinco años después de la Primera Crisis del Petróleo (1973). El drástico aumento de los precios unido a la gran dependencia que tenía el mundo industrializado del petróleo acarreó que los países disminuyeran la cuota del petróleo en el consumo energético.

En Kalundborg, donde la mayoría de los sistemas de calefacción utilizaban gasóleo como combustible, hubo restricciones en su uso y en 1981, gracias a la colaboración entre el Ayuntamiento de Kalundborg y Asnaes, se puso en funcionamiento el sistema de calefacción central que sustituyó 3.500 sistemas individuales de calefacción. Desde entonces, mediante una red de tuberías subterráneas se suministra calefacción a unos 4.500 hogares a bajo coste, y a la vez se reducen en un 80% los deshechos energéticos de la central térmica. Además, en 2002 se construyó un tanque de 20.000 metros cúbicos que permite la acumulación de 3.000 GJ, mejorando la seguridad de suministro y el precio de la calefacción central. Dadas las condiciones del mercado eléctrico, la acumulación de energía permite producir energía térmica cuando es más favorable con respecto al precio de la electricidad, es decir, en términos económicos es preferible priorizar la producción de energía térmica cuando el precio de la electricidad es bajo, por ejemplo por la noche.

FLUJO: Agua caliente	NÚMERO: 6
ORIGEN: Asnaes	DESTINO: piscifactoría

La última etapa del aprovechamiento en cascada del agua se centra en un proyecto de reutilización de agua de mar, procedente de la central térmica, en la piscifactoría. Después de la producción de electricidad, vapor de proceso y actuar como medio de transporte de energía para el sistema de *District Heating*, el agua de caldera de la central térmica se condensa con agua de mar, provocando en ésta un incremento de temperatura de 7-8 °C. Una parte de este flujo de agua de mar que proviene del condensador se conduce a la piscifactoría. En 2002, aproximadamente 23 millones de metros cúbicos de agua de refrigeración se enviaron a la piscifactoría, mientras que el resto se vertieron en el fiordo de Kalundborg. La cantidad total de agua de mar a la salida del condensador de la central térmica equivale a 16 millones de GJ de contaminación térmica (2002), y en la piscifactoría se utiliza cerca de un 2,5%, equivalente a 390.000 GJ de energía residual. La implantación de este proyecto

supuso una pequeña inversión cuyo plazo de recuperación fue menor a dos años, gracias al aumento de la productividad de la piscifactoría en un 15%.

FLUJO: Gas	NÚMERO: 2 y 15
ORIGEN: <i>Statoil</i>	DESTINO: <i>Asnaes</i> y <i>Gyproc</i>

Gyproc decidió instalar su fábrica en Kalundborg con el fin de reducir sus costes de producción a través del aprovechamiento de gas excedente del refinado de petróleo que antes se quemaba completamente en la antorchas de la propia refinería. *Gyproc* lo emplea como combustible para los hornos donde se lleva a cabo el secado de las placas de yeso. *Asnaes* también recibe alrededor de 60.000 toneladas anuales de gas excedente que le permiten reducir su consumo de carbón en torno a un 2%.

FLUJO: Vapor	NÚMERO: 27
ORIGEN: <i>Asnaes</i>	DESTINO: <i>Inbicon</i>

Inbicon, la planta de bioetanol de segunda generación, se abastece de vapor procedente de *Asnaes*, el cual utiliza en su proceso de producción donde se obtiene bioetanol a partir de paja de trigo procedente de la agricultura.

FLUJO: Bioetanol	NÚMERO: 29
ORIGEN: <i>Inbicon</i>	DESTINO: <i>Statoil</i>

Statoil emplea el bioetanol obtenido en *Inbicon* para producir la única gasolina del mercado con etanol de segunda generación al 5%. En 2009 las dos compañías firmaron un acuerdo para que *Inbicon* provea a *Statoil* los primeros cinco millones de litros producidos. El nuevo combustible se denomina *Bio95 2G* y se distribuye en 100 estaciones de servicio danesas.

Flujos de subproductos

FLUJO: Yeso	NÚMERO: 16
ORIGEN: <i>Asnaes</i>	DESTINO: <i>Gyproc</i>

En la planta de desulfuración de gases de combustión de la central térmica se produce yeso, denominado “yeso industrial”. Alrededor de 80.000 toneladas al año se transportan desde *Asnaes* a *Gyproc* donde sirven de materia prima para la producción de placas de este material. De este modo, además de evitar la emisión de dióxido de azufre a la atmósfera por parte de la central térmica, se sustituye la importación de yeso natural procedente de España reduciendo así los costes de producción

FLUJO: Ceniza	NÚMERO: 5
ORIGEN: <i>Asnaes</i>	DESTINO: <i>Aalborg Portland</i>

Asnaes produce anualmente unas 200.000 toneladas de cenizas y escorias por la quema de carbón, las cuales se transportan hasta la empresa *Aalborg Portland*, donde se emplean en la fabricación de cemento y otros pavimentos. En la fase de molienda del clinker, junto con otros minerales, para dar lugar al cemento pueden añadirse las cenizas y las escorias en la proporción adecuada. Esta adición permite reducir la cantidad de clinker necesario para la fabricación de cemento. Por tanto, ambas compañías salen beneficiadas, por un lado la central térmica se deshace de un residuo evitando así su depósito en vertedero, y por el otro, la empresa cementera adquiere una materia prima a bajo coste y reduce su consumo de combustible.

FLUJO: Fertilizante	NÚMERO: 4
ORIGEN: <i>Novo Group</i>	DESTINO: agricultura

La producción de enzimas industriales se basa en la fermentación de materias primas como la harina de patata y el almidón de maíz. Este proceso de fermentación genera residuos líquidos que se dividen en dos tipos, por un lado una corriente concentrada que contiene la biomasa que comprende los microorganismos, nutrientes y agua, y por otro lado una corriente diluida. A la corriente concentrada se le aplica un proceso de inactivación añadiéndole cal y de higienización tratándola con calor. De este modo se obtiene el fertilizante líquido conocido como *NovoGro*. Una parte del mismo, tras un proceso de deshidratación, se convierte en fertilizante sólido, denominado *NovoGro 30*. Ambos se distribuyen a unos 600 agricultores locales para su utilización como fertilizante en 20.000 hectáreas de campo, ya que contiene principalmente nitrógeno, fósforo y cal, reduciendo así su necesidad de fertilizantes comerciales en más de un 60%.

FLUJO: Levadura

NÚMERO: 12

ORIGEN: *Novo Group*

DESTINO: ganadería

La producción de insulina se basa en un proceso de fermentación, donde algunos de los principales ingredientes son el azúcar y la sal, que mediante la adición de levadura se obtiene la insulina. Después de un proceso de calentamiento, la levadura residual se convierte en un alimento muy apreciado al que se le añade agua, azúcar y bacterias ácido-lácticas para hacerlo más atractivo para los cerdos. Como resultado, este complemento alimenticio rico en proteínas reemplaza aproximadamente el 70% de las proteínas de soja de la alimentación tradicional. En el año 2004, más de 800.000 cerdos fueron alimentados con este producto.

FLUJO: Tiosulfato de amonio

NÚMERO: 13

ORIGEN: *Statoil*

DESTINO: planta de fertilizantes

En 1990 se puso en funcionamiento la planta de desulfuración de *Statoil* con el fin de reducir el contenido en azufre del gas de refinería disminuyendo así las emisiones de dióxido de azufre significativamente cuando éste es consumido. Hasta el año 1992, el azufre líquido obtenido se transportaba a *Kemira*, empresa dedicada a la producción de ácido sulfúrico. Actualmente, el subproducto obtenido en la desulfuración, el tiosulfato de amonio, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_3$, se utiliza en la producción de alrededor de 20.000 toneladas de abono líquido, que corresponde aproximadamente al consumo anual en Dinamarca.

FLUJO: Lodo

NÚMERO: 19

ORIGEN: Kalundborg

DESTINO: *RGS 90*

La estación de depuración de aguas residuales de Kalundborg produce lodos que le sirven a la empresa *RGS 90* como nutriente en la biorremediación de tierras. *RGS 90* trata anualmente 250.000 toneladas de tierra contaminada por hidrocarburos o metales pesados. Una vez se descontaminan las tierras, se emplean como material de relleno en la construcción.

FLUJO: Cenizas Orimulsión

NÚMERO: 20

ORIGEN: *Asnaes*

DESTINO: recuperación de metales

Orimulsión es una marca registrada que se utilizó para un combustible fósil bituminoso desarrollado en Venezuela. Estaba compuesto por un 70% de crudo extra-pesado y un 30% de agua. *Asnaes* lo utilizó en el periodo 1994-2003 llegando a cubrir la mitad de la producción eléctrica de la central. El contenido en azufre de la Orimulsión era de un 2,5%, lo cual originaba una mayor producción de yeso en el proceso de desulfuración con respecto al carbón, cuyo contenido en azufre es en torno a 1%. Además, las cenizas derivadas de la combustión de Orimulsión contenían una concentración de metales pesados significativa, concretamente un 12,2% de vanadio y 2,7% de níquel. En consecuencia, las cenizas se enviaban a una empresa ubicada en el Reino Unido donde se trataban para recuperar los metales.

FLUJO: Yeso reciclado	NÚMERO: 23
ORIGEN: <i>Kara/Noveren</i>	DESTINO: <i>Gyproc</i>

La empresa de tratamiento de residuos *Kara/Noveren* recibe placas de yeso usadas y a partir de ellas suministra yeso reciclado a *Gyproc* donde se lleva a cabo su reutilización.

FLUJO: Aluminio	NÚMERO: 26
ORIGEN: <i>Aluscan</i>	DESTINO: <i>Nordisk Aluminat</i>

La empresa *Aluscan* genera lodos de aluminio en el proceso de anodizado, los cuales envía a la empresa *Nordisk Aluminat*, ubicada en Kalundborg, donde se utilizan en la obtención de aluminatos.

FLUJO: Paja de trigo	NÚMERO: 28
ORIGEN: agricultura	DESTINO: <i>Inbicon</i>

Inbicon utiliza paja de trigo como materia prima para la obtención de bioetanol, la cual supone un desecho del sector agrícola danés.

FLUJO: Pellets	NÚMERO: 30
ORIGEN: <i>Inbicon</i>	DESTINO: -

En el proceso de producción del bioetanol también se obtiene como residuo la lignina, que corresponde a la parte leñosa de la paja, la cual se presenta en forma de pellets y sirve como biocombustible, pudiendo reemplazar parte del carbón en la central térmica.

FLUJO: Melaza

NÚMERO: 31

ORIGEN: *Inbicon*

DESTINO: ganadería

La melaza se obtiene, al igual que la lignina, en el proceso de producción del bioetanol. Posee un alto contenido en azúcar y actualmente se destina a la ganadería, donde se utiliza como complemento alimenticio para animales. Sin embargo, en el futuro puede emplearse para producir bioetanol o biogás.

ANEXO 2: DEFINICIÓN Y ANÁLISIS EXERGÉTICO DEL CASO DE ESTUDIO

1. Introducción

El objetivo de este anexo es plantear el caso de estudio base y alternativo, establecer su estructura física y definir el modelo termodinámico que los caracteriza en términos de exergía para poder llevar a cabo el posterior análisis termoeconómico.

2. Planteamiento

Considerando el ecosistema industrial de Kalundborg descrito en el anexo 1, se pretende cuantificar el efecto de la Simbiosis Industrial en términos exergéticos. Para ello, se plantea un caso de estudio del modelo de Simbiosis Industrial, denominado “caso base”, así como un “caso alternativo” del mismo donde no exista integración alguna, es decir, cada uno de los flujos entre participantes se sustituye por su alternativa convencional. De este modo, se puede cuantificar el ahorro que conlleva la Simbiosis Industrial.

Dada la complejidad que conlleva abordar un análisis exergético completo del modelo de Simbiosis Industrial, se ha optado por definir un caso de estudio simplificado, pero al mismo tiempo, que sea riguroso y representativo. Por tanto, el caso de estudio se focaliza en los flujos más importantes de la central térmica de carbón *Asnaes*, puesto que, como se ha indicado en el anexo 1, constituye el corazón del ecosistema industrial de Kalundborg.

Los flujos hídricos, a pesar de la gran importancia que tienen en el ecosistema industrial, están fuera del alcance del caso de estudio planteado puesto que se desconocen las características químicas y físicas de las diferentes corrientes de agua intercambiadas entre las compañías y el medio ambiente.

Tampoco son considerados los flujos de residuos en los que no participa la central térmica, como puedan ser: la biomasa residual de los procesos de fermentación de *Novo Group*, el tiosulfato de amonio procedente de las unidades de desulfuración de *Statoil*, los lodos de la estación de depuración de aguas residuales, los residuos tratados en la empresa *Kara/Noveren* o el aluminio reutilizado en *Nordisk Aluminat*. La razón por la cual no se consideran en el caso de estudio es la complejidad que conlleva el análisis en términos energéticos y exergéticos, dado que se desconocen las características físicas y químicas, los procesos mediante los cuales se generan y las alternativas convencionales a dichos procesos. Por este motivo, también quedan fuera del alcance del caso de estudio todos los flujos que intervienen en la empresa de bioetanol, *Inbicon*.

En la siguiente figura se muestra el esquema simplificado del caso de estudio considerado donde puede observarse como interaccionan las distintas industrias, siendo la central térmica receptora o emisora de cada uno de los flujos.

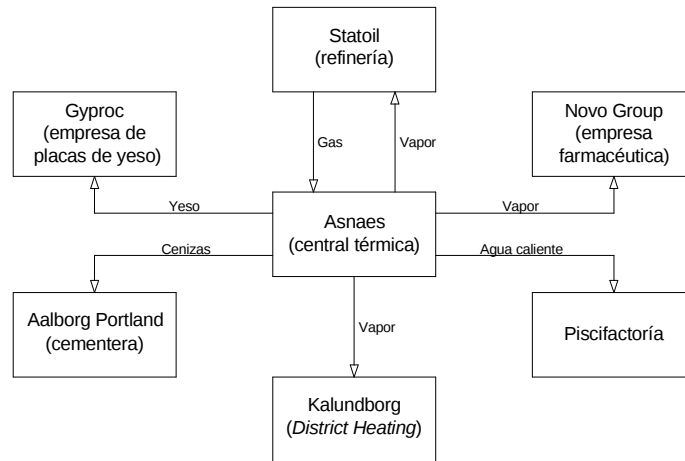


Figura 25 – Esquema simplificado del caso de estudio (Elaboración propia)

3. Caso base

3.1 Estructura física

Para poder cuantificar exergéticamente los flujos se debe establecer el diagrama físico, en el cual se caracterizan los procesos que lo forman.

En este sentido, la central térmica se puede dividir a grandes rasgos en cuatro componentes principales: caldera, grupo turbina-generator, condensador y planta desulfuradora.

En la figura 26 se muestra el diagrama físico del caso base donde aparecen numeradas las seis integraciones consideradas.

Debido al régimen de operación de la central térmica, se considera únicamente la unidad 5. Como se ha indicado en el anexo 1, la unidad 2, al ser la más antigua y la que cuenta con menor potencia, opera durante muy pocas horas al año, siendo su producción despreciable frente a la de la unidad 5. Mientras que la unidad 4 dejó de operar en el año 2008, manteniéndose como unidad de reserva.

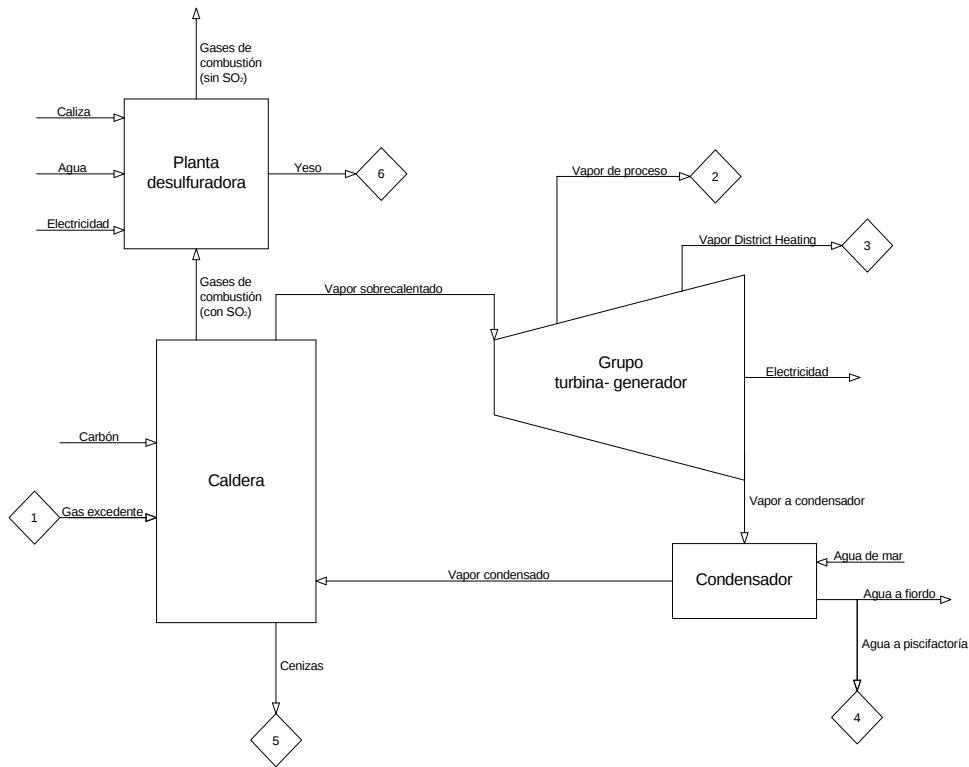


Figura 26 – Diagrama físico del caso base (Elaboración propia)

Los datos técnicos de la unidad 5 de la central térmica se muestran en la siguiente tabla:

	Unidad 5
Puesta en funcionamiento	1981
Rehabilitación	2004
Combustible	Carbón pulverizado
Potencia eléctrica (MW)	640
Potencia calefacción central (MW)	150
Potencia vapor (MW)	158
Potencia combustible (MW)	1604
Eficiencia eléctrica (%)	39,9
Modo de operación	Carga base
Producción (h/año)	6200

Tabla 14 – Datos técnicos de la unidad 5 de Asnaes (Fuente: Larsen et al, 2007)

3.2 Modelo termodinámico

Carbón

El combustible utilizado en la central suele ser una mezcla de diferentes tipos de carbón, cuyo análisis elemental y poder calorífico inferior se indica en la tabla siguiente:

C (%)	62,17
O (%)	8,00
H (%)	3,44
N (%)	1,38
S (%)	0,65
Cl (%)	0,01
H ₂ O (%)	12,70
Ceniza (%)	11,65
Suma (%)	100,00
PCI (MJ/kg)	24,14

Tabla 15 – Análisis elemental y PCI carbón (Fuente: Larsen et al, 2007)

En la tabla 14 se muestra la potencia térmica del carbón, $\dot{Q}_{carbón}$ [MW], y en la tabla 15 el poder calorífico inferior, $PCI_{carbón}$ [MJ/kg]. Utilizando ambos datos se calcula el consumo de carbón, $m_{carbón}$ [kg/h]:

$$m = \frac{\dot{Q}}{PCI} \cdot 3600$$

Ecuación 1

En cuanto al cálculo de la exergía del flujo de carbón, primero de todo debe conocerse su exergía química específica. Se ha demostrado que existe muy poca diferencia entre la energía química de los combustibles con respecto al ambiente (poder calorífico superior) y la componente química de la exergía, lo cual indica que la energía de los combustibles tiene una elevada calidad (Lozano y Valero, 1996). Por consiguiente, en muchos casos la exergía química puede aproximarse al poder calorífico superior asumiendo un error menor al 6% (Valero y Valero, 2009). Además, se observa en la literatura que esta aproximación se adopta con frecuencia (Bilgen y Kaygusuz, 2008).

Por tanto, dado el propósito del presente trabajo se considera conveniente asumir tal aproximación.

El poder calorífico inferior considera que el vapor de agua contenido en los gases de combustión no condensa. Por lo tanto, considerando el calor latente de vaporización a la presión parcial del vapor en los gases, $h_{fg} = 2,395 \text{ MJ/kg}$, puede obtenerse el poder calorífico superior, $PCS_{carbón} [\text{MJ/kg}]$, mediante la siguiente fórmula (Nag, 2008):

$$PCS = PCI + m_w \cdot h_{fg}$$

Ecuación 2

Donde m_w es la cantidad de vapor liberado en la combustión, el cual proviene de la evaporación de la humedad propia del combustible y del agua que se forma a partir del hidrógeno contenido en el mismo. Por tanto, el vapor liberado viene determinado por la composición del carbón mostrada en la tabla 15, concretamente por la fracción porcentual de agua, x_{H_2O} , y la del hidrógeno, x_H , mediante la siguiente expresión (Nag, 2008):

$$m_w = x_{H_2O} + 9 \cdot x_H$$

Ecuación 3

Utilizando las ecuaciones 2 y 3 se obtiene: $PCS_{carbón} = 25,19 \text{ MJ/kg}$.

Por tanto, como se ha indicado anteriormente, la exergía química específica del carbón, $b_{ch_{carbón}}$, se aproxima a su poder calórico superior:

$$b_{ch} \approx PCS$$

Ecuación 4

Pasándola a kilojulios: $b_{ch_{carbón}} = 25.190 \text{ kJ/kg}$.

En ausencia de efectos nucleares, magnéticos, eléctricos y de tensiones superficiales, la exergía de un sistema puede dividirse en cuatro componentes: física, cinética,

potencial y química. La suma de las tres primeras componentes se suele denominar: componente termomecánica (Bejan, Tsatsaronis y Moran, 1996).

Puesto que la componente exergética termomecánica del flujo de carbón es nula, su exergía específica total viene dada exclusivamente por su componente química. Por consiguiente: $b_{\text{carbón}} = 25.190 \text{ kJ/kg}$.

Partiendo del dato de la exergía específica total del carbón, como el flujo másico es conocido, se calcula su potencia exergética, $\dot{B}_{\text{carbón}} [MW]$:

$$\dot{B} = \frac{m}{3600} \cdot \frac{b}{1000}$$

Ecuación 5

El consumo másico, la potencia térmica y la potencia exergética del carbón consumido por la central térmica se muestran en la siguiente tabla:

	$m [kg/h]$	$\dot{Q} [MW]$	$\dot{B} [MW]$
Carbón	239.205	1.604	1.673

Tabla 16 – Caudal másico, potencia térmica y potencia exergética del carbón de Asnaes

Gas excedente

Adicionalmente, debe ser considerado también el consumo de gas procedente de la refinería, de 60.000 toneladas por año (Lowe, 2001). Ante la falta de información al respecto, para llevar a cabo los cálculos se considera que el gas excedente de la refinería corresponde a gas natural.

Considerando que la producción de la central viene definida por las horas de funcionamiento equivalentes a plena carga, $h_{eq_{central}} [h/año]$ (tabla 14), conocido el consumo anual, $m_{anual_{GN}} [t/año]$, se calcula el consumo instantáneo, $m_{GN} [kg/h]$:

$$m = \frac{m_{anual}}{h_{eq}} \cdot 1000$$

Ecuación 6

Una vez calculado el consumo de gas natural, su potencia térmica, $\dot{Q}_{GN}$ [MW], viene definida por el poder calorífico inferior, PCI_{GN} , el cual se estima en 47,153 MJ/kg (Masters, 2004):

$$\dot{Q} = \frac{m}{3600} \cdot PCI$$

Ecuación 7

Para una composición estándar del gas natural y una humedad relativa del 80%, se obtiene una exergía química específica, $b_{ch_{GN}}$, igual a 50.500 kJ/kg (Hermann, 2005).

Por tanto, como en el caso del flujo de carbón, la componente exergética termomecánica del gas natural es nula, de modo que su exergía específica total, b_{GN} , es 50.500 kJ/kg.

Conocida la exergía específica total y el caudal másico del flujo de gas natural, mediante la ecuación 5 se procede a calcular la potencia exergética, $\dot{B}_{GN}$ [MW].

En la siguiente tabla se muestra el flujo másico, la potencia térmica y la potencia exergética del gas excedente suministrado a la central térmica:

	m [kg/h]	$\dot{Q}$ [MW]	$\dot{B}$ [MW]
Gas Natural	9.677	126,8	135,8

Tabla 17 – Caudal másico, potencia térmica y potencia exergética del gas excedente de Statoil

Ceniza

A partir del consumo de carbón, como se conoce su composición (tabla 15), utilizando su fracción porcentual en ceniza, x_{ceniza} , se calcula el flujo másico de ceniza generado en la central, m_{ceniza} [kg/h]:

$$m_{ceniza} = x_{ceniza} \cdot m_{carbón}$$

Ecuación 8

Considerando que la ceniza generada está compuesta por: 49% SiO_2 , 26% Al_2O_3 , 15% CaO y 10% Fe_2O_3 , su exergía específica, b_{ceniza} , es igual a 454 kJ/kg (Valero et al, 2010).

Aplicando la ecuación 5 se procede a calcular la potencia exergética, $\dot{B}_{\text{ceniza}}$ [MW].

Obteniéndose:

	m [kg/h]	$\dot{B}$ [MW]
Ceniza	27.867	3,514

Tabla 18 – Caudal másico y potencia exergética de la ceniza de Asnaes

Electricidad

Según la tabla 14, la potencia eléctrica suministrada por la central térmica, $\dot{W}_{\text{central}}$, es igual a 640 MW. Entonces, el valor de potencia exergética, $\dot{B}_{\text{central}}$ [MW]., se obtiene de forma inmediata, puesto que es igual a la potencia eléctrica (Valero y Valero, 2009).

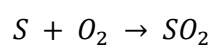
	$\dot{W}$ [MW]	$\dot{B}$ [MW]
Electricidad	640	640

Tabla 19 – Potencia eléctrica y potencia exergética de la electricidad de Asnaes

Flujos planta desulfuradora

La planta desulfuradora está basada en la tecnología de desulfuración por vía húmeda a partir de caliza con oxidación forzada y permite obtener yeso a partir del dióxido de azufre contenido en los gases de combustión.

Conocido el consumo de carbón y su composición (tabla 15), la producción de dióxido de azufre en la central se halla considerando la reacción química que da lugar a su formación:



Ecuación 9

El flujo másico de azufre que reacciona, m_S [kg/h], se calcula:

$$m_S = x_S \cdot m_{\text{carbón}}$$

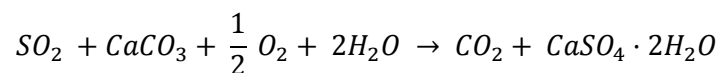
Ecuación 10

Según la reacción se forma un mol de dióxido de azufre por cada mol de azufre, por tanto el flujo másico de dióxido de azufre formado, m_{SO_2} [kg/h], es:

$$m_{SO_2} = \frac{m_S}{PM_S} \cdot PM_{SO_2}$$

Ecuación 11

El consumo de caliza ($CaCO_3$) para poder llevar a cabo la desulfuración se calcula teniendo en cuenta la reacción química que rige el proceso de desulfuración por vía húmeda a partir de caliza con oxidación forzada:



Ecuación 12

Según la reacción se necesita un mol de caliza por cada mol de dióxido de azufre, pero se considera un exceso del 5% en el consumo de caliza respecto al que corresponde por la estequiometría de la reacción (Twardowska, 2004). De este modo, se asegura una mejor absorción del dióxido de azufre contenido en los gases de combustión. Por tanto, el flujo másico de caliza, m_{CaCO_3} [kg/h], se calcula según la ecuación:

$$m_{CaCO_3} = 1,05 \cdot \left(\frac{m_{SO_2}}{PM_{SO_2}} \cdot PM_{CaCO_3} \right)$$

Ecuación 13

Además, según la estequiometría son necesarios dos moles de agua por cada mol de dióxido de azufre, sin embargo el consumo de agua en el proceso de desulfuración se multiplica hasta por treinta y cinco respecto al que sería necesario considerando la estequiometría de la reacción química. Se requiere tal exceso de agua puesto que para garantizar un buen contacto entre el gas y el absorbente acuoso una parte del agua se evapora y la corriente de gas se satura con vapor de agua (Ordóñez, Díaz y Orviz, 2007).

Entonces, el consumo de agua, m_{H_2O} [kg/h], puede calcularse mediante la ecuación:

$$m_{H_2O} = 35 \cdot \left(2 \cdot \frac{m_{SO_2}}{PM_{SO_2}} \cdot PM_{H_2O} \right)$$

Ecuación 14

Finalmente, teniendo en cuenta que según la reacción de formación se produce un mol de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) por cada mol de dióxido de azufre, el flujo másico de yeso obtenido en el proceso de desulfuración, $m_{CaSO_4 \cdot 2H_2O}$ [kg/h], se calcula:

$$m_{CaSO_4 \cdot 2H_2O} = \frac{m_{SO_2}}{PM_{SO_2}} \cdot PM_{CaSO_4 \cdot 2H_2O}$$

Ecuación 15

En la siguiente tabla se muestran las exergías específicas de los flujos que intervienen en el proceso de desulfuración, las cuales corresponden a la componente química, ya que como ocurre en el caso del flujo de carbón o de gas natural, puesto que las componentes física, potencial y cinética son nulas, la componente química es la que determina la exergía total del flujo:

	b [kJ/kg]	Fuente
Dióxido de azufre	4.850	Woods y Garrel, 1987
Caliza	220	Valero et al, 2010
Agua	42,78	Woods y Garrel, 1987
Yeso	141,5	Woods y Garrel, 1987

Tabla 20 – Exergía específica de los flujos de la planta desulfuradora

Una vez consideradas las materias primas necesarias para el proceso de desulfuración, se ha considerado oportuno incluir en el modelo termodinámico las necesidades energéticas de dicho proceso, aún sin tener información al respecto referente a la central térmica de Kalundborg. Sin embargo, se estima que el consumo eléctrico de la planta de desulfuración, $\dot{W}_{FGD}$, es del orden de 4.000 kW. La validez de este dato se justifica en las características técnicas de una planta desulfuradora de capacidad similar y basada también en la tecnología de desulfuración por vía húmeda a partir de caliza con oxidación forzada, ubicada en la central térmica de Lada, en Asturias (Consejería de Medio Ambiente, Ordenación del Territorio e Infraestructuras de Asturias, 2009).

Por tanto, dicho consumo eléctrico se corresponde con su potencia exergética, $\dot{B}_{FGD}$ [MW].

Formulados los cálculos, en la siguiente tabla se muestra el caudal másico y la potencia exergética, obtenida mediante la ecuación 5, de cada uno de los flujos considerados en la desulfuración:

	$\dot{m}$ [kg/h]	$\dot{W}$ [MW]	$\dot{B}$ [MW]
Dióxido de azufre	3.110	-	4,19
Caliza	5.102	-	0,3118
Agua	61.221	-	0,7275
Yeso	8.357	-	0,3284
Electricidad	-	4	4

Tabla 21 – Caudal másico, potencia energética y exergética de los flujos de la planta desulfuradora

Vapor proceso

El vapor de proceso generado en la central térmica va destinado a las industrias colindantes *Statoil* y *Novo Group*. Según se indica en la tabla 14, supone una potencia térmica, $\dot{Q}_v$, de 158 MW.

Se han considerado unas condiciones de presión y temperatura de 8,5 bar y 300 °C, las cuales se han fijado haciéndolas coincidir con las que tiene el vapor a la salida de una turbina de media presión en una central térmica similar (Valero et al, 2010). Además, se supone un retorno de todo el vapor condensado a una temperatura de 180 °C y se desprecia la pérdida de carga.

En la tabla siguiente se muestran las propiedades de los flujos de suministro y retorno de vapor de proceso obtenidas mediante *EES*:

		Suministro vapor	Retorno vapor
Presión	P [bar]	8,5	8,5
Temperatura	T [°C]	300	180
Entalpía	h [kJ/kg]	3.055	2.789
Entropía	s [kJ/kg · K]	7,202	6,680

Tabla 22 – Propiedades térmicas del vapor de proceso de Asnaes

Definidas las condiciones de presión y temperatura, como se conoce la potencia térmica entregada, $\dot{Q}_v$ [MW], puede hallarse el caudal másico de vapor de proceso, $\dot{m}_v$ [kg/s], que abastece a *Statoil* y *Novo Group* mediante la ecuación siguiente:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q} \cdot 1000}{h_{\text{suministro}} - h_{\text{retorno}}}$$

Ecuación 16

Sin embargo, el sistema que suministra vapor de proceso a *Statoil* y *Novo Group* no funciona a plena carga durante todo el año. Según el Centro de Simbiosis Industrial (www.symbiosis.dk, 2008), la producción térmica anual de vapor de proceso, Q_{anual_v} , es de 1500 TJ, lo que equivale a 416,7 GWh/año. Por tanto, utilizando este dato se calcula el número de horas de funcionamiento equivalentes del sistema, h_{eq_v} [h/año]:

$$h_{eq} = \frac{Q_{\text{anual}} \cdot 1000}{\dot{Q}}$$

Ecuación 17

Obteniéndose $h_{eq_v} = 2.637$ h/año.

La exergía específica del flujo de calor suministrado mediante el vapor de proceso se calcula considerando las componentes cinética y potencial nulas, y la componente química despreciable frente a la física. Por tanto, la exergía viene determinada por la componente física, la cual depende de las entalpías y entropías de los flujos de vapor

de suministro y retorno, así como de la temperatura de “estado muerto”, T_0 , igual a 273 K (Valero y Valero, 2009). La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$b = (h_{suministro} - h_{retorno}) - T_0 \cdot (s_{suministro} - s_{retorno})$$

Ecuación 18

Utilizando los valores de entalpía y entropía de la tabla 22 se obtiene: $b_v = 123,5$ kJ/kg.

Por tanto, conocido el flujo másico de vapor y su exergía específica, la potencia exergética entregada, $\dot{B}_v$ [MW], se halla mediante la siguiente expresión:

$$\dot{B} = \dot{m} \cdot \frac{b}{1000}$$

Ecuación 19

En la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos para el caudal másico y las potencias energética y exergética:

	$\dot{m}$ [kg/s]	$\dot{Q}$ [MW]	$\dot{B}$ [MW]
Vapor proceso	594,1	158	73,34

Tabla 23 – Caudal másico, potencia térmica y potencia exergética del vapor de proceso de Asnaes

Vapor *District Heating*

Una cantidad del vapor producido en la caldera de la central térmica se suministra al sistema de calefacción central de la ciudad de Kalundborg. Según la tabla 14, la potencia térmica, $\dot{Q}_{DH}$, es igual a 150 MW.

A la salida de la turbina de media presión, el vapor se distribuye entre la turbina de baja presión y los intercambiadores de calor del sistema de transmisión de calefacción central de acuerdo a la cantidad de energía térmica solicitada. En los intercambiadores de calor el agua se calienta a 100-120 °C y se bombea al sistema de calefacción central (www.dongenergy.com).

A continuación se muestra el esquema de suministro de vapor para abastecer al sistema de calefacción central de Kalundborg:

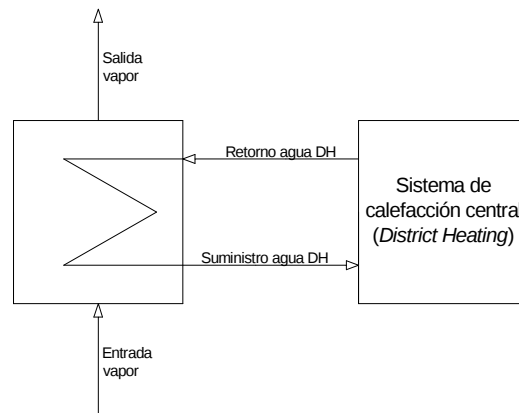


Figura 27 – Esquema suministro de energía para *District heating* (Elaboración propia)

Se consideran unas condiciones de operación del sistema de transmisión de calefacción central de 25 bar de presión, con un suministro a 120 °C y un retorno a 60 °C (Renedo, 2007), despreciando la pérdida de carga se obtiene mediante *EES*:

		Suministro agua DH	Retorno agua DH
Presión	P [bar]	25	25
Temperatura	T [°C]	120	60
Entalpía	h [kJ/kg]	505,4	253,2
Entropía	s [kJ/kg · K]	1,526	0,8299

Tabla 24 – Propiedades térmicas del agua de *District Heating*

Como en el caso anterior, definidas las condiciones de operación, como se conoce la potencia térmica entregada al sistema de calefacción central, $\dot{Q}_{DH}$ [MW], se obtiene el caudal másico de agua del sistema de calefacción central, $\dot{m}_{DH}$ [kg/s], mediante la ecuación 16.

El sistema de calefacción central opera únicamente durante los meses en que las condiciones climatológicas lo requieren, en consecuencia las horas de funcionamiento equivalentes son menores a las de la central térmica, la cual opera durante todo el año.

Según Jacobsen (2006) y *DONG Energy* (www.dongenergy.com), la empresa propietaria de *Asnaes*, la producción térmica anual para el sistema de calefacción central, $Q_{anual_{DH}}$, es de 931 TJ, lo que equivale a 258,6 GWh/año. Por consiguiente,

aplicando la ecuación 17, se puede calcular el número de horas de funcionamiento equivalentes del sistema de calefacción central, obteniéndose: $h_{eq_{DH}} = 1.724$ h/año

Como ocurre con el vapor de proceso, la exergía viene determinada por la componente física, la cual depende de las condiciones de operación del sistema definidas en la tabla 24, mediante la ecuación 18. Operando se obtiene: $b_{DH} = 62,21$ kJ/kg.

Por último, el flujo de agua del sistema de calefacción central recibe una potencia exergética, $\dot{B}_{DH}$ [MW], que se calcula a través de la ecuación 19, cuyo resultado se muestra, junto con el caudal másico y la potencia térmica, en la siguiente tabla:

	$\dot{m}$ [kg/s]	$\dot{Q}$ [MW]	$\dot{B}$ [MW]
Vapor District Heating	594,9	150	37

Tabla 25 – Caudal másico, potencia térmica y potencia exergética del vapor de District Heating

Agua piscifactoría

El agua de mar incrementa su temperatura 8 °C al circular por el condensador de la central térmica y en torno a 23.000.000 m³/año de esa agua no se devuelven directamente al mar, se envían a la piscifactoría (Jacobsen, 2006).

Considerando el dato de caudal volumétrico anual de agua de refrigeración que se hace circular por la piscifactoría, $m_{v,anual}$ [m³/año], las horas equivalentes de funcionamiento de la central térmica, $h_{eq_{central}}$ [h/año], y la densidad del agua, $\rho_{agua} = 1.000$ kg/m³, el caudal másico, m_{pisc} [kg/h], se calcula mediante la siguiente expresión:

$$m_{pisc} = \frac{m_{v,anual} \cdot \rho_{agua}}{h_{eq_{central}}}$$

Ecuación 20

Para poder determinar las propiedades termodinámicas de los flujos se considera que la temperatura ambiente del agua del mar Báltico es de 15 °C (Agencia Europea de Medio Ambiente, 2011). Por tanto, el condensador se alimenta con agua de mar a 15 °C y suministra parte de ella a la piscifactoría a 23 °C.

Las propiedades de los flujos de entrada (retorno) y salida (suministro) del condensador de la central térmica obtenidas en *EES* se detallan en la siguiente tabla:

		Suministro agua	Retorno agua
Presión	P [bar]	1	1
Temperatura	T [°C]	23	15
Entalpía	h [kJ/kg]	96,48	63,01
Entropía	s [kJ/kg · K]	0,3388	0,2242

Tabla 26 – Propiedades térmicas del agua de refrigeración de Asnaes

En consecuencia, la piscifactoría recibe energía térmica cuya potencia, $\dot{Q}_{pisc}$ [MW], puede calcularse como:

$$\dot{Q}_{pisc} = \frac{m_{pisc}}{3600} \cdot \frac{(h_{suministro} - h_{entrada})}{1000}$$

Ecuación 21

En términos exergéticos, el aprovechamiento térmico del agua de refrigeración se expresa mediante su exergía específica física, puesto que las componentes potencial y cinética son nulas y la componente química es despreciable frente a la física. Por consiguiente, introduciendo los valores de la tabla 26 en la ecuación 18 se obtiene: $b_{pisc} = 2,192$ kJ/kg.

A continuación, la potencia exergética, $\dot{B}_{pisc}$ [MW], es hallada aplicando la ecuación 19.

	m [kg/h]	$\dot{Q}$ [MW]	$\dot{B}$ [MW]
Agua piscifactoría	$3,71 \cdot 10^6$	34,48	2,258

Tabla 27 – Caudal másico, potencia térmica y potencia exergética del agua de la piscifactoría

Vapor turbina

Para completar el modelo termodinámico se obtiene la exergía del vapor sobrecalentado destinado a la producción de electricidad en la turbina y del cual no se dispone la información técnica necesaria para determinar su exergía analíticamente.

Por tanto, para solventar esta problemática de falta de información técnica se han empleado los resultados de un estudio sobre el análisis exergético para centrales térmicas de vapor en general (Moran y Shapiro, 2004), en el cual se detalla el siguiente balance exergético, donde se expresan los valores de exergía destruida en la caldera como porcentaje de la exergía aportada a la planta por el combustible:

Caldera	Combustor	30%
	Intercambiador de calor	30%

Tabla 28 – Destrucción de exergía en la caldera (Fuente: Moran y Shapiro, 2004)

Considerando los valores de referencia de la tabla 28 se estima que en el conjunto de la caldera se destruye el 60% de la exergía aportada por el combustible. Por tanto, la potencia exergética del vapor que abastece a la turbina, $\dot{B}_T$ [MW], es:

$$\dot{B}_T = (1 - 0,6) \cdot (\dot{B}_{carbón} + \dot{B}_{GN})$$

Ecuación 22

Obteniéndose:

	$\dot{B}$ [MW]
Vapor turbina	723,7

Tabla 29 – Potencia exergética del vapor a turbina

3.3 Resultados anuales

Los datos de potencia exergética obtenidos corresponden a valores nominales, por lo que al no tratarse de un régimen estacionario, no son adecuados para realizar el diagnóstico termoeconómico. Dichos valores representan la potencia instalada sin considerar el régimen de producción de los procesos, es decir, no todos los procesos operan a plena carga, ni lo hacen durante todo el año. Por tanto, deben emplearse los valores de exergía expresados en base anual, los cuales consideran las horas de funcionamiento equivalentes de cada proceso y permiten realizar el análisis correctamente.

Considerando que la producción de cada proceso viene determinada por un parámetro que relaciona el tiempo de funcionamiento del proceso y su potencia nominal, expresado como horas de funcionamiento equivalentes a plena carga, h_{eq} [h/año], puede obtenerse el caudal másico anual, m_{anual} [t/año], la energía térmica anual, Q_{anual} [GWh/año] y la exergía anual, B_{anual} [GWh/año] mediante las expresiones:

$$m_{anual} = \frac{m}{1000} \cdot h_{eq}$$

Ecuación 23

$$Q_{anual} = \frac{\dot{Q}}{1000} \cdot h_{eq}$$

Ecuación 24

$$B_{anual} = \frac{\dot{B}}{1000} \cdot h_{eq}$$

Ecuación 25

Obteniéndose:

	h_{eq} [h/año]	m_{anual} [t/año]	Q_{anual} [GWh/año]	B_{anual} [GWh/año]
Carbón	6.200	$1,483 \cdot 10^6$	9.945	10.376
Gas excedente	6.200	60.000	785,9	841,7
Electricidad central	6.200	-	3.968	3.968
Ceniza	6.200	172.778	-	21,79
Dióxido de azufre	6.200	19.280	-	25,98
Caliza desulfuración	6.200	31.631	-	1,933
Agua desulfuración	6.200	379.573	-	4,51
Yeso	6.200	51.815	-	2,036
Electricidad desulfuración	6.200	-	24,8	24,8
Vapor proceso	2.637	-	416,7	193,4
Vapor District Heating	1.724	-	258,6	63,8
Agua piscifactoría	6.200	-	213,8	14
Vapor turbina	6.200	-	-	4.487

Tabla 30 – Resultados modelo termodinámico de los flujos del caso base

4. Caso alternativo

4.1 Estructura física

En el caso alternativo no se considera la integración entre las empresas de la Simbiosis Industrial. Por tanto, cada empresa opera de forma independiente de modo que las integraciones que configuran el caso base son sustituidas por procesos alternativos convencionales, como se muestra en la siguiente tabla:

	Integración	Proceso alternativo
1	Gas excedente	Consumo adicional de carbón
2	Vapor de proceso	Caldera gas natural
3	<i>District Heating</i>	Caldera gas natural
4	Piscifactoría	Caldera gas natural
5	Cenizas	Producción de clinker
6	Yeso	Importación yeso natural

Tabla 31 – Integraciones y procesos alternativos (Elaboración propia)

En la siguiente figura se muestra el diagrama físico del caso alternativo:

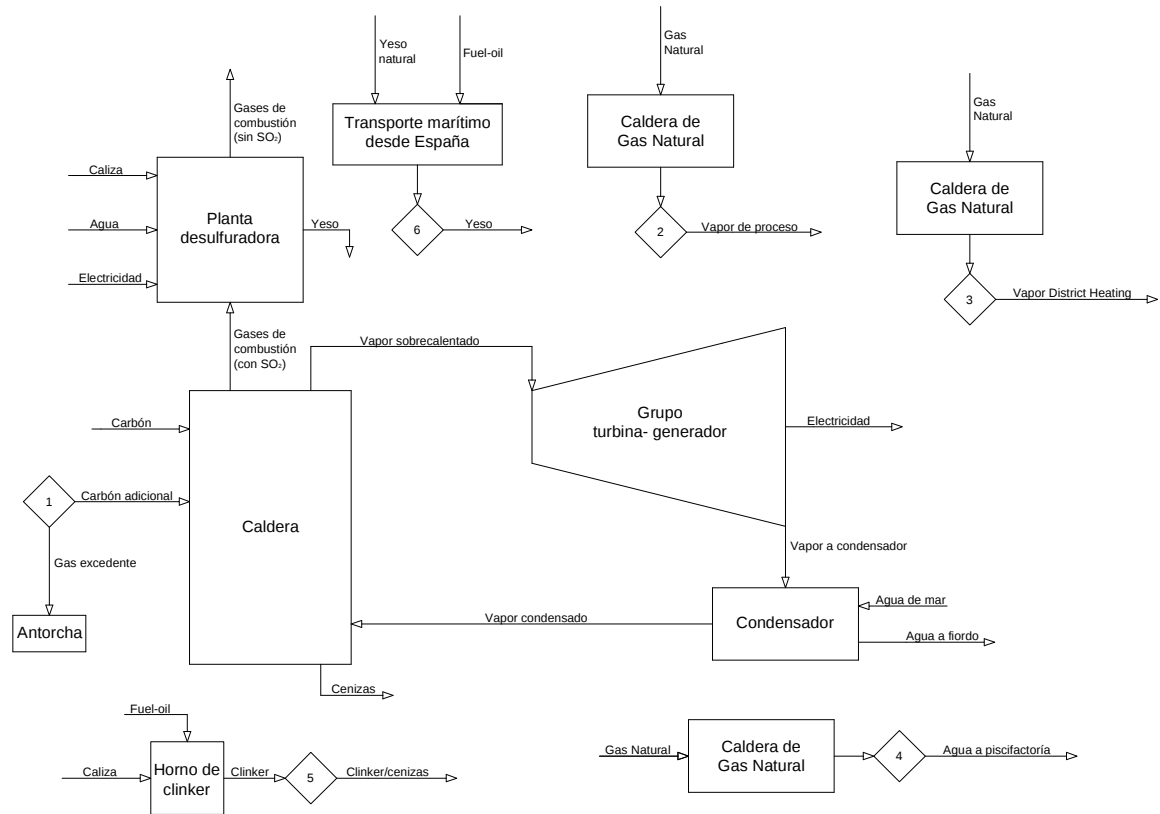


Figura 28 – Diagrama físico del caso alternativo (Elaboración propia)

4.2 Modelo termodinámico

Carbón

La combustión de gas excedente de la refinería en la central térmica se suple con un mayor consumo de carbón. Sin embargo, puesto que en esta nueva situación la caldera de la central térmica no produce energía térmica para el abastecimiento de vapor de proceso y *District Heating*, también debe considerarse una disminución en el nuevo consumo de carbón. No ocurre lo mismo con la energía que se destinaba a la piscifactoría, ya que se disipa en el condensador de la central sin contribuir a la disminución del consumo de carbón.

Por tanto, conocida la potencia térmica original del carbón, $\dot{Q}_{carbón}$ [MW], la nueva potencia térmica del carbón sin integración, $\dot{Q}_{carbón_{SI}}$ [MW], viene determinada por dos factores. Por un lado, se le debe sumar la potencia que aportaba el gas excedente suministrado desde *Statoil*, $\dot{Q}_{GN}$ [MW]. Y por otro, debe multiplicarse por un coeficiente, k , que considere la disminución en la potencia exergética anual entregada por la caldera, x_{v+DH} , al no suministrar vapor de proceso ni *District Heating*. Dicho coeficiente de disminución se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones:

$$k = (1 - x_{v+DH})$$

Ecuación 26

$$x_{v+DH} = \frac{B_{anual,v} + B_{anual,DH}}{B_{anual,T} + B_{anual,v} + B_{anual,DH} + B_{anual,p}}$$

Ecuación 27

Obteniéndose: $k = 0,946$.

Por consiguiente, la nueva potencia térmica del carbón sin integración, $\dot{Q}_{carbón_{SI}}$ [MW], se obtiene aplicando la siguiente expresión:

$$\dot{Q}_{carbón_{SI}} = k \cdot (\dot{Q}_{carbón} + \dot{Q}_{GN})$$

Ecuación 28

Entonces, el nuevo caudal másico de carbón, $m_{carbón_{SI}} [kg/h]$, se calcula mediante la ecuación 1. Y por último, empleando la ecuación 5 se halla la potencia exergética del carbón sin integración, $\dot{B}_{carbón_{SI}} [MW]$.

Los resultados obtenidos para el flujo de carbón se muestran en la siguiente tabla:

	$m [kg/h]$	$\dot{Q} [MW]$	$\dot{B} [MW]$
Carbón	244.162	1.637	1.708

Tabla 32 – Caudal másico, potencia térmica y potencia exergética del carbón de Asnaes

Puesto que el flujo másico de carbón se incrementa respecto al caso base, debe considerarse como afecta según el modelo termodinámico planteado sobre los flujos que dependen directamente del carbón consumido:

	$m [kg/h]$	$\dot{B} [MW]$
Ceniza	28.445	3,587
Dióxido de azufre	3.174	4,276
Caliza desulfuración	5.208	0,3182
Agua desulfuración	62.490	0,7426
Yeso	8.530	0,3352

Tabla 33 – Caudal másico y potencia exergética de los flujos que varían respecto el case base

Gas natural

El suministro de energía térmica desde la central térmica para los procesos externos se sustituye por la producción autónoma mediante calderas de gas natural.

La potencia térmica del gas natural por caldera, $\dot{Q}_{GN_{caldera}} [MW]$, se obtiene considerando un rendimiento térmico, $\eta_{caldera}$, del 90%, mediante la expresión:

$$\dot{Q}_{GN_{caldera}} = \frac{\dot{Q}}{\eta_{caldera}}$$

Ecuación 29

Calculada la potencia térmica, $\dot{Q}_{GN_{caldera}} [MW]$, y conocido el PCI del gas natural, $PCI_{GN} [MJ/kg]$, mediante la ecuación 1 se halla el caudal másico, $m_{GN_{caldera}} [kg/h]$.

Según la ecuación 5, la potencia exergética del gas natural necesaria por caldera, $\dot{B}_{GN_{caldera}}$ [MW], viene determinada por el caudal másico, $m_{GN_{caldera}}$ [kg/h], y la exergía específica, b_{GN} [kJ/kg].

Obteniéndose, para cada una de las calderas los siguientes valores:

		m [kg/h]	$\dot{Q}$ [MW]	$\dot{B}$ [MW]
Gas Natural	Caldera vapor proceso	13.403	175,6	188
	Caldera <i>District Heating</i>	12.725	166,7	178,5
	Caldera piscifactoría	2.925	38,32	41,04

Tabla 34 – Caudal másico, potencia térmica y potencia exergética del gas natural de las calderas

Flujos producción clinker

El aprovechamiento de la ceniza en la cementera se sustituye por una mayor producción de clinker, es decir, debe producirse la cantidad de clinker correspondiente al flujo másico de ceniza generado. Por consiguiente, el caudal másico de clinker producido en el horno, $m_{clinker}$ [kg/h], es igual al caudal másico de ceniza generada en la central, m_{ceniza} [kg/h]. Entonces, considerando que su exergía específica, $b_{clinker}$ [kJ/kg], es 1.240 kJ/kg (Valero et al, 2010), mediante la ecuación 5 se obtiene la potencia exergética del clinker, $\dot{B}_{clinker}$ [MW].

El horno donde se produce el clinker se alimenta con caliza como materia prima, siendo necesarios 1,54 kilogramos de caliza por kilogramo de clinker producido (Valero et al, 2010). Por tanto, conocido el flujo másico de clinker, $m_{clinker}$ [kg/h], el consumo de caliza, m_{caliza} [kg/h], se calcula mediante la expresión siguiente:

$$m_{caliza} = 1,54 \cdot m_{clinker}$$

Ecuación 30

A partir del flujo másico de caliza, como se conoce su exergía específica, b_{caliza} [kJ/kg], aplicando la ecuación 5 se obtiene su potencia exergética, $\dot{B}_{caliza}$ [MW].

En cuanto al consumo energético de la producción de clinker, son necesarios 4.195 kJ de fuel por kilogramo de clinker producido (Valero et al, 2010), por lo que la potencia térmica de fuel, $\dot{Q}_{fuel-oil}$ [MW], se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{fuel-oil} = \frac{4195}{1000} \cdot \frac{m_{ceniza}}{3600}$$

Ecuación 31

Por otro lado, se considera que el combustible empleado es fuel-oil nº 2, cuyo poder calorífico superior, $PCS_{fuel-oil}$, es 140.000 Btu/gallon (Randolph y Masters, 2008). La conversión de unidades se realiza mediante la expresión siguiente (Ray et al, 2005):

$$PCS_{fuel-oil} [MJ/m^3] = 0,2321 \cdot PCS_{fuel-oil} [Btu/gallon]$$

Ecuación 32

Obteniéndose: $PCS_{fuel-oil} = 32.494 \text{ MJ/m}^3$.

La densidad del fuel-oil nº 2, $\rho_{fuel-oil}$, está comprendida en el rango siguiente: 870 – 950 kg/m³ (ATSDR, 1995), siendo la densidad media, $\rho_{fuel-oil} = 910 \text{ kg/m}^3$. Entonces, según la ecuación 25, tomando el poder calorífico superior calculado, $PCS_{fuel-oil} [MJ/m^3]$, y dividiéndolo por dicha densidad media, $\rho_{fuel-oil} [kg/m^3]$, se obtiene: $PCS_{fuel-oil} = 35,71 \text{ MJ/kg}$.

$$PCS_{fuel-oil} [MJ/kg] = \frac{PCS_{fuel-oil} [MJ/m^3]}{\rho_{fuel-oil}}$$

Ecuación 33

Además, se conoce que la relación entre el poder calorífico superior, $PCS_{fuel-oil}$, y el inferior, $PCI_{fuel-oil}$, es 1,06 (Randolph y Masters, 2008). Por tanto, el poder calorífico inferior del fuel-oil nº 2, $PCI_{fuel-oil} [MJ/kg]$, se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$PCI_{fuel-oil} = \frac{PCS_{fuel-oil}}{1,06}$$

Ecuación 34

Obteniendo: $PCI_{fuel-oil} = 33,69 \text{ MJ/kg}$.

Por consiguiente, conocidos los datos de potencia térmica de fuel-oil, $\dot{Q}_{fuel-oil} [MW]$, y poder calorífico inferior, $PCI_{fuel-oil} [MJ/kg]$, mediante la ecuación 1 se halla el caudal másico consumido, $m_{fuel-oil} [kg/h]$.

Para calcular la potencia exergética del fuel-oil se procede como en el caso del carbón y el gas natural, o sea que la exergía específica, $b_{fuel-oil} [kJ/kg]$, se aproxima al poder calorífico superior, $PCS_{fuel-oil} [MJ/kg]$, de modo que aplicando la ecuación 5 se obtiene la potencia exergética del fuel-oil, $\dot{B}_{fuel-oil} [MW]$.

En la tabla siguiente se muestran los resultados referentes a la producción de clinker:

	$m [kg/h]$	$\dot{Q} [MW]$	$\dot{B} [MW]$
Caliza	42.916	-	2,623
Fuel-oil	3.470	32,47	34,42
Clinker	27.867	-	9,599

Tabla 35 – Caudal másico, potencia térmica y potencia exergética de los flujos del horno de clinker

Fuel-oil transporte marítimo

El suministro de yeso a Gyproc desde la central térmica se reemplaza por la importación de yeso natural desde España. Por tanto, debe ser considerado el consumo de combustible en el transporte por barco desde España.

Los datos necesarios son, en primer lugar, la intensidad energética del transporte marítimo internacional con fuel-oil, I_{tpte} , cuyo valor es 0,2 kJ/kg·km (UNCTAD, 2006). En segundo lugar, la distancia marítima considerada, D , desde el puerto marítimo de Algeciras al de Odense, la cual es 3.180 km (www.searates.com, 2011). Y por último, la carga a transportar, $m_{tpte} [kg/h]$, que se corresponde con la cantidad de yeso producido en la planta desulfuradora, $m_{yeso} [kg/h]$.

Partiendo de los datos anteriormente definidos, la potencia térmica del fuel-oil, $\dot{Q}_{tpte} [MW]$, se calcula según la expresión:

$$\dot{Q}_{tpte} = \frac{I_{tpte}}{1000} \cdot D \cdot \frac{m_{tpte}}{3600}$$

Ecuación 35

A continuación, utilizando la ecuación 1 se obtiene el flujo másico de fuel-oil consumido, m_{tpte} [kg/h], a partir del poder calorífico inferior, $PCI_{fuel-oil}$ [MJ/kg], y de la potencia térmica, $\dot{Q}_{tpte}$ [MW].

Por tanto, considerando la exergía específica del fuel-oil nº 2, $b_{fuel-oil}$ [kJ/kg], y el caudal másico hallado, m_{tpte} [kg/h], se calcula la potencia exergética correspondiente al transporte marítimo de yeso desde España, $\dot{B}_{tpte}$ [MW].

	m [kg/h]	$\dot{Q}$ [MW]	$\dot{B}$ [MW]
Fuel-oil	157,8	1,476	1,565

Tabla 36 – Caudal másico, potencia térmica y exergética del fuel-oil del transporte de yeso

4.3 Resultados anuales

Utilizando las ecuaciones 23, 24 y 25, se obtienen los siguientes resultados anuales:

	h_{eq} [h/año]	m_{anual} [t/año]	Q_{anual} [GWh/año]	B_{anual} [GWh/año]
Carbón	6.200	$1,514 \cdot 10^6$	10.151	10.591
Gas excedente*	6.200	60.000	785,9	841,7
Electricidad central	6.200	-	3.968	3.968
Ceniza*	6.200	176.358	-	22,24
Dióxido de azufre	6.200	19.679	-	26,51
Caliza desulfuración	6.200	32.287	-	1,973
Agua desulfuración	6.200	387.440	-	4,604
Yeso*	6.200	52.889	-	2,078
Electricidad desulfuración	6.200	-	24,8	24,8
Vapor proceso	2.637	-	416,7	193,4
Vapor District Heating	1.724	-	258,6	63,8
Agua piscifactoría*	6.200	-	213,8	14
Vapor turbina	6.200	-	-	4.487
Gas Natural proceso	2.637	35.346	463	495,8
Gas Natural District Heating	1.724	21.938	287,3	307,7
Gas Natural piscifactoría	6.200	18.137	237,6	254,4
Caliza producción clinker	6.200	266.077	-	16,26
Fuel-oil producción clinker	6.200	21.514	201,3	213,4
Clinker	6.200	172.778	-	59,51
Yeso natural	6.200	51.815	-	2,036
Fuel-oil transporte yeso	6.200	978,2	9,154	9,703

Tabla 37 – Resultados modelo termodinámico de los flujos del caso alternativo

Los flujos marcados con un asterisco corresponden a integraciones consideradas en el caso base, los cuales en el caso alternativo sin integración se siguen generando aunque no se considere su aprovechamiento al plantear los procesos que sustituyen a dichas integraciones.

ANEXO 3: ANÁLISIS TERMoeCONÓMICO

1. Introducción

El presente anexo se dedica a la motivación principal de este trabajo, que no es otra que la de aplicar los conceptos que configuran la Termoeconomía a la Ecología Industrial, y en particular, al caso de estudio planteado sobre el modelo de Simbiosis Industrial de Kalundborg. También se presentan los conceptos básicos necesarios para entender el análisis termoeconómico.

2. Termoeconomía

2.1 Antecedentes

La palabra Termoeconomía fue introducida por M. Tribus y R. Evans a finales de la década de los 50, desarrollando la idea de asignar costes a los flujos de exergía y formulando balances de costes a los componentes de un sistema energético (Torres, 2004).

La Teoría del Coste Exergético (Valero, Lozano y Muñoz, 1986) propone un método para determinar la cantidad de recursos necesarios para obtener un producto, utilizando la exergía como criterio para distribuir los costes. El método, basado en la resolución de un sistema de ecuaciones, permite calcular los valores numéricos, pero no identificar las causas del proceso de formación de los costes.

La Exergoeconomía Simbólica (Torres, 1991) es una técnica, basada en la Teoría del Coste Exergético y el Análisis Input-Output, cuyo objetivo es obtener ecuaciones generales que relacionen el comportamiento individual de los procesos que componen un sistema con el comportamiento global del mismo y analizar el proceso de formación de los costes.

Las bases matemáticas de la Termoeconomía se culminan con la Teoría Estructural de la Termoeconomía (Erlach, Serra y Valero, 1999), donde se propone una formulación matemática estándar para todas las demás metodologías termoeconómicas que puedan ser expresadas por ecuaciones lineales.

2.2 Fundamentos

Un concepto clave en la Termoeconomía es el *coste exergético* (B^*), el cual se define como el número de unidades de exergía necesarios para producir la exergía de un flujo de masa y/o energía (B). Por ejemplo, en la planta de cogeneración de la figura, el coste exergético de la producción eléctrica neta es la exergía proporcionada por el

gas natural consumido en dicha planta. Los costes son una medida de la eficiencia termodinámica de los procesos de producción para generar dichos flujos.

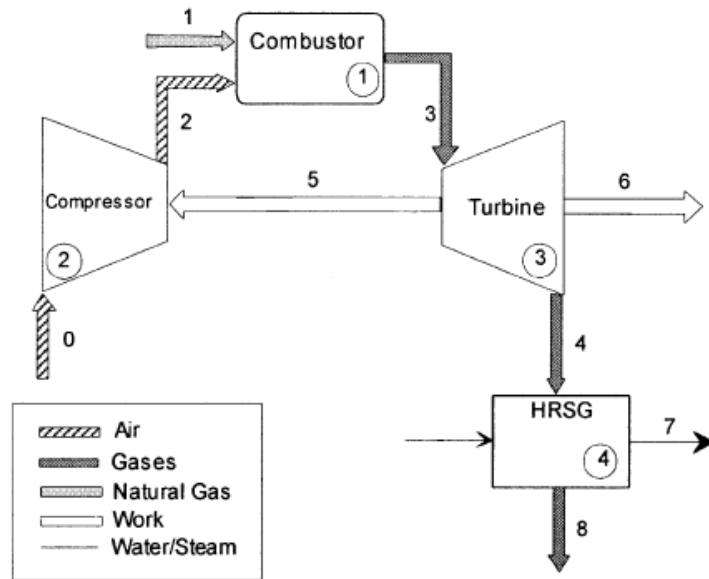


Figura 29 – Diagrama físico de la planta de cogeneración (Fuente: Torres et al, 2002)

El *coste exergético unitario* (k^*) de un flujo de masa o energía es el cociente entre la exergía y el coste exergético del flujo, es decir, es la cantidad de recursos consumidos para obtener una unidad de ese flujo:

$$k^* = \frac{B^*}{B}$$

Ecuación 36

Por lo tanto, si el coste exergético unitario anterior es 3, significa que la exergía de tres unidades de gas natural es consumida para obtener una unidad de energía eléctrica en la red.

Otra idea importante en Termoeconomía es que cada componente tiene un propósito productivo particular definido, que contribuye a alcanzar el propósito final de producción del sistema. Para definir este propósito, se considera *fuel* (F) de un componente a la exergía suministrada a éste. Constituye la exergía de las entradas de flujos de energía, componentes de una mezcla o reacción química, así como la exergía cedida por una corriente. La exergía obtenida o recuperada en un componente se considera *producto* (P), siendo ésta la exergía de las salidas de flujos de energía,

productos de una mezcla o reacción química y el incremento de exergía de una corriente. Como en los procesos reales la exergía se destruye generando *irreversibilidad (I)*, el balance de exergía asociado a cada componente del sistema se puede expresar del siguiente modo:

$$F = P + I$$

Ecuación 37

Por lo tanto, la cantidad de fuel consumida para producir un producto depende de la cantidad de exergía destruida en el proceso. La cantidad de unidades de fuel necesarias para producir una unidad de exergía del producto es el *consumo exergético unitario*, que es equivalente a la inversa del rendimiento exergético:

$$k = \frac{F}{P} = \frac{1}{\eta_{ex}}$$

Ecuación 38

Combinando las dos ecuaciones anteriores puede observarse que su valor es más alto conforme más irreversible es el proceso:

$$k = 1 + \frac{I}{P}$$

Ecuación 39

La definición fuel-producto se suele sistematizar para equipos convencionales y se representa en la *estructura productiva* del sistema.

Nº	Componente	Fuel	Producto	Residuo
1	Combustor	B ₁	B ₃ – B ₂	
2	Compresor	B ₅	B ₂	
3	Turbina	B ₃ – B ₄	B ₆	
4	HRSG	B ₄ – B ₈	B ₇	B ₈

Tabla 38 – Definición fuel-producto de los componentes (Fuente: Torres et al, 2002)

La *estructura productiva* es una pieza clave para comprender la formación de costes de los productos, subproductos y residuos generados. Se define como la representación del proceso de producción de un sistema energético, de modo que las entradas de cada proceso corresponden a los recursos consumidos y las salidas a los productos obtenidos. Sin embargo, los recursos y productos de cada componente no corresponden necesariamente con las entradas y salidas de los componentes físicos, los cuales a su vez tampoco tienen porqué coincidir con los componentes definidos en la estructura productiva. De este modo, los componentes físicos se pueden desagregar para favorecer el análisis de sus recursos, productos o residuos, y viceversa, se pueden agregar unos con otros para simplificar el modelo (Valero et al, 2010).

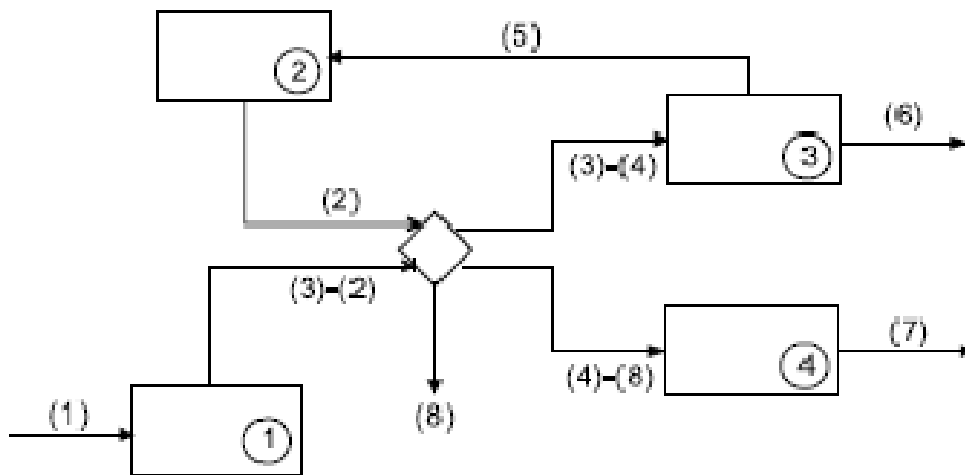


Figura 30 – Estructura productiva de la planta de cogeneración (Fuente: Torres et al, 2002)

La Exergoeconomía Simbólica proporciona un marco general para el análisis termoeconómico basado en notación matricial que permite la implementación computacional (Torres, 1991). Todos los componentes se numeran empezando por 1, mientras que el número 0 corresponde al ambiente, que es considerado como otro componente que interactúa con el sistema.

La *tabla fuel-producto* es la representación matricial de la estructura productiva del sistema. Cada elemento de la tabla (B_{ij}) representa la producción del componente i que se transforma en recurso del componente j , y por tanto, cada B_{i0} representa la porción del componente i que llega a ser producto final:

	F_0	F_1	F_2	F_3	F_4	Total
P_0	0	11781	0	0	0	11781
P_1	0	0	0	4156	2474	6631
P_2	0	0	0	1627	968	2595
P_3	2500	0	2977	0	0	5477
P_4	2355	0	0	0	0	2355
Total	4855	11781	2977	5783	3433	

Tabla 39 – Tabla fuel-producto para la planta de cogeneración (Torres et al, 2002)

El fuel y producto de cada componente se calcula como:

$$F_i = \sum_{j=0}^n B_{ji}$$

Ecuación 40

$$P_i = \sum_{j=0}^n B_{ij}$$

Ecuación 41

El *consumo exergético unitario* (k_j) de un componente corresponde a la suma de los *coeficientes técnicos de producción* (κ_{ij}):

$$k_j = \sum_{i=0}^n \kappa_{ij} = \frac{F_j}{P_j}$$

Ecuación 42

Cada coeficiente κ_{ij} representa la porción de producción del componente i necesaria para obtener una unidad de producción en el componente j :

$$\kappa_{ij} = \frac{B_{ij}}{P_j}$$

Ecuación 43

La ecuación 41 puede expresarse en términos de los consumos exergéticos unitarios de la forma:

$$P_i = B_{i0} + \sum_{j=1}^n \kappa_{ij} \cdot P_j$$

Ecuación 44

En notación matricial, se expresa como:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_S + \langle \mathbf{KP} \rangle \mathbf{P}$$

Ecuación 45

Donde $\mathbf{P}_S$ es un vector ($n \times 1$) que representa la contribución de cada componente a la producción final del sistema, y $\langle \mathbf{KP} \rangle$ es una matriz ($n \times n$) cuyos elementos son los coeficientes técnicos de producción. Esta expresión vale para relacionar la producción de cada componente como una función de su consumo unitario y la producción final:

$$\mathbf{P} = |\mathbf{P}\rangle \mathbf{P}_S \quad \text{donde} \quad |\mathbf{P}\rangle = (\mathbf{U}_D - \langle \mathbf{KP} \rangle)^{-1}$$

Ecuación 46

De la misma forma se puede expresar la irreversibilidad de cada componente como:

$$\mathbf{I} = |\mathbf{I}\rangle \mathbf{P}_S \quad \text{donde} \quad |\mathbf{I}\rangle = (\mathbf{K}_D - \mathbf{U}_D) |\mathbf{P}\rangle$$

Ecuación 47

Los recursos totales del sistema se obtienen:

$$F_T = {}^t\kappa_e |P\rangle P_S$$

Ecuación 48

Donde ${}^t\kappa_e$ es un vector ($n \times 1$) cuyos elementos contienen el consumo unitario de los recursos de entrada al sistema (κ_{0i}).

Por definición, todos los flujos que constituyen el producto de un componente tienen asignado el mismo coste exergético unitario, dado que son resultado del mismo proceso de producción. Por tanto:

$$k_{ij}^* = k_{p,i}^*$$

Ecuación 49

Aplicando el balance de costes en todos los componentes, se puede demostrar que el coste exergético unitario de los flujos se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$k_P^* = {}^t|P\rangle \kappa_e$$

Ecuación 50

3. Diagnóstico termoeconómico

3.1 Antecedentes

Un hito importante en el desarrollo del diagnóstico termoeconómico fue la iniciativa *TADEUS* (*Thermoeconomic Approach to the Diagnosis of Energy Utility Systems*), donde se propuso un caso de prueba para que los investigadores aplicaran las diferentes técnicas de diagnóstico termoeconómico y poder comparar los resultados obtenidos. En un primer artículo (Valero et al, 2004a) se revisan los aspectos principales a considerar en el diagnóstico termoeconómico y se propone un ciclo combinado como caso de prueba. En un segundo artículo (Valero et al, 2004b) se profundiza en la forma de interpretar y analizar el diagnóstico termoeconómico.

En otros artículos científicos, varios autores presentan sus técnicas y las aplican al caso de prueba propuesto.

3.2 Fundamentos

La metodología aquí expuesta se describe detalladamente en el libro: *Thermoeconomic Diagnosis of Energy Systems* (Usón y Valero, 2010). Además, para facilitar la comprensión de los fundamentos del diagnóstico termoeconómico se va a emplear el ejemplo presentado en el apartado 2.3 del presente anexo.

Se asume como la situación de referencia de la planta las condiciones de diseño de la misma bajo la carga considerada. Mientras que la operación de la planta puede definirse mediante un test de rendimiento o un simulador.

Los valores de sus flujos exergéticos en diseño y en operación se muestran en la tabla siguiente:

Flujo (kW)	1	2	3	4	5	6	7	8
Diseño	11781	2704	9614	3831	2977	2500	2355	388
Operación	11914	2758	9753	3887	3056	2500	2355	424

Tabla 40 – Valores exergéticos de los flujos para la planta de cogeneración en diseño y operación
(Fuente: Torres et al, 2002)

El consumo adicional de combustible se puede expresar como la diferencia entre el consumo de recursos de la planta en operación (x) y en diseño (x_0):

$$\Delta F_T = F_T(x) - F_T(x_0)$$

Ecuación 51

Dicho consumo es debido a los incrementos de irreversibilidad en cada componente y a la variación del producto suministrado por la planta:

$$\Delta F_T = \sum_{i=1}^n \Delta I_i + \Delta P_S$$

Ecuación 52

El consumo adicional de combustible se puede descomponer de un modo más preciso a partir de la ecuación 48 obteniéndose la fórmula conocida como *impacto en fuel*. Es de gran importancia en el diagnóstico termoeconómico porque relaciona la variación en el consumo de recursos del sistema con las variaciones del consumo exergético unitario de los componentes y de la producción:

$$\Delta F_T = (\Delta {}^t\kappa_e + {}^t\mathbf{k}_P^*(x)\Delta\langle\mathbf{KP}\rangle)\mathbf{P}(x_0) + {}^t\mathbf{k}_P^*\Delta\mathbf{P}_s$$

Ecuación 53

En formato escalar:

$$\Delta F_T = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=0}^n k_{P,j}^*(x) \Delta \kappa_{ji} P_i(x_0) + k_{P,i}^*(x) \Delta P_{S,i} \right)$$

Ecuación 54

Donde $P_{S,i}$ corresponde a la porción de producto de la planta que proviene del componente i .

La descomposición del incremento de la irreversibilidad en un componente se divide en dos partes: una debida a la variación del consumo exergético unitario del componente y otra debida a la variación de su producción.

Los valores del incremento del consumo exergético para la planta de cogeneración considerada se muestran en la tabla siguiente:

	$\Delta\kappa_e$			
	0,4006	0,0000	0,0000	0,0000
$\Delta\langle\mathbf{KP}\rangle$	0,0000	0,0000	-0,1667	0,3857
	0,0000	0,0000	0,1593	0,4636
	0,0000	1,1147	0,0000	0,0000
	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Δk	0,4006	1,1147	-0,0074	0,8493

Tabla 41 – Incremento del consumo exergético unitario (Fuente: Torres et al, 2002)

La variación del consumo exergético unitario de cada componente aumenta el consumo de recursos y las irreversibilidades en una cantidad que llamaremos *malfunción* o *irreversibilidad endógena*:

$$MF_{ji} = \Delta \kappa_{ji} P_i(x_0)$$

Ecuación 55

$$MF_i = \Delta k_i P_i(x_0) = \sum_{j=0}^n MF_{ji}$$

Ecuación 56

El consumo externo de recursos asociado es consecuentemente el coste de la *malfunción*:

$$MF_{ji}^* = k_{p,j}^*(x) MF_{ji}$$

Ecuación 57

$$MF_i^* = \sum_{j=0}^n MF_{ji}^*$$

Ecuación 58

Considerando el coste de la malfunción, el impacto en fuel puede reescribirse como:

$$\Delta F_T = \sum_{i=1}^n MF_i^* + \sum_{i=1}^n k_{p,i}^*(x) \Delta P_{S,i}$$

Ecuación 59

La figura 31 compara el impacto en fuel y el aumento de irreversibilidad o el ahorro técnico de exergía de cada componente y también compara la malfunción y el impacto

en fuel de cada componente. Aparecen tres malfunciones visibles en la planta: en la cámara de combustión, compresor y caldera de recuperación. La mayor irreversibilidad generada es la de la cámara de combustión pero el mayor impacto en fuel reside en el compresor:

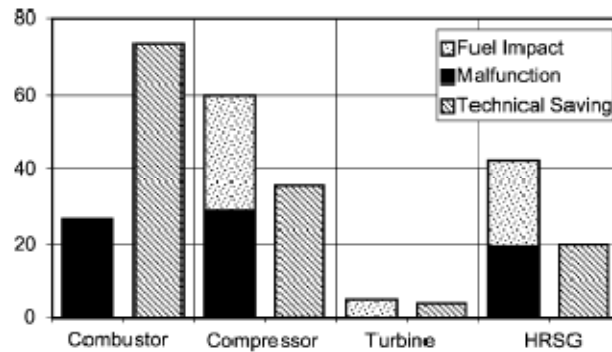


Figura 31 – Impacto en fuel, malfunción y ahorro técnico de exergía (Fuente: Torres et al, 2002)

Por tanto, se observa que no hay relación directa entre impacto en fuel y el aumento de irreversibilidades. Cuanto más avanzado es el proceso productivo dentro del sistema, mayor es el coste de la malfunción y por lo tanto su impacto en fuel. Pero la degradación de un componente normalmente forzará a otros componentes a adaptar su comportamiento para mantener su producción y modificar la irreversibilidad generada. En la figura 32 se muestra cómo un incremento en el consumo exergético unitario de un componente no sólo incrementará la irreversibilidad en sí mismo sino que también lo hará en los componentes previos al mismo en el sistema:

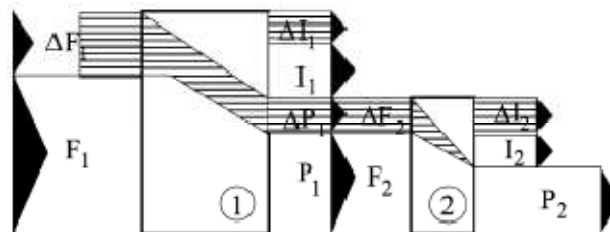


Figura 32 – Impacto en fuel y malfunción (Fuente: Torres et al, 2002)

La variación de la producción de un componente modifica el consumo de recursos y las irreversibilidades en una cantidad que llamaremos *disfunción* o *irreversibilidad exógena*:

$$DF_i = (k_i(x) - 1)\Delta P_i$$

Ecuación 60

Dicha variación en la producción puede deberse a malfunciones en otros componentes, induciendo al componente en cuestión a consumir más recursos para proporcionar la producción adicional que requieren los otros componentes, o a variaciones en la producción de la planta:

$$DF_i = \sum_{j=1}^n DF_{ij} + DF_{S,i}$$

Ecuación 61

Donde DF_{ij} es la disfunción en el componente i causada por cambios en el componente j , y $DF_{S,i}$ es la disfunción en el componente i causada por la variación en la producción de la planta.

El gráfico siguiente describe la causa del aumento de la irreversibilidad en el ejemplo considerado, como la suma de las malfunciones y las disfunciones generadas por el resto de componentes:

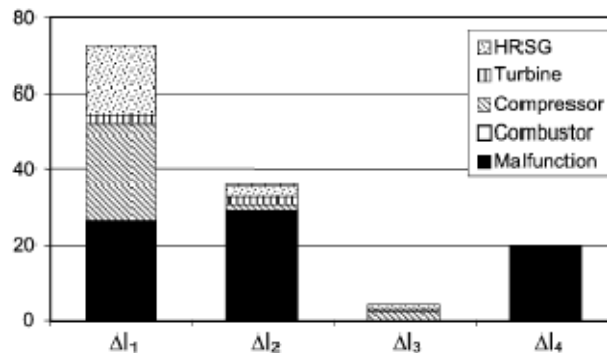


Figura 33 – Análisis de las causas de la irreversibilidad en kW (Fuente: Torres et al, 2002)

A continuación, se muestra el impacto en fuel como suma de la malfunción y la disfunción generada en cada equipo por las malfunciones del resto de equipos:

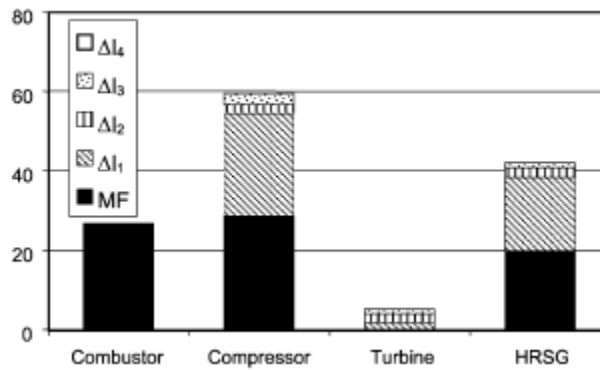


Figura 34 – Malfunciones y disfunciones en kW (Fuente: Torres et al, 2002)

Resumiendo, la malfunción sólo afecta al comportamiento de los componentes, mientras que la disfunción es el resultado de cómo los componentes se deben adaptar para mantener la producción final.

Hasta ahora, únicamente se han considerado los flujos productivos. Sin embargo, hay flujos residuales que son necesarios en el sistema pero que no poseen un propósito productivo, como por ejemplo: los gases de combustión o la energía térmica disipada en el condensador. Puesto que participan en el proceso productivo sin aportar ninguna utilidad su coste debe ser asignado a otros dispositivos. La opción más adecuada es asignarlo al componente donde han sido producidos; por ejemplo, el coste de los gases de combustión debe asignarse al proceso de combustión y el coste de la energía térmica disipada en el condensador es normalmente compartido en función de la entropía generada en cada uno de los componentes.

El balance de coste de un componente de la estructura productiva donde se haya definido algún residuo es:

$$P^* = F^* + R^*$$

Ecuación 62

Donde R^* es el coste del residuo asignado al componente en cuestión (aunque haya sido producido en otros componentes). Para establecer cómo se distribuye el coste de los residuos se define la matriz $\langle RP \rangle$, cuyos elementos RP_{ij} representan la fracción de coste del residuo originada en el componente i que es asignada al componente j . Por tanto, los costes unitarios de los flujos están formados por dos factores, por un lado por el coste de los flujos productivos (k_p^e), los cuales se obtienen sin considerar el

coste de los residuos, y por otro por el efecto de la asignación del coste de los residuos (k_p^{*r}):

$$k_p^* = k_p^{*e} + k_p^{*r}$$

Ecuación 63

El modo más adecuado para introducir los flujos residuales en el diagnóstico termoeconómico es considerando dichos flujos como salidas del sistema, de manera que aunque realmente no sean flujos productivos, tengan la misma formulación matemática. Procediendo de este modo, el impacto en fuel puede calcularse como:

$$\Delta F_T = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=0}^n k_{p,j}^{*e}(x) \Delta \kappa_{ji} P_i(x_0) + k_{p,i}^{*e}(x) \Delta P_{S,i} + k_{p,i}^{*e}(x) \Delta P_{R,i} \right)$$

Ecuación 64

Donde P_R corresponde a los residuos generados por la planta. Cabe destacar que solamente se consideran los costes unitarios de los flujos productivos ($k_{p,i}^{*e}$) porque los residuos se consideran salidas del sistema únicamente en el diagnóstico.

La descomposición del impacto en fuel basada en el coste de las malfunciones también debe modificarse para tener en consideración los flujos residuales:

$$\Delta F_T = \sum_{i=1}^n MF_i^* + \sum_{i=1}^n k_{p,i}^{*e}(x) \Delta P_{S,i} + \sum_{i=1}^n k_{p,i}^{*e}(x) \Delta P_{R,i}$$

Ecuación 65

Donde los costes de las malfunciones (MF_i^*) se calculan usando $k_{p,i}^{*e}$, en lugar de $k_{p,i}^*$.

Finalmente, el efecto de los residuos debe considerarse en la descomposición de la disfunción:

$$DF_i = \sum_{j=1}^n DF_{ij} + DF_{S,i} + DF_{R,i}$$

Ecuación 66

4. Análisis termoeconómico aplicado al modelo de Simbiosis Industrial

Introducidos los fundamentos sobre Termoeconomía y diagnóstico termoeconómico, en este apartado son aplicadas al caso de estudio definido en el anexo 2.

Se emplea el software *TAESS (Thermoeconomic Analysis of Energy Systems Software)*, el cual permite calcular los costes exergéticos y aplicar el diagnóstico termoeconómico a partir de la estructura productiva y los valores exergéticos de los flujos involucrados para las condiciones de diseño y operación (Torres, Valero y Pérez, 2007).

4.1 Estructura productiva

La definición de la estructura productiva ha sido una de las labores más complejas del presente trabajo. El motivo principal es que el diagnóstico termoeconómico, y a su vez, la estructura productiva, está orientado a la comparación de dos situaciones cercanas: “diseño” y “operación”, donde los valores de los flujos varíen mínimamente en un mismo sistema productivo. Sin embargo, en el caso considerado, el objetivo es comparar la situación de integración que representa el ecoparque (caso base) con una situación ficticia donde no exista integración entre las partes (caso alternativo). Por tanto, en el caso de estudio considerado, las situaciones con integración y sin integración, suponen además de variar los flujos, modificar el sistema productivo.

Por esta razón existen componentes que en el caso con integración se comportan como uniones, mientras que en el caso sin integración corresponden a procesos alternativos e independientes que consumen recursos externos para satisfacer su producción. Entre estos componentes se encuentran las calderas auxiliares para la producción de energía térmica (nº4, 5 y 6) así como el horno de clinker (nº7) y el transporte marítimo de yeso natural (nº8).

En cuanto a la caldera de la central térmica (nº2), se ha desagregado de la misma un componente ficticio (nº1) que separa las cenizas del carbón y además lleva a cabo la desulfuración de los gases de combustión.

El componente nº3 representa el grupo turbina-generador encargado de la producción de electricidad en la central térmica.

Todos los componentes definidos tiene un carácter productivo excepto el componente nº9, de carácter disipativo, que corresponde a la antorcha donde se quema el gas excedente de *Statoil* en el caso sin integración. De este modo, puesto que su misión es disipar el gas excedente cuando no es aprovechado en la caldera de la central, el coste del residuo es asignado a la caldera.

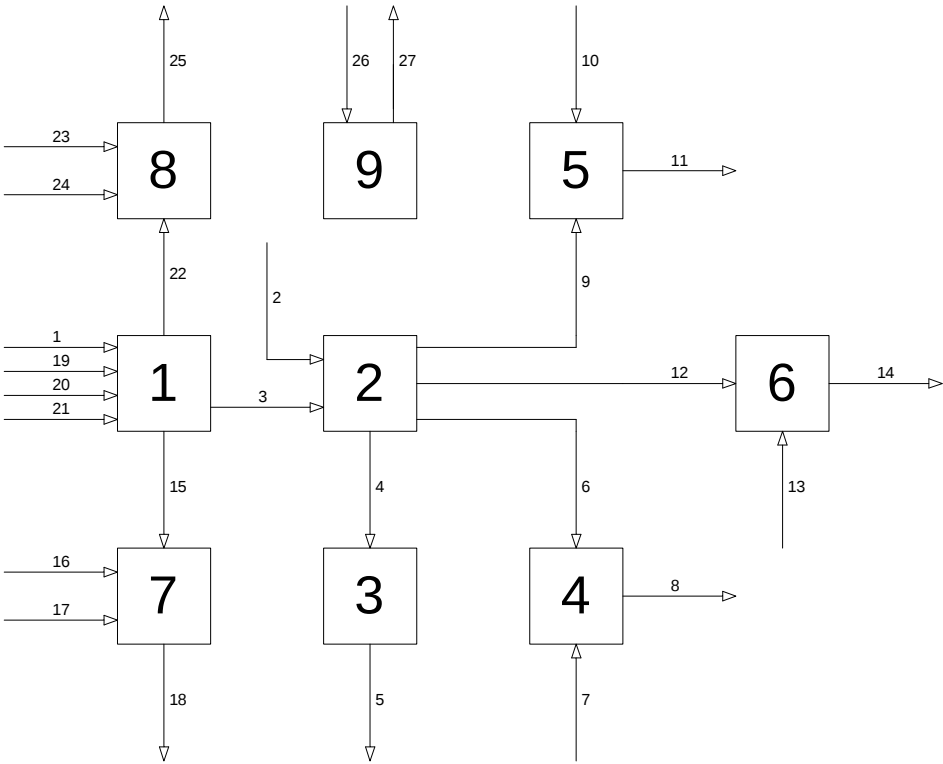


Figura 35 – Estructura productiva del caso de estudio (Elaboración propia)

Los componentes que configuran la estructura productiva se resumen en la tabla siguiente:

1	Separador de ceniza + desulfuración
2	Caldera
3	Turbina
4	Conexión caldera vapor de proceso
5	Conexión caldera <i>District Heating</i>
6	Conexión caldera piscifactoría
7	Conexión horno clinker
8	Conexión transporte yeso
9	Antorcha gas excedente

Tabla 42 – Componentes estructura productiva (Elaboración propia)

A partir de los resultados obtenidos en el anexo 2, en la siguiente tabla se muestra, para los dos casos considerados, la potencia exergética anual de los flujos correspondientes a los recursos y productos que interactúan entre los distintos componentes de la estructura productiva:

Nº	Flujo	Exergía (GWh/año)	
		Con integración	Sin integración
1	Carbón	10.376	10.591
2	Gas excedente	841,7	0
3	Carbón sin cenizas y sin azufre	10.328	10.542
4	Vapor turbina	4.487	4.487
5	Electricidad central	3.968	3.968
6	Vapor proceso turbina	193,4	0
7	Gas Natural proceso	0	495,8
8	Vapor proceso	193,4	193,4
9	Vapor <i>District Heating</i> turbina	63,8	0
10	Gas Natural <i>District Heating</i>	0	307,7
11	Vapor <i>District Heating</i>	63,8	63,8
12	Agua condensador piscifactoría	14	0
13	Gas Natural piscifactoría	0	254,4
14	Agua piscifactoría	14	14
15	Ceniza	21,79	0
16	Caliza producción clinker	0	16,26
17	Fuel-oil producción clinker	0	213,4
18	Ceniza/clinker	21,79	59,51
19	Caliza desulfuración	1,933	1,973
20	Agua desulfuración	4,51	4,604
21	Electricidad desulfuración	24,8	24,8
22	Yeso desulfuración	2,036	0
23	Yeso natural	0	2,036
24	Fuel-oil transporte yeso	0	9,703
25	Yeso	2,036	2,036
26	Entrada gas excedente antorcha	0	841,7
27	Salida gas excedente antorcha	0	841,7

Tabla 43 – Potencia exergética de los flujos para los dos casos considerados (Elaboración propia)

4.2 Modelo fuel-producto

En la siguiente tabla se muestra la definición fuel-producto:

Nº	Componente	Fuel	Producto
1	Separador de ceniza + desulfuración	$B_1 + B_{19} + B_{20} + B_{21}$	$B_3 + B_{15} + B_{22}$
2	Caldera	$B_3 + B_2$	$B_4 + B_6 + B_9 + B_{12}$
3	Turbina	B_4	B_5
4	Conexión caldera vapor de proceso	$B_6 + B_7$	B_8
5	Conexión caldera <i>District Heating</i>	$B_9 + B_{10}$	B_{11}
6	Conexión caldera piscifactoría	$B_{12} + B_{13}$	B_{14}
7	Conexión horno clinker	$B_{15} + B_{16} + B_{17}$	B_{18}
8	Conexión transporte yeso	$B_{22} + B_{23} + B_{24}$	B_{25}
9	Antorcha gas excedente	B_{26}	B_{27}

Tabla 44 – Definición fuel-producto (Elaboración propia)

Una vez completada la definición fuel-producto, se procede a introducir en la aplicación *TAESS* los componentes y los flujos que conforman la estructura productiva del caso de estudio.

La introducción de dichos datos puede realizarse de modo manual, sin embargo la aplicación *TAESS* también permite cargar ficheros con extensión .csv generados mediante *EES* para poder introducir los componentes y los valores exergéticos de los flujos mostrados en la tabla 43.

La siguiente tabla muestra en la interfaz de *TAESS* los componentes productivos y disipativos definidos en la estructura productiva del caso de estudio:

	No. Device	DEVICE
Productive	0	Environment
	1	Separador + FGD'
	2	Caldera'
	3	Turbina'
	4	Caldera VP'
	5	Caldera DH'
	6	Caldera PISC'
	7	Horno clinker'
Dissipative	8	Transporte yeso'
	9	Antorcha'

Tabla 45 – Componentes productivos y disipativos

Respecto a los flujos, en la interfaz de trabajo de *TAESS* se muestra una tabla que debe completarse con la definición fuel-producto, donde el componente “0” representa el ambiente, el estado de referencia corresponde al caso con integración y el estado de operación al caso sin integración:

REFERENCE		OPERATION				
Flow	E[GWh/año]	E[GWh/año]	Ouput Device	F/P	Input Device	F/P
1	10376,0000	10591,0000	0	P	1	F
2	841,7000	0,0000	0	P	2	F
3	10328,0000	10542,0000	1	P	2	F
4	4487,0000	4487,0000	2	P	3	F
5	3968,0000	3968,0000	3	P	0	F
6	193,4000	0,0000	2	P	4	F
7	0,0000	495,8000	0	P	4	F
8	193,4000	193,4000	4	P	0	F
9	63,8000	0,0000	2	P	5	F
10	0,0000	307,7000	0	P	5	F
11	63,8000	63,8000	5	P	0	F
12	14,0000	0,0000	2	P	6	F
13	0,0000	254,4000	0	P	6	F
14	14,0000	14,0000	6	P	0	F
15	21,7900	0,0000	1	P	7	F
16	0,0000	16,2600	0	P	7	F
17	0,0000	213,4000	0	P	7	F
18	21,7900	59,5100	7	P	0	F
19	1,9330	1,9730	0	P	1	F
20	4,5100	4,6040	0	P	1	F
21	24,8000	24,8000	0	P	1	F
22	2,0360	0,0000	1	P	8	F
23	0,0000	2,0360	0	P	8	F
24	0,0000	9,7030	0	P	8	F
25	2,0360	2,0360	8	P	0	F
26	0,0000	841,7000	0	P	9	F
27	0,0000	841,7000	9	P	0	F

Tabla 46 – Tabla de flujos junto con la definición fuel-producto

Respecto a la nomenclatura utilizada, cabe destacar que los flujos correspondientes a entradas al sistema como recursos naturales (materias primas) se introducen como productos “P” del ambiente “0”, mientras que aquellos flujos que corresponden a salidas del sistema hacia el exterior (productos) se introducen como fueles “F” para el ambiente “0”.

Las tablas fuel-producto obtenidas mediante *TAESS* para los dos casos considerados son las siguientes:

CON INTEGRACIÓN												
DEVICE		F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	Product
Environment	P0		10407	842		0	0	0	0	0	0	11249
Separador + FGD'	P1			10328					22	2		10352
Caldera'	P2				4487	193	64	14				4758
Turbina'	P3	3968										3968
Caldera VP'	P4	193										193
Caldera DH'	P5	64										64
Caldera PISC'	P6	14										14
Horno clinker'	P7	22										22
Transporte yeso'	P8	2										2
Antorcha'	P9	0										0
Fuel	F	4263	10407	11170	4487	193	64	14	22	2	0	
Residue	R	0										

Tabla 47 – Tabla fuel-producto del caso con integración

SIN INTEGRACIÓN												
DEVICE		F0	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	Product
Environment	P0		10622	0		496	308	254	230	12	842	12763
Separador + FGD'	P1			10542					0	0		10542
Caldera'	P2				4487	0	0	0				4487
Turbina'	P3	3968										3968
Caldera VP'	P4	193										193
Caldera DH'	P5	64										64
Caldera PISC'	P6	14										14
Horno clinker'	P7	60										60
Transporte yeso'	P8	2										2
Antorcha'	P9	842										842
Fuel	F	4301	10622	10542	4487	496	308	254	230	12	842	
Residue	R	842										

Tabla 48 – Tabla fuel-producto del caso sin integración

Como se observa en la tabla 48, en la situación sin integración aparece como residuo el gas excedente que se disipa en la antorcha, y dado que dicho componente se encuentra fuera del sistema productivo definido, debe establecerse como se distribuye el coste del residuo en cuestión. En la siguiente tabla, se puede observar que el coste del gas excedente, es decir, de la antorcha (componente nº9), se asigna totalmente a la caldera (componente nº2), y por tanto a los productos de la misma:

<RP>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
9	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000

Tabla 49 – Distribución del coste del residuo

4.3 Coste exergético

En las tablas siguientes se muestra para los dos casos considerados: el consumo exergético unitario, k ; el coste exergético unitario, c ; y el coste exergético, C [GWh/año]; de cada uno de los componentes. Además, los costes se desglosan en: producto, fuel y residuo.

CON INTEGRACIÓN												
		F	P	I	k	C _P ^e	C _P ^r	C _P	C _F	C _P	C _F	C _R
Separador + FGD'	1	10407,2430	10351,8260	55,4170	1,0054	1,0054	0,0000	1,0054	1,0000	10407,2430	10407,2430	0,0000
Caldera'	2	11169,7000	4758,2000	6411,5000	2,3475	2,3591	0,0000	2,3591	1,0049	11224,9895	11224,9895	0,0000
Turbina'	3	4487,0000	3968,0000	519,0000	1,1308	2,6676	0,0000	2,6676	2,3591	10585,2061	10585,2061	0,0000
Caldera VP'	4	193,4000	193,4000	0,0000	1,0000	2,3591	0,0000	2,3591	2,3591	456,2467	456,2467	0,0000
Caldera DH'	5	63,8000	63,8000	0,0000	1,0000	2,3591	0,0000	2,3591	2,3591	150,5095	150,5095	0,0000
Caldera PISC'	6	14,0000	14,0000	0,0000	1,0000	2,3591	0,0000	2,3591	2,3591	33,0272	33,0272	0,0000
Horno clinker'	7	21,7900	21,7900	0,0000	1,0000	1,0054	0,0000	1,0054	1,0054	21,9067	21,9067	0,0000
Transporte yeso'	8	2,0360	2,0360	0,0000	1,0000	1,0054	0,0000	1,0054	1,0054	2,0469	2,0469	0,0000
Antorcha'	9	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Tabla 50 – Costes termoeconómicos del caso con integración

SIN INTEGRACIÓN												
		F	P	I	k	C _P ^e	C _P ^r	C _P	C _F	C _P	C _F	C _R
Separador + FGD'	1	10622,3770	10542,0000	80,3770	1,0076	1,0076	0,0000	1,0076	1,0000	10622,3770	10622,3770	0,0000
Caldera'	2	10542,0000	4487,0000	6055,0000	2,3495	2,3674	0,1876	2,5550	1,0076	11464,0770	10622,3770	841,7000
Turbina'	3	4487,0000	3968,0000	519,0000	1,1308	2,6770	0,2121	2,8891	2,5550	11464,0769	11464,0769	0,0000
Caldera VP'	4	495,8000	193,4000	302,4000	2,5636	2,5636	0,0000	2,5636	1,0000	495,8000	495,8000	0,0000
Caldera DH'	5	307,7000	63,8000	243,9000	4,8229	4,8229	0,0000	4,8229	1,0000	307,7000	307,7000	0,0000
Caldera PISC'	6	254,4000	14,0000	240,4000	18,1714	18,1714	0,0000	18,1714	1,0000	254,4000	254,4000	0,0000
Horno clinker'	7	229,6600	59,5100	170,1500	3,8592	3,8592	0,0000	3,8592	1,0000	229,6600	229,6600	0,0000
Transporte yeso'	8	11,7390	2,0360	9,7030	5,7657	5,7657	0,0000	5,7657	1,0000	11,7390	11,7390	0,0000
Antorcha'	9	841,7000	841,7000	0,0000	1,0000	1,0000	0,0000	1,0000	1,0000	841,7000	841,7000	0,0000

Tabla 51 – Costes termoeconómicos del caso sin integración

En la situación con integración, puede observarse como las calderas auxiliares, el horno de clinker y el transporte de yeso poseen un consumo unitario igual a 1, lo cual indica que se comportan como uniones y no como procesos. No ocurre lo mismo en el caso sin integración, constatando que en esta situación actúan como procesos, que por definición son irreversibles, y por tanto su consumo unitario es mayor a 1.

En cuanto a la antorcha, en ambos casos posee consumo unitario igual a 1. Sin embargo, en el caso con integración puede observarse que no se encuentra en operación, mientras que en el caso sin integración se comporta como una unión ya que no son necesarios recursos externos para la combustión del gas excedente.

Además, ambas tablas también ponen de manifiesto que en el caso sin integración existe un residuo cuyo coste es asignado al producto de la caldera y por consiguiente,

al producto de la turbina, es decir, a la electricidad generada. En consecuencia, ambos productos incrementan su coste respecto al caso integrado.

Los costes pueden ser desglosados como puede verse en las figuras siguientes:

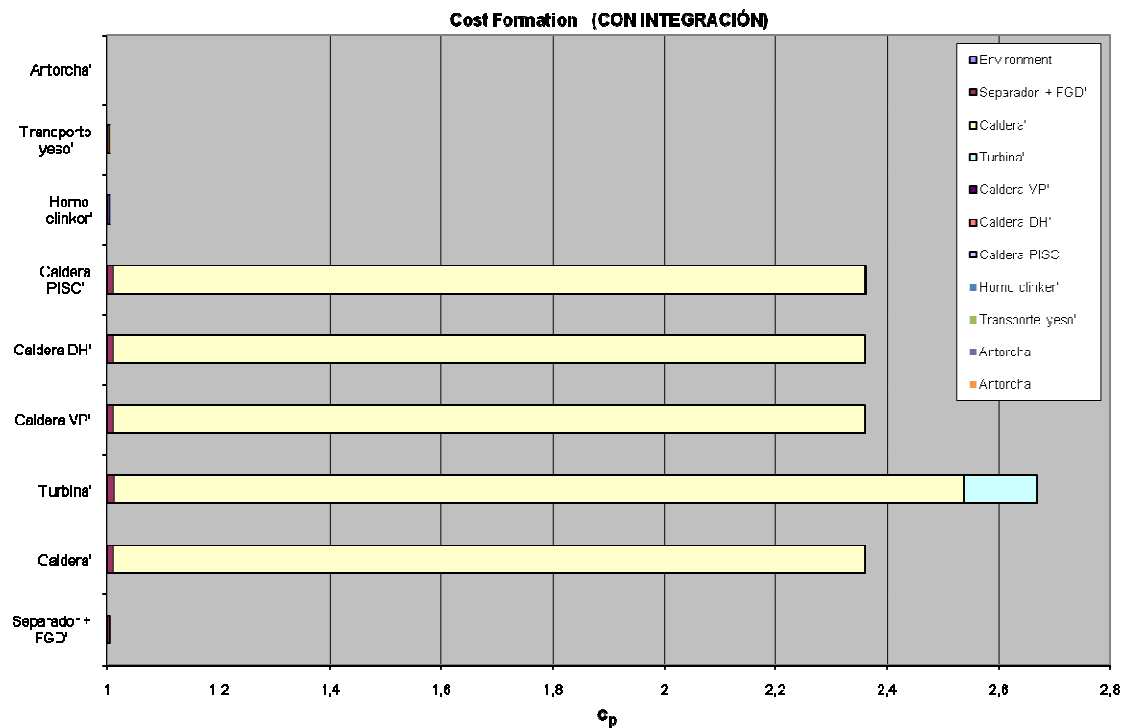


Figura 36 – Formación de costes exergéticos unitarios en el caso con integración

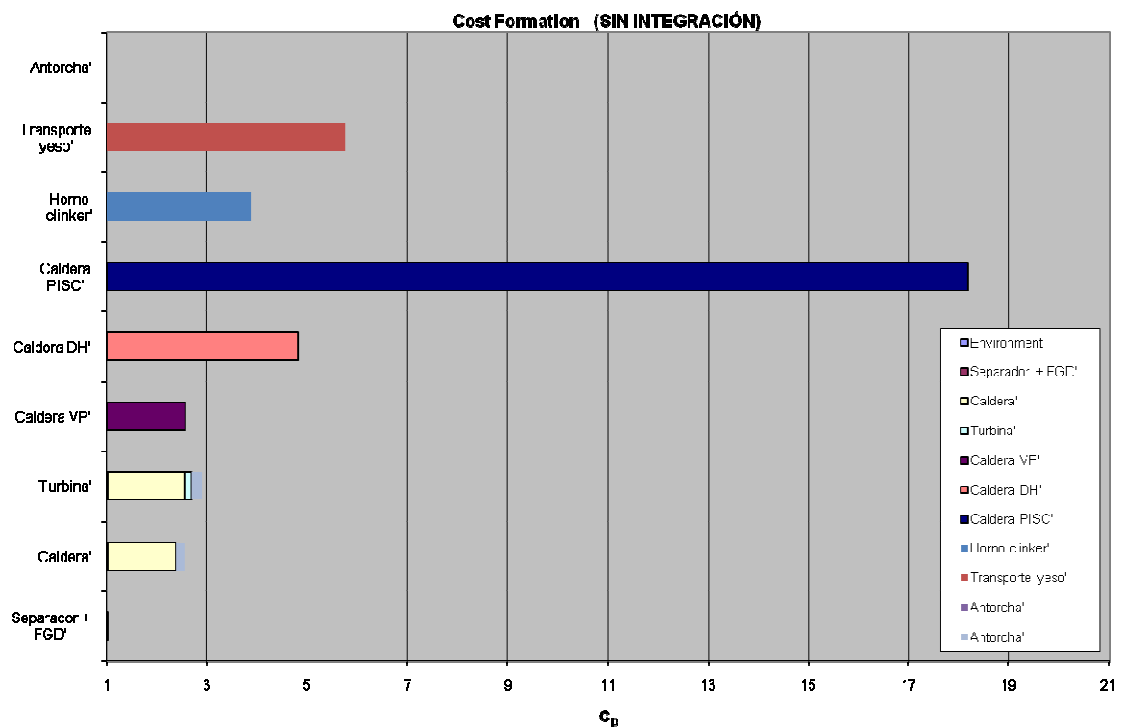


Figura 37 – Formación de costes exergéticos unitarios en el caso sin integración

A partir de los costes obtenidos se pueden determinar los precios justos de los productos de las integraciones ya que su cálculo se basa en los principios físicos que rigen su obtención.

Respecto a la formación de los costes, en el caso con integración se puede observar como el coste de la energía térmica para proceso, *District Heating* y piscifactoría es igual, y lógicamente corresponde con el de la caldera de la central térmica, cuyo valor es 2,36.

Lo mismo ocurre con las cenizas y el yeso generado, los cuales tienen el mismo coste que el componente “Separador + FGD”, el cual es prácticamente 1.

Mientras que el coste de la turbina se debe principalmente a la caldera de la central, aunque también una parte se debe a la irreversibilidad generada en la propia turbina, obteniéndose un valor de 2,67.

Comparando ambos casos, se observa un aumento considerable en el coste de los procesos alternativos planteados. Entre ellos, destaca por encima de todos la caldera auxiliar de la piscifactoría con un coste superior a 18. Semejante coste es debido a la utilización de una energía de alta calidad para producir otra de muy baja calidad, y a pesar de realizarse con un rendimiento energético muy alto, conlleva un rendimiento exergético muy bajo. Sucede lo mismo, aunque en menor medida, en la caldera auxiliar de *District Heating*, puesto que su producto es una energía de mayor calidad. Y en cuanto a la caldera auxiliar de proceso, su producto posee una energía de más alta calidad que el resto y ello se traduce en un coste prácticamente igual al operar de forma autónoma respecto al caso integrado.

Cabe destacar también los costes que supone el transporte marítimo de yeso y la producción de clinker en el horno, de en torno a 5,8 y 3,9 respectivamente, los cuales son considerablemente superiores a los obtenidos en el caso con integración.

En la figura 37 puede observarse como la antorcha da lugar a una parte de coste en la caldera y la turbina, tal y como se ha definido en la distribución del coste del residuo mostrado en la tabla 49.

4.4 Malfunción, disfunción e irreversibilidad

Una de las partes más valiosas del diagnóstico es la matriz de malfunciones, la cual se muestra en la tabla siguiente. Aporta información acerca de las malfunciones asociadas a cada componente con cada ineficiencia:

		MALFUNCTION MATRIX								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Environment	0	23,5100	-841,7000	0,0000	495,8000	307,7000	254,4000	84,0916	11,7390	0,0000
Separador + FGD'	1	0,0000	851,1718	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	-21,7900	-2,0360	0,0000
Caldera'	2	0,0000	0,0000	0,0000	-193,4000	-63,8000	-14,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Turbina'	3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Caldera VP'	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Caldera DH'	5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Caldera PISC'	6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Horno clinker'	7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Transporte yeso'	8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Antorcha'	9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
MF		23,5100	9,4719	0,0000	302,4000	243,9000	240,4000	62,3016	9,7030	0,0000

Tabla 52 – Matriz de malfunciones

Como resultado de la variación del consumo unitario en los componentes al operar de forma autónoma aparecen malfunciones en los mismos. Los términos que aparecen dentro de la matriz en negativo representan las integraciones que han dejado de producirse en el caso sin integración.

Las malfunciones principales se encuentran en las calderas auxiliares, tal y como se muestra en la tabla 52. La caldera auxiliar de proceso, a pesar de ser la que menos ve incrementado su consumo unitario, es la que mayor producción de vapor posee, lo cual hace que la malfunción de dicha caldera sea la mayor de todas. En cambio, la caldera auxiliar de *District Heating* debe su malfunción fundamentalmente al incremento en su consumo unitario, ya que su producción no es muy alta. El valor más sorprendente corresponde a la malfunción asociada a la caldera de la piscifactoría, la cual posee una producción muy baja pero incrementa su consumo unitario de manera exagerada.

Las malfunciones asociadas al horno de clinker y al transporte de yeso son debidas principalmente a un aumento considerable del consumo unitario, dado que su producción es pequeña.

Por último, cabe señalar que el separador y la caldera poseen malfunciones insignificantes ya que a pesar de tener una producción muy elevada, poseen un consumo unitario prácticamente constante.

En la matriz de disfunciones puede observarse cómo contribuye cada componente a la generación de disfunciones al resto.

En la siguiente tabla puede observarse que existe una disfunción considerable con signo negativo en la caldera de la central térmica, la cual es inducida por las malfunciones negativas de las calderas auxiliares. Esto es debido a que en el caso sin integración la caldera disminuye su producción al no suministrar energía térmica a los procesos externos (proceso, *District Heating* y piscifactoría).

		DISFUNCTION MATRIX								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Separador + FGD'	1	0,0000	6,4897	0,0000	-3,4644	-1,1425	-0,2508	-0,1661	-0,0155	0,0000
Caldera'	2	0,0000	0,0000	0,0000	-260,9844	-86,0951	-18,8923	0,0000	0,0000	0,0000
Turbina'	3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Caldera VP'	4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Caldera DH'	5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Caldera PISC'	6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Horno clinker'	7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Transporte yeso'	8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Antorcha'	9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
DF_i		0,0000	6,4897	0,0000	-264,4488	-87,2380	-19,1431	-0,1661	-0,0155	0,0000

Tabla 53 – Matriz de disfunciones

El incremento de la irreversibilidad de cada componente puede desglosarse en la suma de las malfunciones y las disfunciones, tal y como se muestra en la tabla 54. En dicha tabla se resumen las malfunciones y disfunciones de cada uno de los componentes que se han descrito anteriormente.

Sin embargo, cabe destacar la disfunción existente en el horno de clinker, denotada como DF_s , la cual tiene un carácter intrínseco puesto que no es inducida por la malfunción de otro componente. Es debida al incremento en la producción que ha sufrido el componente al operar como horno de clinker y suministrar otro producto distinto. Es decir, en el caso con integración dicho componente actúa como una unión que suministra cenizas, sin embargo, en el caso con integración representa un proceso que produce clinker sustituyendo al flujo de cenizas en términos másicos, no exergéticos. Es por ello que la producción en el caso sin integración es diferente que en el caso integrado, ya que lógicamente la exergía del producto no es igual a pesar de representar flujos con la misma masa.

		DF	MF	DF_s	DF_R	ΔI
Separador + FGD'	1	1,4500	23,5100	0,0000	0,0000	24,9600
Caldera'	2	-365,9719	9,4719	0,0000	0,0000	-356,5000
Turbina'	3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Caldera VP'	4	0,0000	302,4000	0,0000	0,0000	302,4000
Caldera DH'	5	0,0000	243,9000	0,0000	0,0000	243,9000
Caldera PISC'	6	0,0000	240,4000	0,0000	0,0000	240,4000
Horno clinker'	7	0,0000	62,3016	107,8484	0,0000	170,1500
Transporte yeso'	8	0,0000	9,7030	0,0000	0,0000	9,7030
Antorcha'	9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
		-364,5219	891,6864	107,8484	0,0000	635,0129

Tabla 54 - Análisis de irreversibilidades

En cuanto a la variación de irreversibilidad total obtenida, caben destacar los siguientes componentes:

- Caldera

Su irreversibilidad es debido a la disfunción inducida por las malfunciones de las calderas auxiliares, con signo negativo, puesto que dichas calderas sustituyen su abastecimiento de energía térmica desde la central por una producción autónoma obligando a la caldera a disminuir su producción.

- Calderas auxiliares

La irreversibilidad de las calderas auxiliares se debe a las malfunciones originadas por el incremento en sus consumos unitarios al dejar de operar como uniones y hacerlo como procesos convencionales que consumen recursos externos para poder operar de forma autónoma.

- Horno de clinker

Contribuye en su irreversibilidad la malfunción originada por el consumo de recursos externos que conlleva la producción de clinker así como la disfunción inducida por la sustitución cenizas-clinker comentada anteriormente.

En el siguiente gráfico se resumen los datos de la tabla 54 pudiéndose visualizar en qué proporción afectan los demás componentes al incremento de la irreversibilidad de un componente en cuestión:

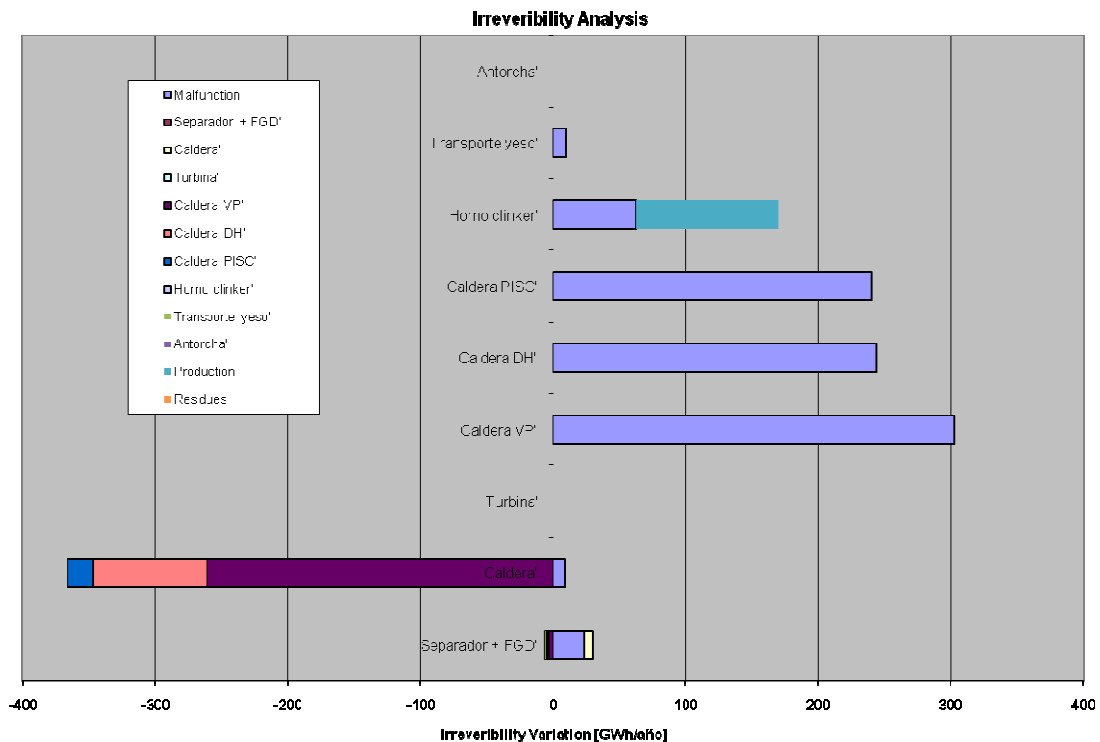


Figura 38 – Gráfico del análisis de irreversibilidades

4.5 Impacto en fuel

En la tabla siguiente se muestra la descomposición del impacto en fuel, por un lado considerando las irreversibilidades de los componentes junto con la variación en la producción de productos y residuos; y por otro lado considerando los costes de las malfunciones junto con la combinación del coste de los productos con la variación en la producción de productos y residuos.

		MF	ΔI	ΔP_s	ΔP_r	MF*	$C_p \Delta P_s$	$C_p \Delta P_r$
Separador + FGD'	1	23,5100	24,9600	0,0000	0,0000	23,5100	0,0000	0,0000
Caldera'	2	9,4719	-356,5000	0,0000	0,0000	15,9616	0,0000	0,0000
Turbina'	3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Caldera VP'	4	302,4000	302,4000	0,0000	0,0000	37,9512	0,0000	0,0000
Caldera DH'	5	243,9000	243,9000	0,0000	0,0000	156,6620	0,0000	0,0000
Caldera PISC'	6	240,4000	240,4000	0,0000	0,0000	221,2569	0,0000	0,0000
Horno clinker'	7	62,3016	170,1500	37,7200	0,0000	62,1355	145,5684	0,0000
Transporte yeso'	8	9,7030	9,7030	0,0000	0,0000	9,6875	0,0000	0,0000
Antorcha'	9	0,0000	0,0000	0,0000	841,7000	0,0000	0,0000	841,7000
		891,6864	635,0129	37,7200	841,7000	527,1645	145,5684	841,7000

Tabla 55 – Análisis del impacto en fuel

En la siguiente figura se muestra el impacto en fuel debido a la irreversibilidad y al coste de malfunción:

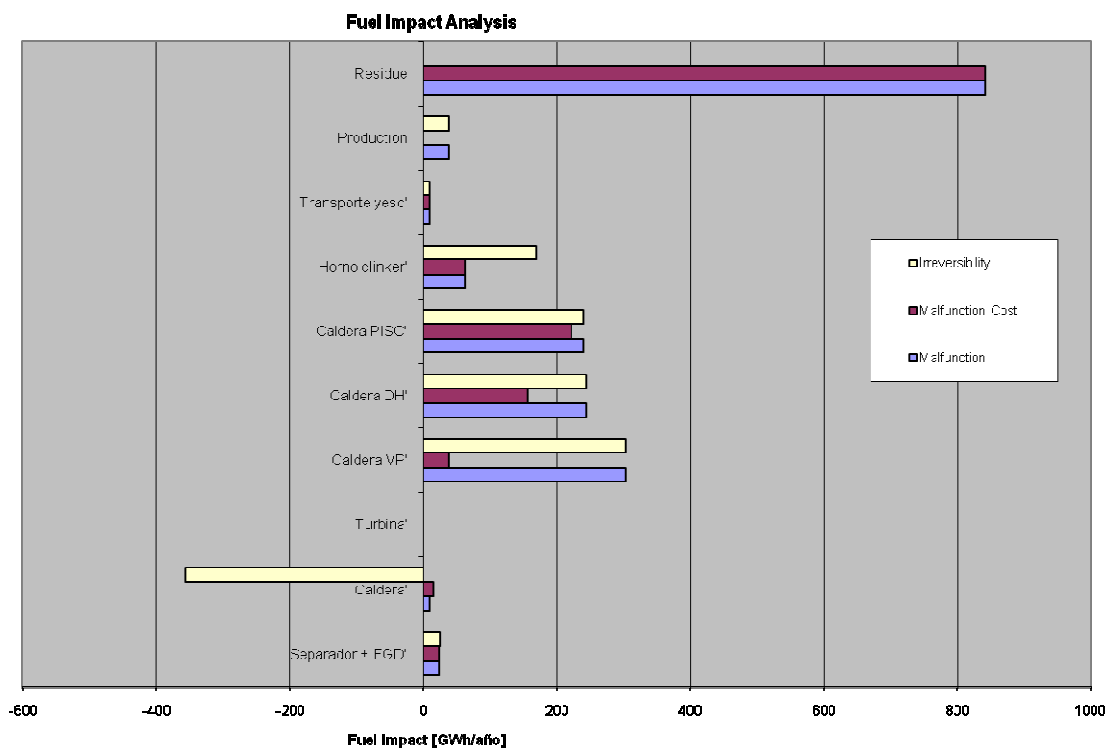


Figura 39 – Gráfico del análisis del impacto en fuel

Las irreversibilidades que se muestran tanto en la tabla 55 como en la figura 39 ya se han comentado en el apartado anterior. El incremento en la producción que aparece en el horno de clinker también ha sido comentado anteriormente. Mientras que la producción de residuos que se muestra confirma la disipación del gas excedente en la antorcha, siendo el componente que provoca en mayor medida consumo externo de recursos.

A la antorcha, le siguen las calderas auxiliares. Respecto al coste de malfunción de las mismas, por definición, corresponde al consumo externo de recursos asociado a la malfunción. En este sentido, cabe destacar que el mayor coste de malfunción aparece en la caldera de la piscifactoría. Observando las malfunciones de las tres calderas auxiliares puede verse como dicha caldera es la que menor malfunción posee, y sin embargo, al tener un coste tan elevado hace que el coste de malfunción asociado sea también elevado. Por este motivo, la caldera auxiliar de proceso a pesar de ser la que mayor malfunción tiene es la que menor coste asociado a la misma posee.

Por último, el resultado que mejor sintetiza el diagnóstico termoeconómico realizado es el impacto en fuel global, el cual es igual a 1514 GWh/año. Dicho resultado constituye el ahorro exergético total que conllevan las integraciones planteadas.

