

SECCIÓN III: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS Y/O DISEÑO AMBIENTAL DE PROCESOS (MADAP)

El capítulo actual presenta el desarrollo de la metodología para el análisis y/o diseño ambiental de procesos, a través de la descripción de los pasos necesarios para su establecimiento.

El primer paso o etapa de la metodología consiste en la definición de los objetivos y el alcance del estudio que se pretende desarrollar. Posteriormente, la segunda etapa comprende la integración de los aspectos de análisis y diseño de proceso con los criterios de evaluación ambiental; dicha integración se logra a través de la transferencia de información. Esta transferencia permite el flujo de información del proceso o actividad en estudio hacia una interfaz (hoja de cálculo) donde posteriormente y aplicando criterios de análisis del inventario se calculan las cargas ambientales generadas por el proceso (Eco-vector).

Partiendo de la información de cargas ambientales, los otros niveles de la evaluación (destino, efectos y daños) pueden ser identificados y cuantificados, para posteriormente comparar las diferentes alternativas del proceso e identificar, la que de acuerdo con los objetivos del análisis de procesos, sea la más acertada. La Figura 4.1 muestra el diagrama de flujo general de la metodología.

El esquema describe la posibilidad de seguir los pasos o etapas que conforman la metodología propuesta en dos vías diferentes de acuerdo con la evaluación ambiental y/o el análisis de procesos. Por una lado, la metodología puede ser desarrollada en forma independiente para cualquiera de los dos aspectos mencionados, o por el contrario, las etapas pueden estar directamente relacionadas y tales aspectos desarrollados conjuntamente. Esto es posible, puesto que los resultados de una etapa generalmente pueden ser utilizados como entradas en la etapa siguiente.

La primera etapa -definición de objetivos y alcance-, permite al usuario determinar hasta donde llegar en la evaluación y que aspectos del proceso evaluar. En esta etapa, los resultados están relacionados con la información básica del proceso y el nivel de detalle que se pretende de la evaluación ambiental.

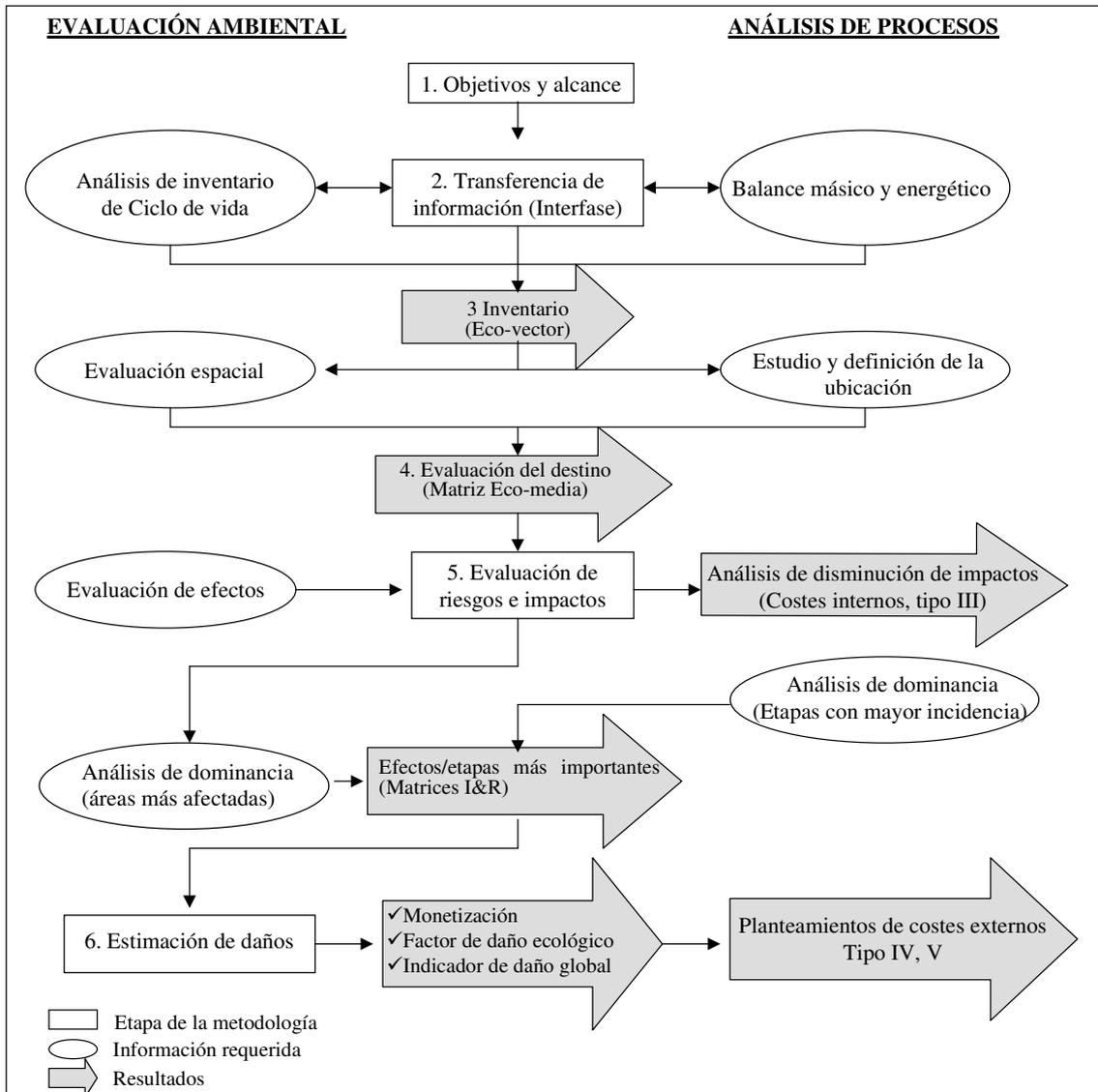


Figura 4.1 Esquema metodológico de evaluación ambiental en el análisis de procesos.

La interfaz o transferencia de información permite comparar cambios en los procesos (alternativas o escenarios) en el modelo o simulación, de manera que tales alternativas sean técnicamente viables. Así mismo, dicha transferencia permite evaluar las alternativas en términos de su incidencia ambiental a partir del nivel de evaluación definido.

En la etapa de cuantificación del inventario y con base en aspectos del análisis del inventario de ciclo de vida e información básica del proceso (balances de materia y energía), se obtiene como principal resultado el eco-vector o balance de cargas ambientales. Dicho eco-

vector es el primer nivel de la evaluación ambiental y el primer criterio de toma de decisiones involucrando aspectos técnicos y ambientales.

La evaluación del destino requiere la aplicación de criterios de evaluación espacial y la definición de la posible ubicación de la actividad industrial, de manera que pueda ser determinada la concentración de las sustancias emitidas y cuantificadas en la etapa anterior, en los compartimentos de interés. El resultado de esta etapa es una matriz de concentración -matriz eco-media)-, donde se determina la cantidad de sustancias en los compartimentos estudiados (aire, agua, suelo y sedimentos).

La evaluación de efectos es la etapa que permite identificar, caracterizar y/o cuantificar no sólo los riesgos, sino también los impactos, con base en diferentes categorías de indicadores ambientales y áreas de protección. Los resultados de esta etapa pueden ser descritos en términos económicos tales como costes de disminución de impactos (sistemas de tratamientos de efluentes, filtros, etcétera) o matrices de impactos o riesgos (Eco-matriz de impactos).

Finalmente, la estimación de daños permite a través de la estimación o cuantificación de los costes monetarios de efectos seleccionados, comparar las alternativas que presenten un mejor comportamiento ambiental. Los resultados de esta etapa pueden darse en términos monetarios, a través de factores de daño ecológico o con indicadores de daño global.

4.1 DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE

Este paso consiste en la definición del objetivo principal del estudio, es decir, inicialmente es necesario definir que persigue el usuario de la metodología al aplicarla a un proceso en particular, ya sea en el análisis de un proceso existente, o el diseño de uno nuevo. Igualmente, el alcance de la evaluación (básicamente, esto se refiere a la identificación de las necesidades del usuario) debe ser claramente definido. Esto se logra determinando los límites temporales y espaciales tanto del proceso como de la evaluación ambiental que se pretenda aplicar. Esta etapa está fuertemente relacionada con la definición de información básica del análisis de procesos, por lo que es aquí donde se hace necesario la integración del análisis ambiental con técnicas de simulación o modelado. La Figura 4.2 presenta un diagrama de la etapa de definición de objetivos y alcance.

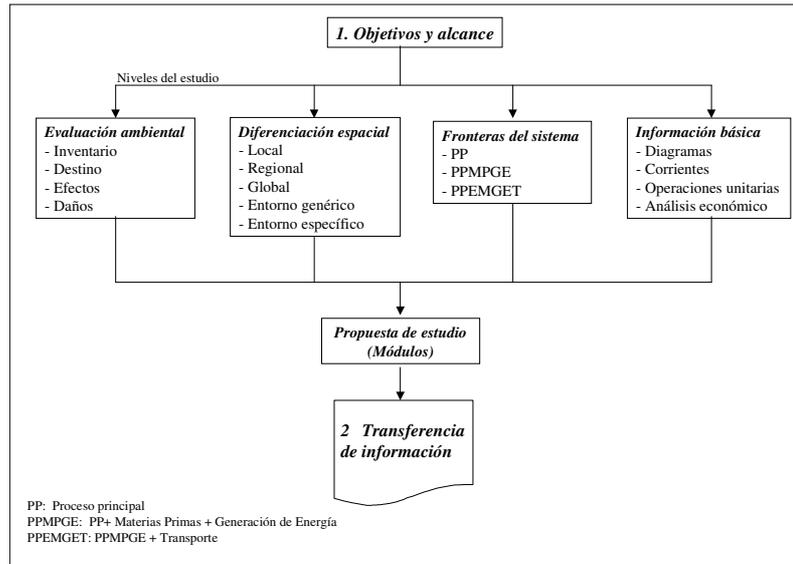


Figura 4.2 Diagrama esquemático para la definición de objetivos y alcances

De acuerdo con la figura, en esta etapa es necesario definir cuál es el nivel de evaluación ambiental que requiere el análisis para soportar la toma de decisiones. Los niveles de la evaluación se mencionan a continuación:

1. Un inventario que permita conocer los materiales y energías consumidos y las descargas emitida, más importantes del proceso;
2. El destino de estas descargas y los compartimientos que incrementan la concentración de las sustancias descargadas;
3. Los efectos a los que estarían sometidas las áreas de protección susceptibles de ser afectadas; y/o
4. Los daños generados en las áreas de protección afectadas (monetizados o en indicadores)

Adicionalmente, en esta primera etapa de la metodología se define el nivel de **diferenciación espacial**, para un nivel local, regional o global, de manera que se puedan identificar las zonas donde se aplicará la evaluación y de está forma las áreas de protección involucradas, independientemente del nivel de evaluación ambiental definido.

En esta primera etapa, se establecen claramente las fronteras, etapas y corrientes involucradas para la cuantificación de las cargas y posteriores efectos ambientales.

4.1.1 Nivel de la evaluación ambiental

La determinación de la incidencia ambiental a evaluar, está sujeta a los objetivos y alcance que se definan para la aplicación de la metodología. Está incidencia puede ser

determinada en términos del inventario de cargas ambientales, su destino, los efectos que pueden generarse y los daños sobre las áreas de protección. Los cuatro niveles de evaluación se presentan en los apartados siguientes:

Nivel I: el primer nivel de evaluación es el inventario de entradas y salidas hacia y desde el proceso. Este inventario se realiza con base en la información transferida desde el modelo del proceso y se obtiene en forma de eco-vector o eco matriz [Heijungs & Sangwon, 2002]. El eco-vector generado en la hoja de cálculo (memoria de cálculo del proceso), contiene entonces la información relacionada con las corrientes de materiales y energéticas del proceso, tomando como base, la unidad funcional que debe ser definida con anterioridad.

Nivel II: el destino de los contaminantes se evalúa en el segundo nivel de la evaluación. Para ello se relacionan las características de las sustancias emitidas con las propiedades de los entornos que las reciben, determinando así los mecanismos de transporte y transformación. En este nivel, el resultado permitirá, a quien toma las decisiones, verificar la viabilidad de la ubicación de una actividad industrial, y proponer alternativas de ubicación y/o reubicación. Para ello, la *aplicación de Sistemas de Información Geográfica* será de vital importancia en la determinación de la mejor ubicación de una actividad industrial.

Nivel III: los efectos predecibles y cuantificables en términos de riesgos o impactos son calculados en el tercer nivel propuesto de evaluación ambiental. Los riesgos de efectos negativos y los impactos específicos sobre un área de protección determinada, son calculados a partir de la aplicación de metodologías de evaluación de impactos y riesgos.

Por otra parte, la predicción de impactos potenciales se realiza aplicando factores de caracterización a las cargas ambientales determinadas en el análisis del inventario. En este caso, no es necesaria la evaluación del destino de sustancias, puesto que se cuantifica el efecto sobre una región específica.

Nivel IV: en el último nivel, los daños son calculados o estimados dependiendo del área de protección donde sea aplicada la evaluación. En el caso de la salud humana, es posible calcular los daños ambientales en términos monetarios, a partir de varias funciones de daño. Para los ecosistemas, es posible determinar indicadores de daño [US-EPA, 2002], a partir de datos de pérdida de producción o de su estado ecológico [Prat, 1998]. Finalmente, para recursos naturales se tendrá en cuenta la disminución de la producción en cosecha [ESC-EU, 2002].

4.1.2 Nivel de la diferenciación espacial.

La diferenciación espacial, permite involucrar los aspectos espaciales que ayudan a aplicar los diferentes niveles de la evaluación en la toma de decisiones. Esta diferenciación se basa en criterios de localización, por medio de los cuales es posible analizar las zonas a evaluar.

La definición de la escala espacial depende de dos factores fundamentales: la información disponible del entorno, y las herramientas que permitan modelar los mecanismos de transporte y transformación de las sustancias en los medios o compartimientos.

En la actualidad no existe un único procedimiento para la aplicación de la diferenciación espacial en la evaluación ambiental, sin embargo, en la metodología se proponen dos fases: la primera consiste en la aplicación de modelos genéricos multi-compartimientos, y la segunda fase, es la aplicación de herramientas basadas en SIG's (Sistemas de Información Geográfica), los cuales permiten calcular concentraciones de las sustancias emitidas en diferentes medios bajo el concepto de mundo real. En este tipo de herramientas, es necesaria una mayor cantidad de información.

En la metodología se proponen tres escalas diferentes para la diferenciación espacial, a partir de la ubicación del punto de emisión y de la disponibilidad de información que permita modelar el entorno que se pretende evaluar

Escala local: hablamos de escala local, cuando la evaluación se realiza sólo sobre la zona donde está ubicado el proceso y el transporte y destino de las sustancias descargadas se evalúa en un radio de hasta 10 Km, desde el punto de emisión. Este es el nivel más simple y para su evaluación, es posible el uso de modelos sencillos de transporte entre compartimientos, basados en fugacidad de Nivel II o III (e.g. Modelo Level III) [Webster, et al, 2002].

Escala regional: el nivel regional comprende una zona de mayor tamaño que la anterior, y por lo tanto, es necesaria la aplicación de modelos de evaluación del transporte y de transformación dada la importancia que tienen estos mecanismos en la distribución de los contaminantes en los diferentes compartimientos. En este nivel, el radio de evaluación puede ser definido entre 10 y 100 Km., desde el punto de emisión, y generalmente implica la evaluación de la región (o una zona mayor) donde se ubica el proceso. Los modelos utilizados en la evaluación del destino, basados en los mecanismos de transporte y transformación, son Caltox o ChemCan [McKone & Enoch, 2002; Di Guardo, 1996].

Escala Global: Este nivel espacial es el de mayor tamaño. En él, la zona a evaluar puede considerar un país e incluso un continente. En esta escala de evaluación, es indispensable la utilización de modelos de transporte y transformación de contaminantes [McKone & Enoch, 2002; Beyer et al, 2000; Webster et al, 2000; European Chemical Bureau ECB, 1997], el área de estudio del nivel global en la metodología comprende una superficie mínimo de $2 \cdot 10^6$ km²., lo cual implica la necesidad de una mayor cantidad y calidad de la información. Los modelos

utilizados para determinar las concentraciones de las sustancias en los diferentes compartimentos, se basan en el estudio de las distancias recorridas por las sustancias emitidas, y su transformación en los diferentes medios, como ejemplos de estos modelos se pueden mencionar, Euses, Caltox, y TaPL3, entre otros.

Durante el desarrollo de la metodología, se probaron diversos modelos de predicción del destino de sustancias, evaluando sus principales características y los resultados ofrecidos por ellos. A continuación, la Tabla 4.1, presenta una síntesis de las principales características de algunos modelos utilizados.

Tabla 4.1 Síntesis de los modelos de evaluación del destino de sustancias¹.

Modelo	Definición	Sustancias	Variables de entrada ²	Variables de salida
Caltox	Modelo multimedia de transporte y transformación de sustancias. Incluye exposición para humanos y estimación del riesgo	Químicos orgánicos no iónicos, metales en fase sólida y especies inorgánicas disociadas	Emisiones al aire y agua, concentración inicial y valores potenciales de cáncer.	Concentración en suelo, agua, suelo y vegetación. Dosis diarias en humanos y riesgo de cancer
EUSES	Modelo multimedia de transporte y transformación. Incluye emisión, exposición, efectos a seres vivos y estimación del riesgo	Todo tipo de sustancias, pero puede presentar fallos en inorgánicos ionizables	Producción de sustancias, uso y emisión, datos de efectos para organismos acuáticos y terrestres	Concentración en agua, suelo, sedimento, peces y vegetación. Dosis diarias y caracterización del riesgo
Level III	Modelo de partición de equilibrio ambiental basado en fugacidades. Asume una evaluación simple con volúmenes y densidades definidas para los siguientes compartimentos: aire, agua, suelo y sedimentos	Trata tres tipos de químicos: con partición en todo el medio (tipo1), no volátiles (tipo2) y con solubilidad cero o cercana (tipo3). No trata sustancias ionizables	Químicos (T1): solubilidad en agua, presión de vapor, log kow, punto de fusión. Químicos (T2): coeficiente de partición. Se asume una emisión constante al aire.	coeficientes de partición (tipo 1) valores de Z, fugacidades de cada medio, velocidades de transporte intermedias, valores de D, tiempo de residencia o persistencia, concentraciones y cantidades para cada medio.
ChemCAN	Modelo de fugacidad basado en el nivel III del destino regional de sustancias. Predice las concentraciones medias en aire, peces, sedimentos, suelo, vegetación y aguas marinas próximas a la costa	Trata dos tipos de químicos: con partición en todo el medio (tipo1), no volátiles (tipo2)	Altura media de mezcla, superficie cubierta de agua (%del total), longitud de costa para regiones marítimas, fracción volumétrica partículas (aire), carbón orgánico(sedimentos sólidos), condiciones de temperatura	Coeficientes de partición, tiempo de residencia, concentraciones y fugacidades en cada compartimento, velocidades de transferencia y transformación
TaPL3	Modelo de nivel III usado para el transporte de larga distancia y persistencia, el químico entra en cada medio móvil (aire y agua) separándolo a una velocidad media	Trata tres tipos de químicos: con partición en todo el medio (tipo1), no volátiles (tipo2) y con solubilidad cero o cercana (tipo3). No trata sustancias ionizantes	Químicos (T1): solubilidad en agua, presión de vapor, log kow, punto de fusión. Químicos (T2): coeficiente de partición	Persistencia, coeficientes de partición (tipo1), valores de Z, fugacidad del medio, velocidades de transporte intermedias, valores de D, concentraciones.

¹ En el Anexo A, sección A.1, se presenta una descripción completa de los modelos descritos en esta tabla

² Para todos los modelos, son necesarias las propiedades fisicoquímicas, así como información meteorológica y geográfica.

4.1.3 Definición de las fronteras del sistema (proceso a analizar)

La definición de las fronteras del sistema a analizar, es muy importante para determinar el alcance del estudio. Dado que no existe una estandarización para la definición de las fronteras del sistema, en la metodología se proponen los siguientes criterios de aplicación, de manera que se identifique claramente, las etapas del proceso y así mismo, las corrientes –de entrada y salida- que forman parte de él:

1. Proceso Principal (PP): una primera aproximación de las fronteras de sistema, es la consideración del proceso principal, o etapa de mayor importancia desde el punto de vista técnico y tecnológico. En este caso, el análisis se concentra en las entradas y salidas al proceso principal, sin cuantificar los efectos producidos en el ambiente por la extracción y el transporte de materias ni la generación de energía.

2. Proceso principal, materias primas y generación energética (PPMGE): el siguiente nivel en la definición de fronteras, incluye las materias primas necesarias, y su extracción, así como la generación de la energía necesaria (en la generación energética se consideran diferentes opciones de obtención de energía).

3. PPEMP y transporte (PPEMGET): el último nivel en la definición de las fronteras, incluye la totalidad del sistema que conforma el proceso, y el transporte.

4.1.4 Información básica para el análisis del proceso.

Una vez definidos el nivel de la evaluación, la diferenciación espacial, y fronteras del sistema a evaluar, es necesario desarrollar algunas etapas previas del análisis de procesos, de manera, que el proceso a estudiar pueda ser caracterizado.

Diagramas del proceso: existen diferentes tipos de diagramas de proceso. Cuanta más información se conozca del proceso, más detallado serán dichos diagramas, y así mismo, mayor información estará disponible para la evaluación ambiental.

Un Diagrama de Bloques (DB) permite identificar las principales operaciones (etapas) y corrientes involucradas en el proceso. Así mismo, posibilita el cálculo detallado del proceso, los balances de materia y energía, y una primera aproximación del tamaño de los equipos.

El Diagrama de Flujo del Proceso (DFP), permite hacer cálculos y una descripción de las operaciones unitarias utilizadas en el proceso.

El Diagrama de Tuberías e Instrumentos (DT&I), complementa la información generada por los diagramas anteriores.

Definición de corrientes: las corrientes del proceso que serán evaluadas se determinan con base en la definición del sistema a estudiar y del producto principal del proceso (probablemente la unidad funcional). Las corrientes pueden ser, principales, secundarias y descargas puntuales.

- ✓ *Principales*, se consideran corrientes principales, las materias primas, la energía (eléctrica o térmica), y el producto principal, objeto del proceso.
- ✓ *Secundarias*, son corrientes compuestas por subproductos y reciclados.
- ✓ *Descargas*, en este grupo entran emisiones, vertidos, residuos sólidos y descargas puntuales (accidentes)

Definición de operaciones unitarias o etapas del proceso: es necesario definir a priori las operaciones unitarias desarrolladas en el proceso, debido a que esta tarea facilita el análisis de las etapas de mayor incidencia. Las operaciones mayoritariamente encontradas en la industria química son:

- ✓ *Reacción:* de equilibrio, cinética, etcétera
- ✓ *Separación:* por destilación, absorción, adsorción, filtración, etcétera.
- ✓ *Combustión:* en este caso, las diferencias se encuentran en los combustibles a utilizar y los procesos de generación de vapor.
- ✓ *Transporte de fluidos*
- ✓ *Intercambio de calor...*

Definición de condiciones de operación del proceso: las condiciones de operación del proceso deben ser definidas para conocer el estado en que opera el proceso, por lo que es necesario definir su estado de operación (continuo o por lotes), el mecanismo de reacción (cuando sea necesario), y finalmente las características de las corrientes (temperatura, presión, composición, etcétera) involucradas en el proceso.

Análisis económico: el análisis económico será necesario cuando se desarrolle el cuarto nivel de detalle en la evaluación, y para aplicar técnicas de análisis coste-beneficio en la toma de decisiones. En los demás niveles de la metodología, el análisis económico puede llegar a ser de carácter básico y comprende los tipos de costes I, II y III [Aguilera & Alcantara, 1994], que a continuación se describen:

Costes tipo I o costes directos, son los costes generados directamente debido a la producción. Este tipo de coste comprende:

- ✓ *Materias primas*
- ✓ *Equipos de operación*
- ✓ *Mano de obra*
- ✓ *Servicios industriales (vapor, electricidad, agua)*

- ✓ Operación y mantenimiento.
- ✓ Capital de trabajo

Costes tipo II o costes indirectos, son los costes que no son debidos a la producción que incluye:

- ✓ Overheads
- ✓ Supervisión
- ✓ Mantenimiento general en planta
- ✓ Dirección.
- ✓ Diseño.
- ✓ Gestión
- ✓ Aditivos

Costes tipo III o costes contingentes futuros, son los costes asociados a las responsabilidades potenciales y a la prevención de la contaminación (costes ambientales internos)

- ✓ Coste por el tratamiento, recogida de los Residuos Tóxicos y Peligrosos (RTPs).
- ✓ Coste por el tratamiento de descargas hasta el nivel permitido por la legislación.
- ✓ Costes por contaminación de suelos (remediación), prevención y el control del nivel de ruidos, consumo de recursos no renovables, generación de residuos asimilables a urbanos.
- ✓ Coste de implantar un Sistema de Gestión Ambiental.
- ✓ Coste de un seguro medioambiental o coste de un posible accidente.

El nivel de coste elegido para la comparación y toma de decisión con respecto a la mejor alternativa o escenario de producción dependerá de la cantidad y calidad de la información disponible.

Una vez definido el objetivo y alcance, e identificadas las etapas del proceso que se tendrán en cuenta en la evaluación, es necesario caracterizar el proceso a través de la información básica. Esta información involucra los diagramas del proceso; una descripción de las corrientes, sus características y propiedades; las operaciones desarrolladas y sus condiciones de trabajo; y la integración energética. Con esta información *se obtiene el modelo del proceso* mediante una herramienta informática o por la resolución de ecuaciones matemáticas en una hoja de cálculo.

4.2 TRANSFERENCIA DE INFORMACIÓN (INTERFAZ).

La metodología de transferencia de información entre las herramientas de simulación, consiste básicamente en el desarrollo de tres etapas: 1) identificación de las variables que interviene en el

proceso, 2) definición de los parámetros de interconexión, y 3) captura y envío de datos (importación/exportación). El diagrama adjunto, muestra las fases de la transferencia y la relación entre ellas.

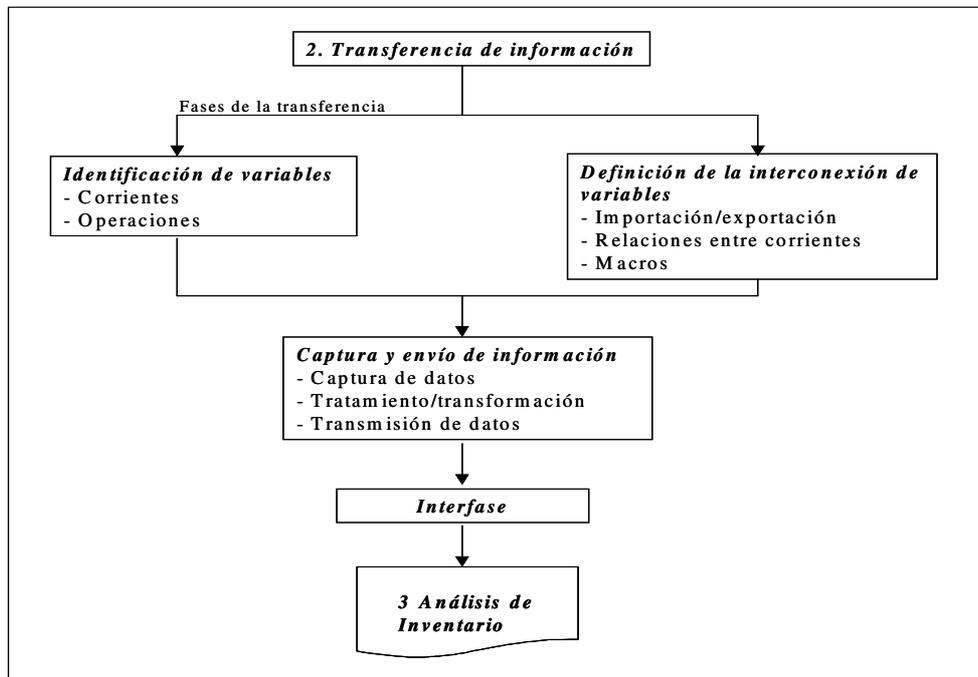


Figura 4.3. Etapas de la transferencia de información y su aplicación en la evaluación ambiental

El procedimiento de transferencia de información desde el análisis de procesos, hacia la evaluación ambiental se presenta gráficamente en la Figura 4.4.

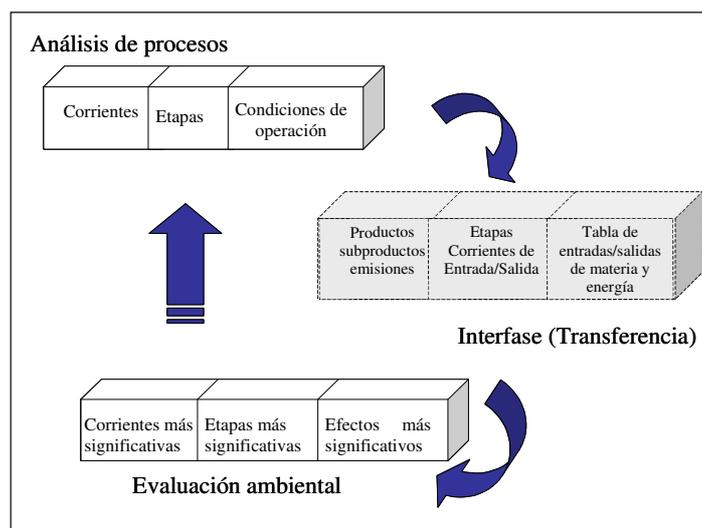


Figura 4.4 Mecanismo de transferencia de información

De acuerdo con la Figura 4.4, la información referente al proceso se genera en la etapa de análisis. Para el desarrollo de esta metodología se han utilizado diferentes herramientas de

simulación, sin embargo, la información puede ser generada en una hoja de cálculo a través de un balance de masa y energía [Herrera et al, 2001a].

La siguiente etapa, de acuerdo con la figura mencionada, es la transferencia hacia la interfaz. En esta etapa, si se utiliza una herramienta de simulación, es necesario hacer la transferencia a través de la programación de macros, los cuales toman la información y la transfieren de un programa a otro [Gómez, 2001].

El último paso en esta etapa es transferir de la interfaz la información a la memoria de cálculo donde con la información referente al proceso, se realiza la evaluación ambiental para la comparación y toma de decisiones relativas a las alternativas o escenarios estudiados. A continuación se describen los pasos de la transferencia de información desarrolladas en la metodología.

4.2.1 Identificación de variables.

En este punto se incluyen las corrientes de entrada y salida (Inputs/Outputs) y las etapas del proceso, tal como se verá en los siguientes apartados.

Corrientes del proceso. Las corrientes pueden ser de materia o de energía. Para la materia es necesario definir el tipo de corriente (producto, subproducto o residuo) y las características (pura o mezcla). En cuanto a la energía, es necesario determinar el tipo de energía eléctrica o térmica (vapor), y sus fuentes: fósil, nuclear, etcétera.

Descripción de las etapas desarrolladas en el proceso (operaciones unitarias). Para describir claramente este aspecto, se deben seguir tres pasos: 1) desarrollar un diagrama base (de flujo o de bloques) del proceso, 2) determinar las características de cada etapa (en función de las corrientes de entrada/salida y los balances), y 3) definición del proceso (balance general).

La herramienta utilizada para la generación de los modelos de proceso, ha sido el simulador de procesos Hysys Plant®. Esta herramienta informática es un software completamente interactivo con el que es posible obtener acceso a altos niveles de definición de geometría de los equipos, obteniendo resultados detallados. Esta herramienta ha sido analizada en detalle en un trabajo anterior [Herrera, 2001b], y sus principales características serán presentadas en el anexo correspondiente a la descripción de las herramientas utilizadas en el desarrollo metodológico (Anexo A, sección A.3).

4.2.2 Definición de la interconexión.

Los aspectos que permiten la interconexión entre la evaluación ambiental y la simulación de procesos se describen en los siguientes apartados.

Importación y Exportación de Variables. Las funciones establecidas en la evaluación ambiental, tales como la comparación de diferentes alternativas de producción, análisis de sensibilidad y las simulaciones, son posibles, debido a la capacidad de las herramientas de transferir y modificar variables [Ecobilan, 1998].

La modificación de las variables, se realiza una vez las mismas han sido exportadas a una hoja de cálculo. En la hoja de cálculo, cuando se definen los diferentes módulos, pueden modificarse los valores de las variables e importarse nuevamente. Los pasos son los siguientes:

1. Envío de datos desde la herramienta de simulación a la hoja de cálculo.
2. Cambios en los módulos creados en la hoja de cálculo si fuese necesario.
3. Actualización de los cambios en un nuevo fichero.
4. Desde la herramienta de evaluación ambiental, es posible importar los datos nuevos para reemplazar los datos existentes.
5. Revisión y actualización de los cálculos nuevos y de la información generada con ellos.

Relaciones con subproductos. Cuando en un proceso hay varios subproductos, la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) requiere que se estime cual es la carga ambiental del proceso que puede ser asignada a cada uno de los subproductos.

En la evaluación ambiental, los subproductos deben ser marcados como flujos funcionales, para una mejor aplicación de las reglas de asignación. Los productos reciclados también pueden tratarse como subproductos. La asignación de cargas se lleva a cabo de las siguientes maneras:

a) Asignación. Consiste en la distribución de las cargas ambientales del proceso entre sus subproductos. Es equivalente a multiplicar todas las entradas y salidas del proceso bajo consideración. El valor total es uno (1), y se reparte entre los productos o subproductos de interés. Así, si el producto de interés toma el valor 1, los otros subproductos toman un valor de 0.

Todos los otros flujos toman un valor que representa la cantidad que comparten en el flujo, que pueden ser asignadas al producto de interés. Lo primero que se debe hacer es definir los valores que se usarán para cada flujo (localización).

Los coeficientes de partición se pueden definir como variables cuando sea necesario. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la suma de los multiplicadores debe ser la unidad.

b) *Escenarios basados en la localización.* Este método utiliza un principio muy sencillo, los multiplicadores no son puestos al azar, sino que deben seguir la descripción de proceso. Los pasos son:

1. Definición de corriente de interés con la etapa específica.
2. Ubicación de los subproductos con la etapa de un proceso de producción alternativo para estos subproductos particulares.

Las cargas asociadas a procesos alternativos se restan del sistema, con base en el hecho, de que la generación de un subproducto evita su producción a través de otros procesos. En otras palabras, cuando existen cargas ambientales relativas a un subproducto que evita el desarrollo de un proceso diferente, estas deben tener signo opuesto (negativo), a las cargas relativas al producto principal.

c) *Múltiples conexiones.* Las corrientes del proceso pueden estar relacionadas con varias etapas, (e.g., la etapa de generación eléctrica puede proveer la demanda de energía en diferentes etapas de proceso).

Cuando un flujo (sea de entrada o salida) tiene más de una conexión con diferentes etapas, es necesario determinar el porcentaje que aporta cada uno de estas etapas, sin embargo, se debe tener en cuenta que la suma del total de los porcentajes de conexión, debe ser del 100%.

4.2.3 *Captura y envío de datos.*

La captura y envío de datos, permite desarrollar el procedimiento de intercambio de información entre la herramienta de análisis ambiental y otros programas. De esta manera es posible integrar los resultados de la simulación y el análisis con dicha herramienta [Pänkälänen, 2000]. En el presente trabajo, la captura de información, se realiza desde y hacia la hoja de cálculo MS Excel a través de macros ó importaciones.

A través de Excel se desarrolló la interfaz para la transferencia de información entre el análisis de proceso y la evaluación ambiental. Inicialmente, la información arrojada por la herramienta de simulación se transfiere a Excel a través de la programación de macros, de esta manera, la información permanece disponible para otras aplicaciones y para los siguientes niveles de la evaluación ambiental.

4.2.4 *Herramientas utilizadas para la transferencia de información.*

En el actual desarrollo metodológico se utilizó como herramienta para la transferencia de información, el programa Excel (Microsoft ® Excel), y las aplicaciones de edición del Visual Basic (Microsoft ©Visual Basic). Por medio de las cuales se obtuvo, por un lado la interfaz de

los modelos estudiados, y por otro las memorias de cálculo que permiten evaluar cada proceso estudiado.

4.3 INVENTARIO DE CICLO DE VIDA DEL PROCESO

El inventario se desarrolla con base en el concepto de eco-vector. Inicialmente, se genera un eco-vector para las alternativas a evaluar, el cual debe suministrar la información relacionada con las corrientes de entrada y salida de materia y energía. La determinación y posterior evaluación del inventario de materia y energía en un proceso industrial, permite tener una primera visión de la incidencia de dicho proceso en el entorno. La etapa de definición y evaluación del inventario, sigue los pasos que se muestran en el diagrama de la Figura 4.5.

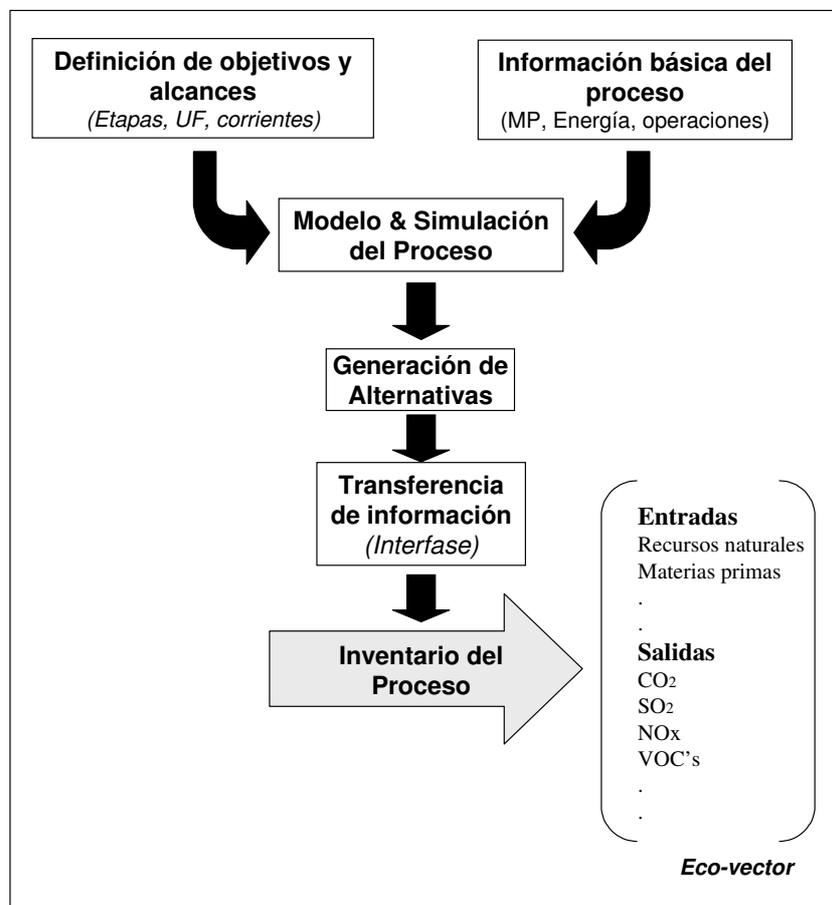


Figura 4.5 Diagrama esquemático para la obtención del inventario del proceso

El inventario del proceso, comienza con la definición del objetivo y alcance del análisis, es decir, con la definición de las etapas a estudiar, el producto de interés (generalmente utilizado unidad funcional) y las corrientes que intervienen en el proceso. Así mismo, es necesario definir la información básica del proceso. Con base en la información anterior, es posible desarrollar un

modelo del proceso a estudiar para generar las diferentes alternativas o escenarios de producción.

Una vez generada la información del proceso, esta se transfiere a una hoja de cálculo donde se obtiene el inventario del proceso (todas las alternativas tenidas en cuenta).

Por último, para llevar a cabo el análisis de inventario, es necesario partir de un diagrama de flujo que ayude a identificar las etapas del sistema a estudiar y su conexión. Así mismo, establecer la calidad de los datos que se utilizarán; tomar los datos pertinentes y por último y si es necesario, redefinir los objetivos y los alcances del estudio. En el siguiente apartado se describe paso a paso el desarrollo del inventario del proceso propuesto en esta metodología.

4.3.1 Definición de los escenarios a evaluar

Una vez desarrollado el modelo del proceso, se deben identificar los escenarios que serán comparados, es decir, se evaluará el proceso original y las alternativas de producción que contemplan variaciones de dicho proceso original.

Los escenarios o alternativas de proceso, se diferencian básicamente en dos aspectos: 1) las corrientes que intervienen en el proceso y los cambios en las materias primas o en los productos, subproductos y reciclados que se propongan en las alternativas, y 2) los cambios en las operaciones desarrolladas en el proceso, tanto para el proceso principal como para los servicios requeridos por el mismo.

Con base en esto, se tendrá en cuenta la mejor alternativa, considerando todos los aspectos involucrados en el proceso.

4.3.2 Cuantificación de recursos naturales, materiales necesarios y descargas.

A partir del modelo o simulación del proceso, se obtiene información de las corrientes involucradas en el proceso, a través de la transferencia de información a una memoria de cálculo, donde es posible cuantificar la totalidad de las corrientes. Así mismo, teniendo en cuenta su actividad o función en el proceso, son caracterizadas para su posterior análisis.

La cuantificación de corrientes como base para el análisis del inventario involucra dos aspectos fundamentales: inicialmente es necesario definir una unidad funcional que permita comparar todas las alternativas bajo una misma base de cálculo, y posteriormente, se deben definir las cargas ambientales que han de ser tenidas en cuenta para la evaluación.

Unidad funcional

La unidad funcional es la unidad de cálculo que permite comparar la cantidad de las corrientes no sólo de entrada sino también de salida, de manera que se pueda medir las cantidades requeridas o emitidas por un producto en particular.

Usualmente la unidad funcional corresponde al producto mayoritario o principal en el proceso, sin embargo, puede ser elegido cualquier corriente de masa o energía. Las unidades de la unidad funcional, dependen del tipo de componente elegido, y pueden ser másicos y/o energéticos.

Determinación de las cargas ambientales (eco-vector)

Debido a que no existe una metodología claramente definida de selección de las cargas ambientales a ser estudiadas, es necesario aplicar criterios para la selección. En esta metodología se propone evaluar las cargas ambientales de las corrientes que satisfacen a uno o más de siguientes criterios:

- ✓ Certeza o posibilidad de significación ambiental (e.g., tóxica);
- ✓ Certeza o posibilidad de importantes necesidades másicas o energéticas (e.g., mayor consumo que un proceso similar);
- ✓ Funcionalmente significativa (e.g., que no se pueda sustituir por otra)

Los criterios anteriores no deben ser tomados como suficientes y/o necesarios para elaborar un inventario, sin embargo, pueden servir como base para la elaboración de nuevos criterios.

Balance de materia y energía

El balance de materia y energía es el paso fundamental en la elaboración del inventario. En la metodología, el balance de materia y energía se realiza en la denominada memoria de cálculo, a partir de los datos del proceso obtenidos por medio de la interfaz.

4.3.3 Evaluación de posibles descargas puntuales (accidentes)

En la evaluación del inventario, es necesario tener en cuenta la posibilidad de que existan fugas o descargas puntuales, las cuales pueden incidir en una incorrecta interpretación de los resultados del inventario.

La metodología considera dos tipos de descargas puntuales: 1) emisiones fugitivas y, 2) pérdidas o escapes. La primera de ellas, se debe incluir al modelar el proceso (se consideran las emisiones fugitivas cuando las pérdidas de materiales sobrepasen el 1%). En este caso, dicha emisión se introducirá como un elemento más del eco-vector, de manera que sea posible cuantificarla en el inventario.

Así mismo, este tipo de descarga se puede evaluar, calculando la probabilidad del evento. El efecto de descarga puntual (C_i/evento) multiplicado por la frecuencia de ocurrencia del evento (evento/año), da como resultado una carga que puede ser agregada a la carga estacionaria.

4.3.4 Reporte de los resultados del inventario.

Los resultados del inventario de entradas y salidas de un proceso, son generalmente presentados en forma de tablas o figuras comparativas. Sin embargo en esta metodología, se ha elegido el eco-vector, puesto que a partir de él, es posible generar las diferentes matrices tanto de concentración en el medio, como de efectos. Adicionalmente, un eco-vector, hace posible la comparación de los diferentes inventarios desarrollados, tantos, como alternativas de proceso hayan sido propuestas y estudiadas. A continuación, se describe las ecuaciones de formulación del eco-vector, sus componentes y unidades, utilizadas en la metodología desarrollada.

El eco-vector (E_v), está compuesto por las cargas ambientales (C) definidas en la descripción del alcance de la evaluación, por lo que el número de componentes, depende de la cantidad de cargas a evaluar. La ecuación 1, representa la configuración del eco-vector:

$$E_v = C_i \quad i=1.....N \quad (1)$$

Quedando entonces el Eco-vector de la siguiente forma:

$$E_v = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \cdot \\ C_N \end{bmatrix}$$

$$C_i = \frac{[Fi]}{[FUF]} \quad (2)$$

Donde

C_i = Carga Ambiental

F_i = Flujo de elemento i (kg/h)

FUF = Flujo de unidad funcional (kg/h o kW/h)³

Las cargas puntuales, como ha sido descrito en el apartado anterior, se calculan tal como se muestra en la Ecuación 3.

$$C_p = \frac{C_i / \text{evento}}{\text{evento} / \text{año}} = \frac{C_i}{\text{año}} \quad (3)$$

³ La unidad de este flujo depende de la unidad funcional escogida.

Donde,

C_p = carga puntual (Kg/año)

Por otra parte, una vez definidos los componentes del Eco-vector, es necesario considerar el tipo de asignación que corresponda a dichas cargas. Como se mencionó antes, esto puede realizarse con base en criterios másicos o energéticos. En el actual desarrollo metodológico, se optó por la asignación másica, teniendo en cuenta que en el análisis de procesos, los flujos másicos son una variable que puede ser manipulada con cierta facilidad. La asignación de cargas en este trabajo se define a través de la siguiente ecuación:

$$Ac_m = \frac{[MP * 100]}{[MA]} \quad (4)$$

Donde

Ac_m = Asignación de cargas-criterio másico (%)

MP= Masa de producto principal (kg)

MA= Masa de alimento al proceso (kg)

Por lo que finalmente, la carga ambiental en el inventario de un proceso queda tal como muestra la Ecuación 5.

$$C_i = \frac{[Fi]}{[FUF]} * Ac_m \quad (5)$$

La información generada a través del eco-vector, puede ser descrita para cada una de las etapas que conforman el proceso en estudio, con lo que es posible generar una matriz de cargas por etapas o también llamada matriz eco-tecnológica (E_t) [Heijungs, 1997; Sonneman, 2002]. La matriz viene dada por la siguiente ecuación:

$$E_t = C_{ij} \quad (6)$$

Donde

C= carga o emisión determinada en el inventario

i=sustancia evaluada, $i=1 \dots N$, y

j=etapa involucrada, $j= 1 \dots M$

Por lo que la matriz queda de la siguiente manera:

$$E_t = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{1M} \\ C_{21} & C_{22} & C_{2M} \\ C_{N1} & C_{N2} & C_{NM} \end{bmatrix}$$

La información de la matriz se presenta en la Tabla 4.2, en la cual se describe la configuración del eco-vector de un proceso de M etapas.

Tabla 4.2 Configuración general de la matriz de tecnología con base en el inventario

Sustancia	Etapas de proceso			
Consumo	Etapas 1	Etapas 2	Etapas M	Total
<i>Combustibles</i>				
<i>Recursos naturales</i>				
Descargas				
<i>Emisiones</i>				
<i>Vertidos</i>				

La información recogida por la matriz E-t, puede servir posteriormente – a partir de factores de destino y de ponderación de efectos-, como base para la evaluación del destino de las sustancias, y la descripción de los impactos potenciales.

4.3.5 Análisis del inventario del ciclo de vida de un proceso

El análisis de los resultados del inventario de consumo y descargas al entorno, es el primer paso para la determinación del perfil ambiental de un proceso, y permite continuar con la evaluación ambiental hacia etapas de mayor complejidad pero de mayor valor agregado, por cuanto los efectos ambientales identificados pueden ser diferenciados en el tiempo y el espacio, y por lo tanto, cuantificados de una manera menos incierta.

En este paso, se relacionan las **cargas ambientales** del eco-vector a través de los **trayectos hacia los medios** con los **receptores** donde generarán los **efectos** más significativos.

4.3.6 Relación de las cargas ambientales con posibles efectos.

Una vez definido las cargas ambientales a través del consumo de recursos y las sustancias emitidas, es necesario relacionar dichas cargas con las etapas del proceso productivo y los posibles efectos. Por lo tanto es necesario considerar aspectos de transporte en los diferentes medios y evaluar los impactos reales y su carácter regional. Las etapas que se deben tener en cuenta para la determinación de los impactos desde una perspectiva de ACV, se presentan a continuación:

a) *Extracción y Transporte de materias primas.* Se tienen en cuenta todos los procesos de extracción, pretratamientos y transporte hasta llegar a la cadena de procesos. En esta etapa, las

principales cargas están referidas al suelo y aire (movimientos de tierra, emisiones por extracciones y transporte).

b) *Procesos productivos (cadena de procesos)*. Se tienen en cuenta los procesos por sí mismo (etapas desarrolladas) y los procesos de generación de energía. Las cargas en este ítem están relacionadas con emisiones, vertidos y residuos generados durante estas fases.

c) *Transporte*. El transporte a través de tierra, aire y agua, debe ser tenido en cuenta, de manera que puedan identificarse los efectos causados en tal actividad. Las cargas definidas aquí están relacionadas con las emisiones causadas por la extracción, producción de combustible y el uso de dicho combustible.

d) *Procesos de producción de energía*. Aquí se indican los efectos de la generación de la energía necesaria para el funcionamiento de los equipos en las diferentes etapas de los procesos y también, la necesaria para la extracción de materias primas.

e) *Escenarios de disposición (Reciclaje y procesamiento de residuos)*. En esta etapa se determinan las diferentes alternativas para la gestión de los residuos y los impactos generados. La Figura 4.6 representa la relación entre las etapas (cargas), efectos y daños.

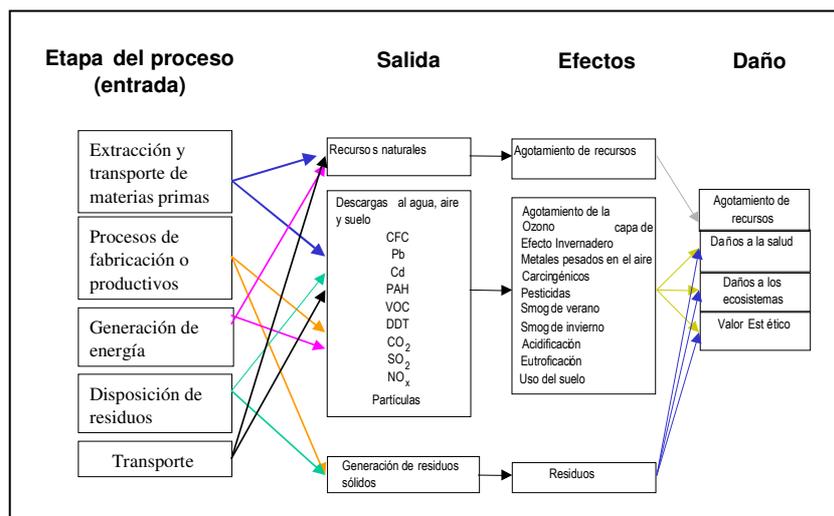


Figura 4.6. Relación entre etapas, cargas y daños. Adaptado de Goedkoop et al, 2000.

Finalmente, en el desarrollo metodológico propuesto, no se tienen en cuenta, los daños a edificaciones (ambiente hecho por el hombre), puesto que no se han incluido en el alcance de la evaluación.

4.4 EVALUACIÓN DEL DESTINO Y EXPOSICIÓN

La evaluación del destino y exposición de una sustancia descargada en un proceso industrial, inicia con el análisis del inventario, donde han sido evaluadas las cargas ambientales [Goedkoop

& Spriensma, 2000]. Con base en las propiedades de dichas sustancias, las características del entorno (ambiente) y la relación entre ellas, es posible predecir (en algunos casos con ayuda de modelos), el destino final de las sustancias, y las concentraciones en los diferentes compartimientos para la posterior estimación de la exposición, tal como se representa en la Figura 4.7.

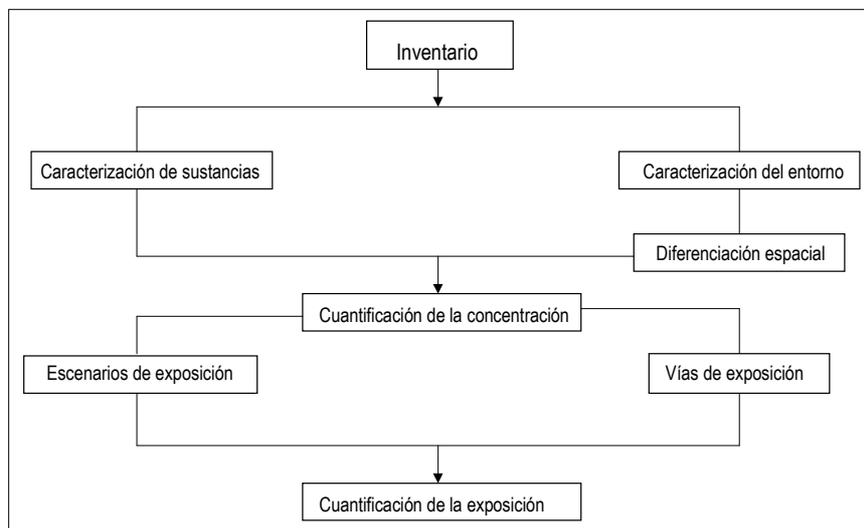


Figura 4.7 Pasos para la evaluación del destino y exposición.

El destino y la concentración de las sustancias en los diferentes compartimientos, pueden ser predichos (o calculados) aplicando criterios de diferenciación espacial y con la ayuda de modelos de transporte, transferencia y transformación de sustancias. Estos modelos –tal como se describió en la evaluación del destino-, permiten obtener información acerca de la tendencia de sustancias específicas a trasladarse o permanecer en determinados medios, aumentando o manteniendo constante la concentración en dicho medio. Así mismo, es posible conocer o inferir dicha tendencia con ayuda del análisis de las relaciones entre las propiedades fisicoquímicas de una sustancia (coeficientes de distribución) y las características del entorno (porosidad de suelo, velocidad del viento, entre otras).

Tal como se describió en la evaluación del destino, la tendencia final de las sustancias descargadas, puede ser predicha a partir de la matriz eco-tecnológica y un factor de destino. Los factores de destino se calculan con base en las tendencias de transporte de las sustancias en los diferentes compartimientos. Más adelante, se describirán dos diferentes formas de calcular el destino de las sustancias, a través del transporte entre compartimientos.

Una vez evaluado el destino, el siguiente paso es el análisis de la exposición. La exposición a la que se encuentran sometidas las áreas de protección, se calcula con base en factores de exposición, los cuales dependen del lugar de evaluación (site-specific). La información relacionada con el destino y exposición de sustancias, es básica para la posterior evaluación de

efectos, ya sea a través del cálculo de riesgos o para la evaluación de impactos. Adicionalmente, está información sirve de soporte en la toma de decisiones relacionadas con la ubicación de la planta.

Existen tres vías fundamentales para la evaluación de los efectos a partir del destino y exposición de sustancias: 1) , a través de la relación entre la concentración de una sustancia en un compartimento (Predicted Environmental Concentration, PEC) y la concentración mínima para la cual no se ha detectado ningún efecto adverso sobre la población objeto (Predicted No-Effect Concentration, PNEC). La relación entre estos dos valores, a través del cociente ($PEC/PNEC$) permite establecer la necesidad de una evaluación más detallada de los efectos [Crettaz et al, 2001], por lo que es posible calcular los riesgos debidos a su acumulación; 2) A partir de la aplicación de funciones para la determinación de la respuesta a una dosis y/o una exposición, se determinan los impactos ambientales de las categorías de impactos seleccionadas [Hertwich & Hammitt, 2001; Potting & Hauschild, 1999; Seppälä, 1999; Hofstetter, 1998; Hughes, 1996]; y 3) la aplicación de bioensayos o estudios toxicológicos, permite también la evaluación de los efectos, con base en estudios dosis-respuesta, una vez evaluado y cuantificado el destino y exposición.

A continuación, la Figura 4.8 presenta un diagrama esquemático de la etapa de evaluación del destino y exposición seguida en la metodología. En ella se relacionan los diferentes aspectos tenidos en cuenta para su desarrollo y su resultado principal.

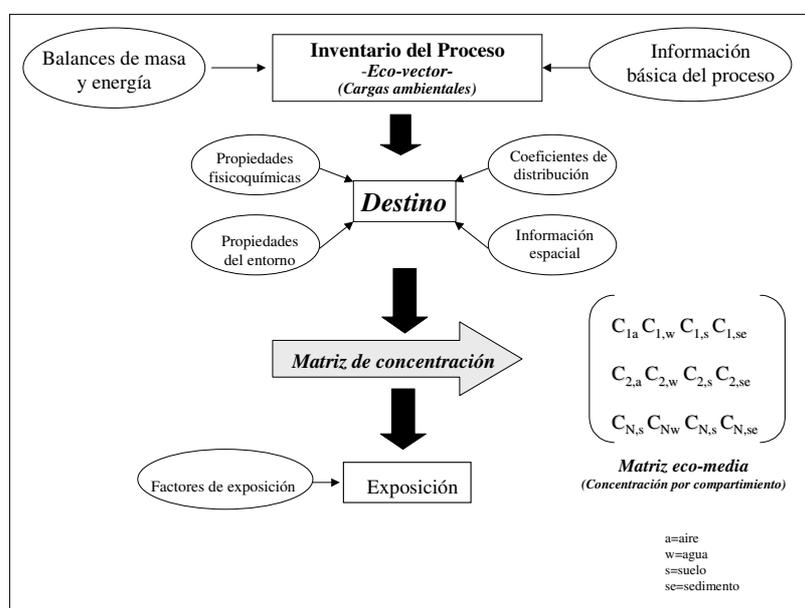


Figura. 4.8 Resultados de la evaluación del destino y exposición de sustancias.

De acuerdo con la Figura 4.8, el principal resultado de esta etapa es la matriz de concentración, en la cual, las filas son las cargas ambientales, y las columnas los compartimentos donde se

pretende evaluar la concentración de las sustancias. La matriz de concentración o matriz eco-media (E_m), se puede obtener a través de dos vías:

a) Por medio de la matriz cargas por etapas (eco-tecnológica) y un factor de destino (ver Ecuación 7).

$$E_m = E_t * F_d \quad (7)$$

En la Ecuación 7, el factor de destino está determinado por la capacidad de distribución de las sustancias en determinados medios, debido a las relaciones entre sus propiedades y las propiedades de los compartimentos.

$$E_m = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{1M} \\ C_{21} & C_{22} & C_{2M} \\ C_{N1} & C_{N2} & C_{NM} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Fd_1 \\ Fd_2 \\ Fd_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{111} & C_{121} & C_{1M1} \\ C_{212} & C_{222} & C_{2M2} \\ C_{N1N} & C_{N2N} & C_{NMN} \end{bmatrix}$$

Los factores de daño (F_d) son valores que predicen la cantidad de sustancia que mayoritariamente, se encontrará en un compartimento específico. Dicho valor depende no sólo de las propiedades de las sustancias, sino también, de las cantidades emitidas y las características de los compartimentos. Los factores de destino, en el desarrollo metodológico, se determinarán a través de los modelos que han sido descritos en el apartado de evaluación de destino.

Para obtener los factores de destino, o encontrar la cantidad de sustancia en los compartimentos a evaluar, es necesario realizar una caracterización de las sustancias y del entorno donde se evalúan los compartimentos, así como aplicar criterios de diferenciación espacial.

El resultado de esta fase, es una matriz en la que su diagonal principal representa los valores de la concentración de cada sustancia en un medio específico. Tal como muestra la Ecuación 8.

$$E_m = [C_{111}, C_{222}, \dots, C_{NMN}] \quad (8)$$

b) Por medio de la determinación de la cantidad de sustancia en cada medio. La matriz de concentración se calcula a partir de la ecuación que se describe a continuación:

$$C_{ij} = \left[\frac{PM_i * n_i}{V_j} \right] \quad (9)$$

Donde:

C_{ij} =Concentración de la sustancia i en el compartimiento j

PM_i = Peso molecular de la sustancia i

n_{ij} = Moles de la sustancia i en el compartimiento j

V_j = Volumen del compartimiento j.

La matriz presenta la forma de una matriz (N*M), y en ella se pueden apreciar los valores de cada una las sustancias evaluadas en los compartimientos de interés.

$$E_m = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{1M} \\ C_{21} & C_{22} & C_{2M} \\ C_{N1} & C_{N2} & C_{NM} \end{bmatrix}$$

4.4.1 Caracterización de sustancias provenientes del inventario.

El criterio de caracterización propuesto parte de las propiedades físico-químicas de la sustancia, puesto que su conocimiento permite predecir su distribución en el ambiente. A partir de ellas y bajo la aplicación de modelos de transporte y transferencia, se evalúa el transporte y el destino de dichas sustancias teniendo en cuenta cuatro compartimientos ambientales: aire, agua, suelo y sedimentos.

Los parámetros más útiles en la caracterización son: peso molecular (PM), puntos de ebullición y fusión (Pe, Pf), solubilidad (S), Presión de vapor (Pv), y los coeficientes de distribución en aire, agua o suelos (Koa, Kow, Kos). Finalmente, en función de las proporciones y valores determinados, las sustancias se clasifican con base en: 1) persistencia en el medio, 2) capacidad potencial de bioacumulación, y 3) toxicidad.

Persistencia: los datos relativos a la persistencia son muy importantes para la evaluación de los posibles efectos, sin embargo, son difíciles de obtener en una forma que sea útil para efectos prácticos, a causa de la estabilidad intrínseca de las moléculas que conforman las sustancias, y la variabilidad de las condiciones ambientales.

La persistencia se expresa con el concepto de vida media, que se define como el tiempo que tarda el receptor en reducir a la mitad la concentración de la sustancia. En realidad, la clasificación permite comparar la vida media estimada, con los valores marcados por el organismo regulador (ver Tabla 4.3).

Tabla 4.3 Rangos de aplicación del criterio de persistencia en los diferentes medios

MEDIO	VIDA MEDIA (días)		
	No persistente	Persistente	Muy persistente
Agua	< 60	≥ 60	> 180
Suelo	< 60	≥ 60	> 180
Aire	< 2	2	> 2
Sedimentos	< 60	≥ 60	> 180

Fuente: US-EPA. Persistent Bioaccumulative Toxic (PBT) Chemicals; Lowering of Reporting Thresholds for Certain PBT Chemicals: October 29, 1999 (Volume 64, Number 209)

Bio-acumulación: se refiere a la acumulación de sustancias tóxicas en los organismos. De forma habitual, no se otorga un valor propio a la bioacumulación, sino que se emplea el factor de bioconcentración (BCF) [US-EPA, 1999]. De acuerdo con Calamari (1993), el factor de bioacumulación para diferentes especies (mayoritariamente compuestos orgánicos) puede predecirse a través de las siguientes ecuaciones:

- ✓ Animales acuáticos y terrestres

$$\text{LogBCF} = a\text{LogKow} + b \quad (10)$$

- ✓ Plantas

$$\text{BCF} = LKoa \quad (11)$$

Donde a y b son constantes que dependen de las especies, L es la fracción lípida y Kow, Koa son los coeficientes octanol-agua y aire respectivamente. La Tabla 4.4 presenta un probable rango de valores que pueden ser utilizados para determinar la bioacumulación, a partir de datos de bioconcentración.

Tabla 4.4. Rango de aplicación de la bioacumulación

FACTOR DE BIOCONCENTRACIÓN (BCF)		
No bioacumulativa	Bioacumulativa	Muy bioacumulativa
< 1000	≥1000	≥5000

Toxicidad: es una propiedad intrínseca de la sustancia, que se define como la capacidad que tiene dicha sustancia de producir un daño. La magnitud de la respuesta tóxica en un organismo depende de la exposición (dosis, tiempo, y vía de exposición) y de factores relacionados con las características del organismo expuesto, del medio ambiente y de la sustancia [CEPIS, 2003]. En la actualidad, no existen criterios cuantitativos de toxicidad convenidos, y los índices de toxicidad empleados, son los parámetros toxicológicos que se utilizan en la evaluación de

riesgos, que son obtenidos a través del análisis dosis-respuesta. A pesar de que existen dos tipos de toxicidad (aguda y crónica), esta generalmente se expresa mediante el término ChV (valor de toxicidad crónica o máximo valor de concentración aceptado). En la Tabla 4.5, se presenta el rango de aplicación utilizado para medir la toxicidad crónica en peces (ESC, 2002).

Tabla 4.5 Rango de aplicación del criterio de toxicidad⁴

<i>ChV (mg/l)</i>		
<i>No tóxica</i>	<i>Tóxica</i>	<i>Muy tóxica</i>
> 10	< 10	< 0.1

Propiedades de las sustancias y la relación con su clasificación.

Las propiedades de las sustancias que permiten clasificarlas de acuerdo con los tres aspectos mencionados antes son: 1) fisicoquímicas, 2) vida media, 3) coeficientes de distribución, y 4) factores de biotransferencia. La Tabla 4.6, muestra la incidencia de dichas variables, en la caracterización de las sustancias.

Tabla 4.6 Incidencia de las propiedades sobre la caracterización de sustancias.

PROPIEDADES	INCIDENCIA		
	Persistencia	Bioacumulación	Toxicidad
Fisicoquímicas	Propiedades tales como peso molecular, puntos de ebullición y fusión, y presión de vapor inciden de forma directa sobre la persistencia de una sustancia en un medio.	Existe una incidencia directa entre las propiedades fisicoquímicas de las sustancias y su capacidad de bioacumulación. Por ejemplo, un mayor K_{ow} implica una mayor acumulación en la fase lipídica. Así mismo, el aumento en la persistencia de una sustancia en un medio, facilita su acumulación en los organismos vivos.	No se presenta una incidencia directa en el aumento de la toxicidad de una sustancia debido a las propiedades fisicoquímicas.
Vida media	Factor ligado de forma directa con la persistencia. Mayor vida media implica una mayor persistencia de la sustancia.	Si existe un mayor tiempo de exposición sobre los organismos vivos, habrá una mayor capacidad para pasar a la cadena alimenticia.	No existe una relación directa de la vida media de una sustancia con su potencial tóxico.
Coeficientes de distribución	Estos coeficientes, permiten estudiar el transporte de una sustancia en diferentes medios. Coeficientes de distribución altos y de difusión bajos, implican una mayor persistencia de la sustancia en los medios.	A mayor transporte de las sustancias, hacia un medio, mayor posibilidad de incorporación de la sustancia. Por el contrario, valores altos de coeficiente de difusión reducen la probabilidad de bioacumulación en el medio.	Dependiendo del tipo de sustancia, una mayor concentración de esta en el medio aumenta su capacidad de causar daño (toxicidad).
Factores biotransferencia	Si los factores de biotransferencia son altos, la sustancia es fácilmente incorporada a la cadena alimenticia aumentando su persistencia en el medio.	Determinan la capacidad de la sustancia de ser ingerida por los seres vivos. A mayor valor de estos factores mayor capacidad de bioacumulación de la sustancia.	Si la capacidad de pasar a la cadena alimentaria es mayor, también lo será la toxicidad de dicha sustancia.

Fuente: [Herrera et al, 2003a]

⁴ La toxicidad crónica expresada en mg/l, indica la concentración en una solución acuosa, donde la solubilidad máxima de la sustancia en agua, ha sido alcanzada

4.4.2 Caracterización del entorno

Comprende la identificación de las características del entorno para diferentes niveles. Tal como se presentó en la definición de los objetivos y alcances, los entornos a evaluar pueden ser de tipo genérico o específico.

4.4.2.1 Entorno genérico. El entorno genérico habitualmente se asume como un entorno multi-compartimiento, en el cual, el destino de sustancias se evalúa en una escala espacial de grandes dimensiones. La idea general es calcular el equilibrio de masa en el ambiente e identificar los compartimientos en los que la sustancia podría aumentar su concentración. En este tipo de modelos se aplica el concepto de “mundo uniforme”, por lo que el ambiente real se simplifica y es posible predecir el comportamiento de las sustancias en los compartimientos de forma preliminar o como una primera aproximación.

4.4.2.2 Entorno específico. Para la determinación de un entorno específico, es necesario caracterizar la zona donde se desarrolla la evaluación. A través de la utilización de Sistemas de Información Geográfica, es posible introducir información de diferentes índoles, tal como meteorológica, población, ríos, y puntos de emisión de aguas residuales, entre otras.

La definición de un entorno específico requiere información relacionada con diferentes aspectos, tales como suelo, acuíferos y climatología. La posición de los acuíferos con respecto al nivel de la superficie es también una variable importante.

Los datos climatológicos permiten estimar la persistencia de los tóxicos en el ambiente, los posibles desplazamientos por arrastre de partículas y gases debido a los vientos, además, y junto con la topografía, los desplazamientos en corrientes superficiales.

El análisis de los modelos de transporte (Chemcan, TaPL3, etcétera, descritos en el Anexo A, sección A.1), ha permitido caracterizar un entorno genérico para dos escalas espaciales diferentes: escala local y escala global.

Como resultado de esta actividad, se determinaron dos tipos de entorno para la evaluación del destino: entornos global y local, así como las relaciones entre dichos entornos y los mecanismos de transporte y transferencia de las sustancias descargadas en ellos. Toda la información concerniente a los entornos definidos, se presenta en el Anexo B, concerniente a los resultados obtenidos.

El entorno regional, descrito en algunos modelos de evaluación del destino de sustancias, en la metodología se ha asimilado el entorno global, dadas las similitudes entre ellos

4.4.3 Aplicación de cartografía en la diferenciación espacial

El uso de análisis cartográfico en la diferenciación espacial, ayuda a la aplicación de criterios de evaluación espacial, y permite identificar el estado real del entorno donde se ubica una actividad industrial.

En este sentido, el uso de sistemas de información geográfica, el desarrollo de mapas de contaminación, y la predicción del destino de sustancias deben estar relacionados para obtener información que pueda ser utilizada en la toma de decisiones relacionadas con la ubicación de la planta.

En la actualidad existe una gran cantidad de información cartográfica que permite conocer el estado ambiental de los diferentes compartimentos que conforman el entorno. A partir de esta información, es posible generar mapas que permiten identificar cual es el estado de dichos compartimentos (en términos de concentración) después de que una actividad industrial esté en funcionamiento. Los pasos para la obtención de mapas de contaminación son los siguientes:

1. Aplicación de modelos de destino para las cargas ambientales identificadas en el inventario.
2. Análisis de los resultados e identificación de sustancias de mayor importancia, por “toxicidad o ecotoxicidad” o por cantidad.
3. Identificación de los compartimentos con un mayor incremento de la concentración.
4. Desarrollo de mapas de contaminación, con base en la cartografía de la zona y los resultados de los modelos.

Para la aplicación de la cartografía en la determinación del destino de sustancias, se utilizaron dos herramientas de creación de mapas: MiraMom® y ArcView®. Estas herramientas, permiten crear y modificar mapas de localización y diferenciación de sustancias en los diferentes compartimentos estudiados.

Por medio de dichas herramientas, y con la ayuda de modelos de evaluación de exposición de sustancias, basados en programas informáticos (e.g: Euses y Great_er), es posible comparar los resultados generados a través de la evaluación de modelos genéricos y específicos, en términos de concentraciones predichas, para las sustancias cuantificadas en un análisis de inventario [Petzet, 2003].

Las características de las herramientas antes mencionadas, están descritas en detalle en el Anexo A (sección A.1) correspondiente a herramientas utilizadas en el desarrollo metodológico.

4.4.4 Estimación de la exposición

Como se ha comentado anteriormente, el concepto de exposición implica la presencia de una sustancia tóxica en un determinado punto del espacio y el tiempo, y la presencia simultánea de

una población en el mismo lugar. Además, es necesario precisar la cantidad de la sustancia que entra en contacto con el individuo. A continuación se presentan los factores más importantes a tener en cuenta para la estimación de la exposición.

4.4.4.1 Escenario de exposición. El escenario de exposición comprende el sitio donde se emiten los tóxicos al ambiente, donde se transportan y donde las poblaciones entran en contacto con los medios o compartimientos contaminados.

El estudio del escenario consta de dos partes fundamentales; la *descripción del sitio y de las áreas de protección* propensos a sufrir la exposición. Las características que interesan serán aquellas que son útiles para estimar las exposiciones.

El entorno se describe en función de las variables que puedan tener influencia sobre el transporte de las sustancias y los niveles de contaminación. Las características físicas importantes del escenario de exposición son: *clima, vegetación, topografía, edafología* (composición y estructura de suelos) y *geohidrología* (estratos en el subsuelo, acuíferos subterráneos y corrientes superficiales).

En lo referente al suelo y al subsuelo es conveniente describirlos en función de la *humedad, pH, contenido de carbono orgánico, presencia de otros intercambiadores de iones, porosidad y tipo de suelo.*

Por otra parte en la descripción de las áreas de protección, se consideran aquellas que están en cercanía de la fuente de contaminación, así como las que pudieran quedar expuestas en el futuro, aunque se encuentren localizados en sitios alejados de dicha fuente.

4.4.4.2 Ruta de exposición. La ruta de exposición, es la trayectoria que sigue un tóxico desde la fuente de emisión hasta el contacto con las poblaciones expuestas, incluyendo la vía de ingreso del tóxico a los organismos expuestos. A continuación se describen cada uno de los elementos que integran la ruta de exposición típica.

Fuente. Las características fundamentales de la fuente son su localización y los mecanismos de emisión. Se localiza y describe utilizando los datos de muestreo y la información preliminar que se tenga acerca del sitio. Se localizan los lugares dónde se liberaron, se están liberando, o se espera que se liberen los tóxicos, identificando todos los mecanismos posibles de liberación y de medios receptores.

Transporte y destino. Después de que la sustancia ha sido liberada le puede pasar lo siguiente:

- ✓ Que se acumule en uno o más medios incluyendo el de recepción

- ✓ Transportarse por una corriente de agua, disuelta o suspendida en algún sedimento, o por los vientos, en estado gaseoso o partículas, o a través del subsuelo.
- ✓ Transformación física (volatilización, precipitación), química (fotólisis, hidrólisis, oxidación, reducción, etc.) o biológica (biodegradación)

Punto de exposición. Cualquier contacto potencial entre los pobladores con un medio contaminado es un punto de exposición. Son más importantes los puntos de exposición dónde la concentración que va a ser contactada sea la más alta y dónde la población expuesta se clasifique como de interés especial por pertenecer a un grupo en particular.

Vías de exposición. El último elemento de la ruta de exposición es la vía de exposición, que es el mecanismo por medio del cual el tóxico entra al organismo. En el caso de exposiciones ambientales las vías de exposición son ingestión, inhalación y contacto cutáneo. La selección de que vías se deben de estudiar, depende de los medios en los que se encuentre la sustancia en el punto de contacto. Si se encuentra en el agua potable, en los alimentos o en el suelo la vía de exposición será la ingestión, si se encuentra en el aire, sea como gas, vapor o partículas suspendidas, la entrada será por la vía respiratoria (inhalación) y si se encuentra en el agua o aire ambiente que entra en contacto con la piel, será por vía cutánea.

4.4.4.3 Cuantificación de la exposición. El estudio de la ruta de exposición tiene por objeto llegar a determinar la cantidad de sustancia tóxica que entra en un organismo durante el período de exposición y poder estimar las exposiciones futuras. La cuantificación de la exposición consiste en determinar la magnitud, frecuencia y duración de las exposiciones de los individuos miembros de la población por cada una de las rutas de exposición significativas.

Si la exposición ocurre durante un determinado período, la exposición total se divide entre el tiempo de ocurrencia para calcular la tasa de exposición promedio por unidad de tiempo y frecuentemente esta tasa promedio de exposición se expresa por unidad de masa corporal.

Existen tres categorías de variables que se pueden usar para calcular el valor de la exposición: 1) variables relacionada con la sustancia (**concentración de exposición**); 2) variables que describen la población expuesta (**tasa de contacto, frecuencia y duración de la exposición, peso corporal**) y 3) variable determinada por el proceso de evaluación (el **tiempo promedio**).

4.5 ANÁLISIS DE DOMINANCIA

Como se ha mencionado en el capítulo de fundamentos teóricos, el objetivo de un análisis de dominancia en la evaluación ambiental, no sólo es determinar las etapas y corrientes predominantes por su capacidad contaminante, sino también los compartimentos sobre los cuales existirá un incremento de la concentración de las sustancias descargadas.

En el análisis de dominancia para los compartimentos (aire, agua, tierra y sedimento), primero se asignarán todas las emisiones consideradas para una categoría de impacto determinada a un compartimento. A partir de aquí, en la toma de decisiones se debe considerar cual (o cuales) compartimentos deben ser evaluados. En el caso de las etapas del proceso en estudio, el análisis de dominancia define aquellas cuya descarga aumente la concentración de las sustancias emitidas en los compartimentos predominantes, o sean de especial interés.

Una representación gráfica de la concentración de una sustancia específica en los diferentes medios, ayudará a identificar aquellos compartimentos que serán elegidos para una evaluación con mayor detalle. En el mismo sentido, las descargas por etapa pueden representarse de forma gráfica, con lo que su evaluación permitirá definir cual de ellas son las de mayor aporte contaminante. Sin embargo, este procedimiento, sólo sirve de punto de partida para quienes toman decisiones, porque deben tenerse en cuenta además otros criterios de selección.

Finalmente, el análisis de dominancia en la selección de etapas predominantes del proceso con base en factores específicos y dependientes de un sitio (entornos genéricos o específicos) permite obtener una evaluación de efectos reales.

4.5.1 Determinación de las etapas del proceso con una mayor carga ambiental

Las etapas del proceso con mayor carga ambiental se determinan a partir de consumos o descargas por cada etapa (información contenida en el eco-vector). En otras palabras, una vez obtenido el eco-vector, se compara la contribución de cada etapa por sustancia y compartimento. Se consideran entonces las que presenten una mayor contribución en los compartimentos denominados predominantes en el análisis de dominancia. El resultado de esta actividad, será una matriz de cargas ambientales basada en el eco-vector.

4.5.2 Determinación de los compartimentos predominantes

Los compartimentos predominantes serán determinados a partir de la matriz eco-media, puesto que en ella se encuentran las concentraciones por compartimentos. Los criterios que ayudan a determinar cuales son los compartimentos afectados son: 1) las condiciones del entorno, y 2) la capacidad de afectación de las áreas de protección. Es decir, una vez identificadas las concentraciones después de la descarga en los compartimentos elegidos, deben ser evaluadas aquellas que superen los rangos definidos en el análisis de dominancia.

4.6 DETERMINACIÓN DEL PERFIL DE IMPACTOS Y/O RIESGOS DEL PROCESO

El perfil de efectos a través inicialmente de riesgos y posteriormente de impactos, se determina a partir de las cargas ambientales identificadas en el inventario y de la concentración de las

sustancias descargadas en los diferentes compartimentos. La Figura 4.9, presenta el diagrama de flujo definido para determinar este perfil de efectos.

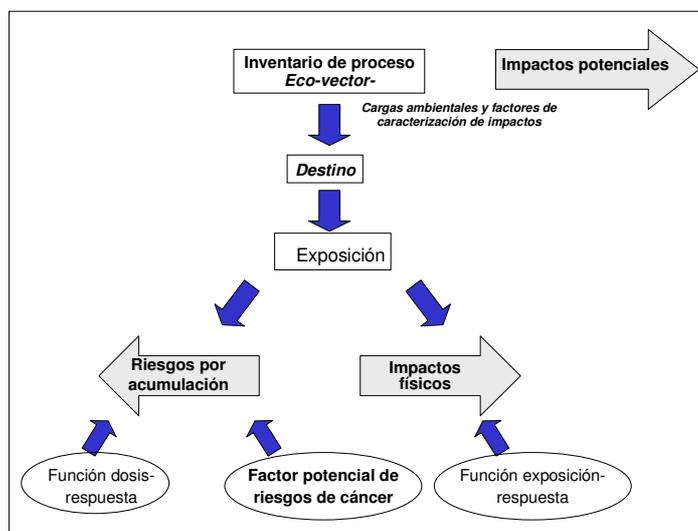


Figura 4.9 Perfil de efectos a partir del inventario y destino. Adaptado de Jolliet, 2001

En la figura 4.9, se hace un recorrido por los pasos para la obtención del perfil de riesgo y/o impactos. Los impactos potenciales pueden ser calculados a partir de las cargas ambientales y con base en factores de caracterización [Herrera et al, 2003b].

Posteriormente, con base en la información de la matriz del destino, es posible caracterizar el riesgo o determinar la proporción de peligro para las áreas de protección establecidas en el objetivo de la evaluación, a partir de información específica del sitio.

En el primer caso, la caracterización del riesgo debe diferenciar el área afectada (salud o ecológico) y en el caso de riesgos a la salud, si estos son cancerígenos o no. En el caso de riesgos cancerígenos, la caracterización expresa la probabilidad de sufrir un cáncer debido a una exposición diaria a una determinada sustancia.

Por otra parte, en el caso de los no-cancerígenos, la relación de peligro se obtiene a partir de dividir los niveles de exposición (o dosis), por su respectivas dosis de referencia de la sustancia descargada. La Figura 4.10, representa la respuesta a una dosis, para riesgos cancerígenos y no cancerígenos.

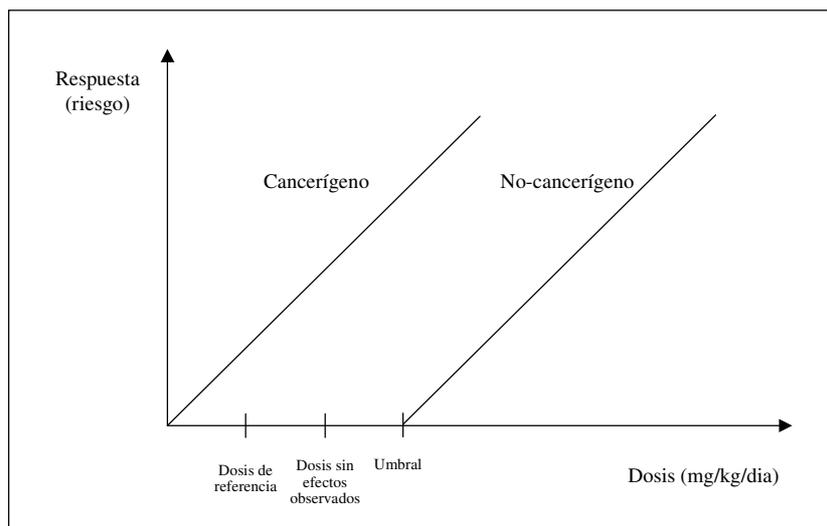


Figura 4.10 Funciones dosis-respuesta para contaminantes cancerígenos y no-cancerígenos

Adicionalmente, los impactos físicos, que en este estudio hemos denominado cuantificables, pueden ser calculados a partir de los datos de la evaluación del riesgo, o con base en funciones exposición-respuesta.

4.6.1 Selección de indicadores, categorías y unidades.

Es necesario seleccionar las categorías de impacto, o indicadores de categorías a ser utilizadas en la cuantificación de los efectos, ya sea como riesgos o impactos. En la metodología, se ha realizado una caracterización de indicadores para categorías de impacto, diferenciando éstos como mid-point (punto intermedio) o end-point (punto final). Así mismo, se han clasificado los indicadores en diferentes categorías: 1) *indicadores de presión*, 2) *de estado*, 3) *puntos intermedios*, y 4) *puntos finales*. A partir de indicadores de presión, se obtienen las tres categorías de interés o áreas de protección: 1) salud humana, 2) recursos naturales, y 3) ecosistemas.

Con base en el análisis del inventario desarrollado por la iniciativa Setac-Unep [Setac-Unep, 2002], se ha obtenido una caracterización de los impactos de mayor reconocimiento en el análisis ambiental (Tabla 4.7), donde se muestran los indicadores de mayor incidencia.

Esta información se complementa en la Figura 4.11, donde se describe gráficamente la relación entre las diferentes categorías de indicadores, impactos y áreas de protección. En dicha figura, también presenta la relación existente entre los niveles de evaluación ambiental propuestos en la metodología. En ella se ve claramente, como partiendo del inventario del proceso, es posible llegar hasta las áreas de protección, a través de diferentes indicadores y categorías.

Tabla 4.7 Definición de indicadores de categorías como intermedios y de punto final

Indicadores de Presión	Indicadores estado	Punto intermedio	Punto final
Acidificación			
Emisiones de SO ₂	g eq. H ⁺	Acidificación	Destrucción áreas
Emisiones de NO _x	g eq. H ⁺	Acidificación	Destrucción áreas
Cambio climático			
Emisiones de CO ₂ , No ₂ , HC	g eq. CO ₂	Cambio climático	Aumento nivel océanos
Contaminación del suelo			
Vertidos de residuos sólidos	g eq. Residuos	Contaminación del suelo	Extinción de especies
Deforestación			
Extracción de combustibles fósiles	m ² desforestados/año	Uso del suelo	Extinción de especies
Destrucción de la capa de ozono			
Emisiones de CO ₂ , CFC	g eq. CO ₂	Destrucción capa ozono	Cáncer
Eutrofización			
Emisiones de NO _x , SO ₄ ⁻	g eq. NO _x	Eutrofización	Proliferación de algas
Polución de aire			
Emisiones de CO ₂	eq. CO ₂	Polución en atmósfera	Problemas respiratorios
Emisiones de SO ₂	eq. SO ₂	Polución en atmósfera	Problemas respiratorios
Emisiones de NO _x	eq. NO _x	Polución en atmósfera	Problemas respiratorios
Emisiones de sustancias orgánicas	VOC, PAHs	Polución en atmósfera	Problemas respiratorios
Emisiones de Partículas	TSP	Polución en atmósfera	Problemas respiratorios
Polución en el agua			
Vertidos de agua con alto nivel de DQO	Consumo de O ₂	Contaminación de aguas	Extinción especies
Edificación			
Construcción de la Planta	m ² construidos	Uso del suelo	
Reducción de recursos naturales			
Extracción de combustibles fósiles	kg/año	Uso del suelo	Reducción de los recursos
Consumo de agua	l/año	disminución caudal	Extinción de especies
Daño del ecosistema			
Extracción de combustibles fósiles	kg/año	Uso del suelo	Extinción de especies
Extracción de metales	Kg/año	Uso del suelo	
Consumo de agua	l/año	disminución caudal	Extinción de especies
Niebla			
Emisiones de vapor de agua	kg agua/año	Efecto invernadero	Falta de visibilidad

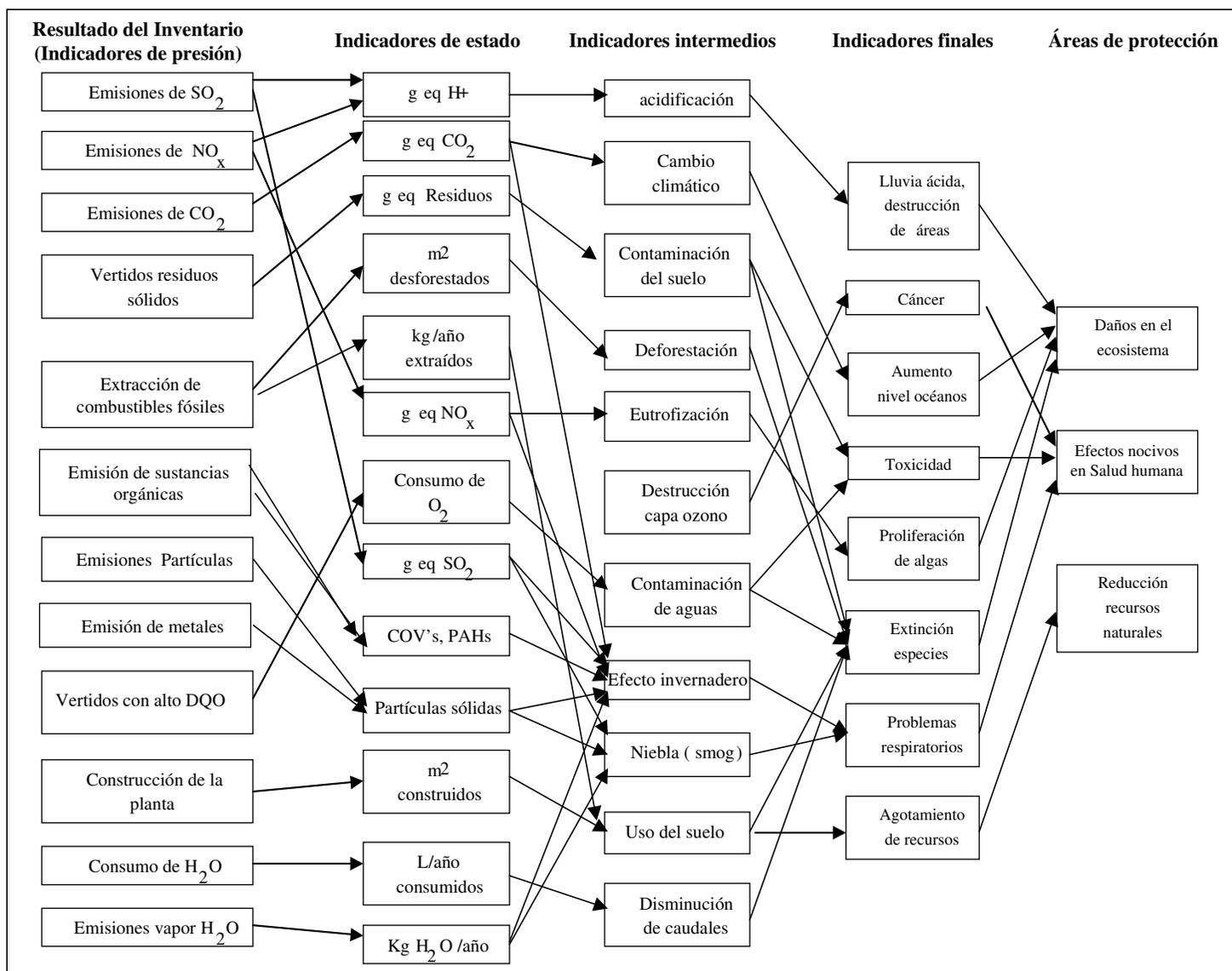


Figura 4.11. Caracterización y clasificación de indicadores intermedios y finales. Adaptado de Setac-Unep, 2002

4.6.2 Cuantificación de efectos (riesgos y/o impactos)

Antes de cuantificar los efectos en términos de riesgos y/o impactos generados por las cargas ambientales del proceso en estudio, es necesario aclarar lo que en la metodología han sido considerados como tales, y la forma de cuantificarlos.

Riesgos ambientales

A partir de la concentración predicha de una determinada sustancia en un compartimiento es posible caracterizar el riesgo e identificar la probabilidad de que ocurra un efecto dañino. Si la probabilidad es alta, entonces es necesario cuantificar dicho efecto para conocer el daño ambiental que puede llegar a ser generado.

En el caso de los riesgos a la salud, estos pueden ser cancerígenos y no cancerígenos. En el caso de los riesgos no cancerígenos, es posible expresarlos como la relación entre el nivel de exposición estimado y el nivel de exposición para el que no se observan efectos.

Otro aspecto importante en la estimación de los riesgos a la salud, es el factor de pendiente de cáncer. Este factor se define como la pendiente de la región lineal de la función dosis-respuesta, y es el índice de toxicidad que se usa para evaluar riesgos ambientales producidos por cancerígenos. Las unidades son $(\text{mg}/\text{Kgxdía})^{-1}$

El factor de pendiente no representa un nivel de exposición invariable, pero permite relacionar la exposición con la probabilidad de sufrir un cáncer [Meneses, 2002].

A partir de las diferentes metodologías utilizadas para la determinación de riesgos, en el actual desarrollo metodológico la estimación de la probabilidad de sufrir un cáncer, se calcula como se presenta en la Ecuación 12.

$$R = \frac{D_t * FP * DE}{TP} \quad (12)$$

Donde:

R= Probabilidad de ocurrencia de cáncer, (adimensional)

D_t= Dosis diaria total, por cada una de las vías de exposición definidas, (mg/kg-día)

FP= Factor de pendiente, $(\text{mg}/\text{kg-día})^{-1}$

DE= Duración de la exposición, (años)

TP= Tiempo promedio de vida, (años)

Por otra parte, los riesgos a la salud no-cancerígenos, se evalúan a partir de la relación de peligro (HR). La forma de calcular esta forma de riesgo a la salud, en la metodología, se describe con la Ecuación 13.

$$RP = \frac{D_t}{DdR} \quad (13)$$

Donde:

RP= Relación de peligro (adimensional)

D_t= Dosis total (mg/kg-día)

DdR= Dosis de referencia para la sustancia en evaluación (mg/kg-día)

Finalmente, para los riesgos ecológicos, la caracterización se realiza con base en la relación entre la concentración de una sustancia y aquella a la que dicha sustancia no causa un efecto nocivo, tal como se muestra en la Ecuación 14.

$$CR = \left[\frac{CAP}{CANE} \right] \quad (14)$$

Donde:

CR= Caracterización del riesgo (adimensional)

CAP= Concentración ambiental predicha (mg/m³)

CANE= Concentración ambiental de no-efecto mg/m³

En el caso de que no contar con información de la CANE, siempre es posible obtener la proporción de peligro, a partir de información referente a los efectos nocivos de las sustancias.

En este sentido, la evaluación del riesgo requiere *la identificación de la zona* que probablemente sería afectada, por lo que dicha evaluación es específica de un lugar y de un momento determinado.

Por otra parte, la determinación de impactos se desarrolla en dos vías: 1) impactos potenciales - los cuales son calculados a partir de las cargas ambientales y factores de caracterización-, que son impactos globales y no dependen de un lugar específico; y 2) los impactos específicos o físicos -aquellos que dependen de lugar donde se evalúan- y que pueden ser cuantificados para las tres áreas de protección definidas.

Existen diversas herramientas informáticas y modelos que pueden ser útiles en la evaluación del riesgo, en los casos de estudios presentados al final de este documento, se evaluarán las ventajas y desventajas para su aplicación en casos prácticos. Particularmente en la evaluación de riesgos, se utilizó Caltox™ y Euses

Impactos Ambientales.

En el desarrollo metodológico propuesto, se definen dos tipos de impactos ambientales. Por un lado los impactos potenciales, que representan la capacidad que tiene una sustancia de causar un efecto negativo. Por otro lado, los impactos específicos, cuya estimación permite cuantificar cual es el efecto de una sustancia sobre entorno específico.

Impactos potenciales

Los impactos potenciales se calculan a partir de los datos del inventario y considerando las categorías de impacto e indicadores de categorías que hayan sido elegidos en la etapa anterior. Los factores de caracterización, son específicos y deben estar relacionados con cada indicador, de manera que se pueda evaluar la contribución potencial. Las cargas ambientales inventariadas se clasifican bajo diferentes indicadores de impacto. Se relacionan factores de caracterización (ponderación) con cada indicador para evaluar la contribución potencial de cada carga. Estos factores dependen de la base de datos utilizada y multiplicándolos por las cargas ambientales, se obtienen las contribuciones potenciales correspondientes.

En el actual desarrollo metodológico, los impactos potenciales evaluados serán el *consumo de Recursos Naturales (RN)*, *la acidificación*, *la eutrofización*, *la toxicidad humana* y *el efecto invernadero*, así mismo, la evaluación ha sido desarrollada con ayuda de herramientas informáticas de análisis de ciclo de vida (Team™, SimaPro®). Estas herramientas permiten analizar los impactos generados por un producto, proceso o actividad industrial durante su ciclo de vida, así como comparar dos productos que tienen materiales y/o procesos diferentes pero que cumplen con la misma función [Herrera, 2003b]. De acuerdo con la metodología, la forma de calcular los impactos potenciales se aprecia en la Ecuación 15.

$$I_p = C * P * F_c \quad (15)$$

Donde:

I_p = impacto potencial (g-eq de sustancia)

C= Carga ambiental (g/kg de producto)

P= Producto total en el tiempo de evaluación (kg)

Fc = Factor de caracterización (g-eq/g)

Los factores de caracterización dependen de la sustancia y de los métodos utilizados para la obtención de los impactos.

Impactos específicos (físicos o cuantificables)

Los impactos específicos referidos a un sitio en concreto, y a una población determinada tales como *casos de hospitalización*, o *pérdida de vida* en el caso de salud humana, y *neutralización de áreas* o *pérdida de rendimiento* en el caso de ecosistemas o recursos naturales. Estos impactos son calculados a partir de las funciones respuesta a la exposición. Así mismo, los efectos específicos o reales, se calculan sobre las tres áreas de protección definidas en la primera parte de la metodología: salud humana, ecosistemas y recursos naturales.

A partir de la determinación de la concentración de sustancias en los diferentes compartimentos, y con base en variables tales como dosis de referencia, concentración de no-efecto, valores umbrales de toxicidad, entre otros, se obtiene el valor de los impactos obtenidos.

La evaluación de impactos físicos y daños ambientales se ha realizado a través de una herramienta informática (Ecosense ©). Dicha herramienta permite evaluar los efectos más importantes de la exposición de sustancias, a través de factores de impacto y daño, para cada categoría identificada en las áreas de protección establecidas.

4.7 ESTIMACIÓN DE DAÑOS

El perfil de daño ambiental puede ser generado a partir del análisis de impactos y riesgos ambientales identificados a lo largo del ciclo de vida de un proceso. A partir de cada impacto físico ó matriz eco-impacto (carga por etapa) se multiplica con las matrices de asignación de daño (factor de daño por contaminante).

Para cada matriz de asignación de daño el resultado puede ser otra matriz o un vector. En el caso de evaluación de impactos globales, es necesario definir el eco-vector [Sonneman, 2000]. La matriz permite comprobar, en que localización un proceso habría causado menos daño.

El perfil de daños podría contener daños potenciales en el caso de accidentes que sean simulados, o de los cuales se tenga un modelo de comportamiento. En principio, dependiendo del esquema intermedio de agregación seleccionado, el perfil de daños se puede diferenciar en daños en áreas de protección. En el caso de salud humana se evalúan en términos de enfermedad y/o mortalidad. La Figura 4.12 presenta los pasos para la obtención del perfil de daño, a partir de la información del inventario y de las matrices de concentración y tecnológica.

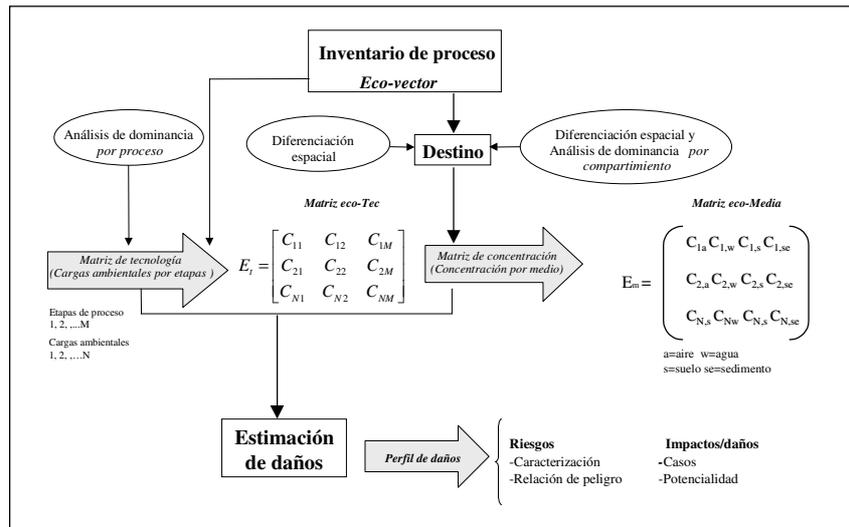


Figura 4.12 Determinación del perfil de daños

La determinación del perfil de daños inicia con el cálculo de las matrices de tecnología y concentración, para estimar los daños a la salud humana, ecosistemas y recursos naturales.

4.8 TOMA DE DECISIONES CON BASE EN CRITERIOS AMBIENTALES

La toma de decisiones es la última etapa de la metodología, en ella se comparan las diferentes alternativas para el proceso en estudio, y consiste en dos pasos: 1) estructuración, y 2) análisis del problema. La Figura 4.13 muestra un diagrama de flujo de esta etapa.

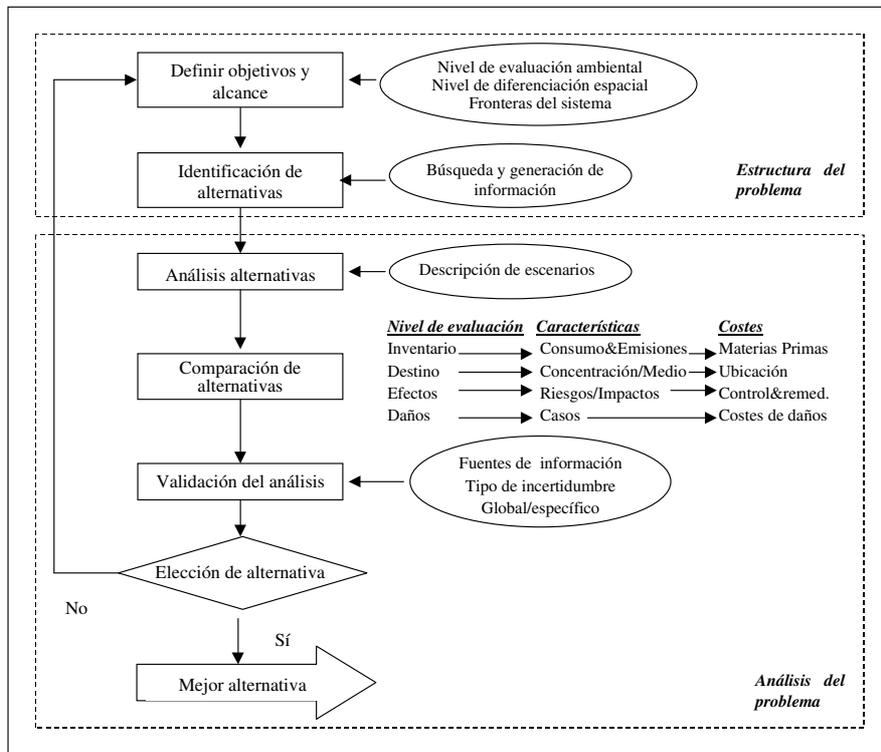


Figura 4.13 Toma de decisiones con criterios ambientales en el análisis de procesos.

De acuerdo con la figura, la toma de decisiones en el análisis de procesos, se basa en el desarrollo de dos etapas. En la primera de ellas, la estructuración del problema, se define tanto los objetivos y alcance del análisis como las alternativas que se pretenden comparar.

En la segunda etapa o análisis del problema, se desarrollan los pasos para describir las alternativas elegidas, comparar en diferentes niveles de evaluación ambiental, y elegir la(s) alternativa(s) que mejor se adecuén(n) a los criterios definidos para la selección.

4.8.1 Definición de objetivos y alcance de la etapa de toma de decisiones

La definición de los objetivos y alcances de la etapa de toma de decisiones, consiste en el planteamiento de las decisiones que se deben tomar, y que nivel de detalle se alcanzará. En este paso se determina el nivel de evaluación ambiental sobre el que se soportan las decisiones tomadas, la diferenciación espacial que se debe tener en cuenta, y las etapas o procesos sobre los cuales se toman las decisiones.

4.8.2 Identificación de las alternativas

Una vez definido el proceso a estudiar, y el nivel de detalle que debe involucrar la toma de decisiones, el siguiente paso es identificar las alternativas que conforman los diferentes escenarios del proceso. Cada alternativa debe ser evaluada bajo los mismos criterios de evaluación y caracterizada de manera que se puedan comparar su desempeño ambiental.

En la identificación y caracterización de las alternativas es necesaria una gran cantidad de información, de manera que sean tenidos en cuenta todos los aspectos. La información requerida en este paso está básicamente relacionada con los aspectos técnicos del proceso.

4.8.3 Análisis de alternativas.

El análisis de alternativas consiste en la descripción de sus características más importantes y la generación de los escenarios para la evaluación ambiental. Con base en los escenarios se hace la comparación en los diferentes niveles de evaluación.

4.8.4 Comparación de las alternativas o escenarios.

Una vez han sido descritas las alternativas propuestas para el proceso en estudio, y generados los escenarios que resumen sus características, el siguiente paso consiste en compararlos.

La comparación de los escenarios se realiza con base en los cuatro niveles de la evaluación ambiental. El primer nivel de comparación es el inventario. Con base en dicho inventario es posible comparar los consumos de materia y energía de cada alternativa y de la misma forma, las sustancias descargadas tanto cualitativa como cuantitativamente. La comparación en este nivel de la evaluación, se realiza a través de los resultados de un balance de materia y energía, de manera que sean evaluados los consumos y descargas, sino también, a

través de balances económicos, de manera que sea visible cual es la alternativa que presenta menores costes de producción.

El segundo nivel de comparación es la evaluación del destino de las sustancias descargadas al ambiente. En este nivel, se pueden evaluar también las características de la región o zona donde son descargadas las sustancias a través de su concentración en los compartimentos de interés. En este nivel, es posible hacer una comparación en términos económicos, evaluando los costes de ubicación de la actividad industrial en zonas donde se produzca un efecto menor.

El tercer nivel de comparación se basa en el análisis de los efectos generados por cada uno de los escenarios, dichos efectos pueden ser descritos en forma de riesgos o impactos. Así mismo, en términos económicos se pueden describir los costes de control de la contaminación (al interior de la planta) o de remediación cuando ya se ha identificado un efecto adverso.

El cuarto y último nivel de comparación, se desarrolla a través de la estimación del daño ambiental causado por los diferentes escenarios de producción. En este caso, la comparación puede ser efectuada a través de la cuantificación de los daños en forma de casos registrados de efectos específicos (enfermedad, incapacidad o muerte, disminución de cosechas, entre otras) para las diferentes áreas de protección. Finalmente, la comparación de los daños puede ser realizada por medio de costes ambientales (costes externos).

4.8.5 Valoración de la incertidumbre

Teniendo en cuenta la cantidad de información necesaria para la caracterización, el análisis y la comparación de los escenarios de evaluación, así como que no siempre dicha información puede ser contrastada con datos reales (puesto que en algunos casos esta información es el resultado de la aplicación de modelos matemáticos), es necesario corroborar los resultados obtenidos con técnicas de validación.

Existen diferentes técnicas de validación de la información. Ellas dependen del tipo de incertidumbre que esté presente, de las fuentes de información con que se cuente y de la diferenciación espacial que se halla especificado [Schuhmacher et al, 2001]

A medida que se avanza en el nivel de comparación, la necesidad de conocer la incertidumbre del análisis es mayor. Es decir, cuando se pretende comparar en el nivel de inventario, donde la información necesaria es básicamente información técnica del proceso, la incertidumbre es muy poca y probablemente no sea necesaria una validación rigurosa.

Por otra parte, en el siguiente nivel de comparación, cuando se trata del destino de las sustancias descargas, es necesaria no solo información de la sustancias descargadas, sino también del entorno donde se efectúa la descarga. En este sentido, la aplicación de modelos de transporte y transformación de sustancias aumentará la incertidumbre de los resultados

obtenidos, por lo que la definición de los criterios espaciales ayudará a disminuir la incertidumbre.

En los siguientes niveles de comparación, la necesidad de validar los datos es mayor. En el caso de los efectos ya sea a través de riesgos o impactos, existe una mayor incertidumbre en la información porque se involucran criterios no sólo referentes a las sustancias y el entorno, sino también, a factores de exposición o categorías de impacto, entre otros.

En el caso de la estimación y cuantificación de daños, es necesaria una mayor rigurosidad en la validación.

4.8.6 Elección de la(s) alternativa(s)

Una vez realizada la comparación de alternativas, el siguiente paso es la elección de la(s) alternativa(s) que se adapte(n) a lo definido en los objetivos y alcances. Si con base en la comparación de los escenarios, no se obtiene una alternativa que cumpla con las especificaciones establecidas, entonces es necesario replantear algunas de las especificaciones de manera que puedan ser establecidas nuevas alternativas e iniciar nuevamente el procedimiento de toma de decisiones.

Si por el contrario, como resultado del procedimiento de toma de decisiones, se encuentra una alternativa que cumple con las especificaciones establecidas, el siguiente paso consistirá en su implementación.

REFERENCIAS

- Aguilera V., Alcantara V. De la economía ambiental a la economía ecológica. Ed. Icara:Fuhem. (1994)
- Beyer A., Mackay D., Matthies M., Wania, F., Webster E. Assessing Long-range Transport Potential of Persistent Organic Pollutants. Environ. Sci. Tech. 34: 699-703 (2000)
- Calamari D. Chemical Exposure Predictions. Lewis Publishers Inc, Chelsea (1993)
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). Curso de autoinstrucción en metodología de identificación y evaluación de riesgos para la salud en sitios contaminados. Disponible en <http://www.cepis.ops-oms.org/tutorial3/e/index.html> (2003)
- Crettaz P., Pennington D., Brand K., Rhomberg L., Jolliet O. Assessing human health response in life cycle assessment using ED10s and DALYs, Part 1: Cancer effects; Risk Analysis, in press. Coefficients available at <http://gecos.epfl.ch/lcsystems> (2001)
- Di Guardo A. CHEMCAN Program. level III fugacity model of regional fate of chemicals Version 4.95. Disponible en <http://www.trentu.ca/envmodel> (1996)
- Ecobilan. Introduction to Tools Environmental Analysis Management. (1998)
- Economic and social council. ESC-EU An evaluation of the economic impact of ozone pollution on agricultural crop production in Europe. Technical report. (2002)
- Environmental Science Center. ESC. PBT Profiler Methodology. <http://www.pbtprofiler.net/Methodology.asp> (2002)
- European Chemicals Bureau. European Union System for the Evaluation of Substances. EUSES-Program. Version I (1997)
- Goedkoop M., Spriensma R. The Ecoi-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Manual for Designers. Pré Consultants B.V. (2000)

Gómez A. Simulación y Modelización de una Planta de Incineración de Residuos sólidos. Reporte Final, laboratorio de investigación. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Rovira y Virgili. (2001)

Heijungs R., Suh S. The computational structure of life cycle assessment. Kluwer Academic Publishers. 1-4020-0672-1 (2002)

Heijungs R. Economic Drama and the environmental stage. Ph.D Thesis. CML. Leiden University. The Netherlands (1997)

Herrera I., Schuhmacher M., Felix L., Castells F. Application of Tools for Environmental Analysis and Management for the Design and re-design of Processes. 11th Annual Meeting of SETAC-Europe, Madrid, 6 – 10 May (2001)

Herrera I. Integración entre una herramienta ambiental y la simulación de procesos, para su aplicación en el diseño. Memoria proyecto de investigación. Departamento de Ingeniería Química. Universitat Rovira i Virgilil, España. (2001)

Herrera I., Schuhmacher M., Castells F. Comparison of several alternatives to assess fate & exposure as a previous phase in the ecological risk assessment. 13th annual meeting of SETAC-Europe, Hamburg, April 27 – May 1, (2003)

Hertwich E., Hammitt J. A decision-analytic framework for impact assessment Part I: LCA and decision analysis. *Int. J. LCA* 6 (1) 5 – 12. (2001)

Hofstetter P. Perspectives in life cycle impact assessment. A structured approach to combine models of the technosphere, ecosphere and, valuesphere. Kluwer academic publishers. (1998)

Hughes W. Essentials of environmental toxicology. The effects of environmentally hazardous substances on human health. Ed. Taylor&Francis. (1996)

Jolliet O., Pennington D. TORs of the definition study of the LCIA Programme in the UNPE-SETAC Life Cycle Initiative. EPFL Lausanne, Switzerland (2001)

McKone T., Enoch K. CalTOX™, A Multimedia Total Exposure Model Spreadsheet User's Guide. Version 4.0 (Beta). Disponible en <http://eetd.lbl.gov/ied/era> (2002)

Meneses M. Modelo de evaluación del riesgo sobre la salud. Aplicación a los residentes en las rodalias de la incineradora Montcada y Reixac. Tesis doctoral, Universitat Rovira i Virgili, Spain (2002)

Pänkäläinen P. Environmental Simulation of a MSW Incineration Process with Hyprotech Hysys Plant® v.2.1 Simulation Software. Final Report, laboratorio de investigación. Departamento de Ingeniería Química. Universidad Rovira y Virgili (2000)

Petzet S., Herrera I., Schuhmacher M. Comparison of the environmental multimedia fate and exposure model Euses and Gis-based chemical exposure tool for down the drain chemical Great_er for rivers. Study work. Technical University Berlin-University Rovira i Virgili, Tarragona, September, (2003)

Potting J., Hauschild M. The structure of life cycle impact assessment, Int. J LCA 4(1), 4-6. (1999)

Prat N. Estado Ecológico de los ecosistemas acuáticos en España. Libro de Ponencias. Congreso Ibérico sobre Gestión y Planificación de Aguas. Zaragoza. pp 45-62. (1998)

Seppälä J. Decision analysis as a tool for live cycle impact assessment. LCA documents Vol 4. Ecomed publishers. (1999)

Schuhmacher M., Meneses M., Xifró A., Domingo J.L. The use of Monte-Carlo simulation techniques for risk assessment - Study of a municipal waste incinerator. Chemosphere 43:787-799. (2001)

Sonneman G. Environmental Damage Estimation in Industrial Process Chains. Ph.D Tesis, Universitat Rovira i Virgili, Spain (2002)

United States-Environmental Protection Agency. US-EPA. Generic assessment endpoints for ecological risk assessments U.S. Environmental Protection Agency, Risk Assessment Forum EPA/630/P-02/004A, 75 pp. (2002)

US-EPA. Persistent Bioaccumulative Toxic (PBT) Chemicals; Lowering of Reporting Thresholds for Certain PBT Chemicals; Addition of Certain PBT Chemicals; Community Right-to-Know Toxic Chemical Reporting. (<http://www.epa.gov/fedrgstr/EPA-WASTE/1999/October/Day-29/f28169.htm>). (1999)

Webster E., Robson L., Zalewski A. Level III Program. Fugacity-Based Environmental Equilibrium Partitioning Model. VERSION 2.70 (2002)

5. CASOS DE APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La metodología desarrollada, se validó a través de la aplicación de los diferentes pasos que la conforman en casos prácticos. Estos casos de aplicación comprenden por una parte las diversas posibilidades del análisis de procesos (simulación, modelado, diseño de nuevos procesos y evaluación y mejora de procesos existentes), y por otra los diferentes niveles de detalle, en los cuales puede ser evaluada la incidencia ambiental de un proceso industrial.

El caso N° 1, correspondiente al proceso de incineración de residuos sólidos urbanos, se refiere a la aplicación de la metodología, hasta la etapa de transferencia de información entre las herramientas de análisis de procesos (modelado y simulado de procesos) y aquellas de evaluación ambiental (análisis de ciclo de vida).

El objetivo en este caso, fue la integración de las variables que conforman el análisis de procesos en la evaluación ambiental hasta el nivel de inventario. En este sentido la información obtenida de los balances de masa y energía, sirvió de base para la elaboración del inventario del ciclo de vida del proceso.

Por su parte, en el caso N° 2 se presentan avances respecto a la aplicación de las etapas propuestas en el desarrollo metodológico. En este caso, además de mejoras en la interfaz de transferencia de información, se desarrolló un análisis del inventario obtenido en dos procesos de separación de sustancias (separación por medio de destilación).

Los procesos desarrollados en este caso de aplicación, se analizaron no sólo desde un punto de vista técnico (relaciones másicas y energéticas de las corrientes involucradas), sino también ambiental (comparación de consumo de materias primas y recursos naturales).

Finalmente, el caso de aplicación N° 3 describe avances significativos de la aplicación de la metodología, puesto que en él, se desarrollan la totalidad de los pasos que la conforman.

En este caso de aplicación, se realiza el perfil ambiental de un proceso de desisopentanización de Naftas, en términos de inventario, destino, efectos y daños para las áreas de protección establecidas como primordiales. Los casos de aplicación mencionados anteriormente, se describen en los apartados 5.1, 5.2, y 5.3 respectivamente.

5.1 PROCESO DE INCINERACIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS URBANOS

5.1.1 Resumen

En este caso de aplicación, se desarrolló una formulación preliminar de la metodología desarrollada en el trabajo de investigación. El objetivo principal, fue integrar las herramientas de simulación de procesos con herramientas de análisis ambiental. Para ello, se llevó a cabo, el modelado del proceso de incineración de residuos sólidos urbanos, a partir de datos de la planta incineradora de Tarragona y con la ayuda de la herramienta HysysPlant®, para simulación. En el caso del análisis ambiental, se utilizó la herramienta Team™ para la obtención del balance de cargas ambientales.

La simulación del proceso de incineración, presentó algunas dificultades de índole técnico, puesto que no fue posible simular el comportamiento de los sólidos (metales) que están presentes en las corrientes de este proceso. Sin embargo, la integración de las herramientas de análisis de procesos y ambiental, fue exitosa y los resultados obtenidos fueron el punto de partida para la transferencia de información de la metodología propuesta.

Los aspectos metodológicos desarrollados en este caso de aplicación, así como los principales resultados obtenidos, se describen en los siguientes apartados.

5.1.2 Descripción del proceso de incineración de residuos sólidos municipales.

Se escogió este proceso debido a su importancia ambiental y además porque ha sido objeto tanto de estudios por el grupo de investigación, como por diversos grupos en diferentes partes del mundo [Belevi, 2001; Kremer, 1998; Verhulst,1996; Fernández, 1992; IDAE, 1992]. Tales estudios, permiten contar con suficiente información para validar los resultados obtenidos por la simulación. El proceso de incineración seguido en la planta de Tarragona desarrolla las siguientes etapas (ver Figura 5.1):

1. Recepción, pesado y descarga.
2. Alimentación de los hornos
3. Incineración y depuración de gases.

Horno de incineración

Sala de control

Lavado de gases

Filtro de mangas

Ventilador de tiro, chimenea y analizador de gases.

4. Producción de energía

Suministro y tratamiento de agua para calderas

Caldera de vapor

Turbina alternador y condensador

Circuito de agua y vapor

Sistema eléctrico

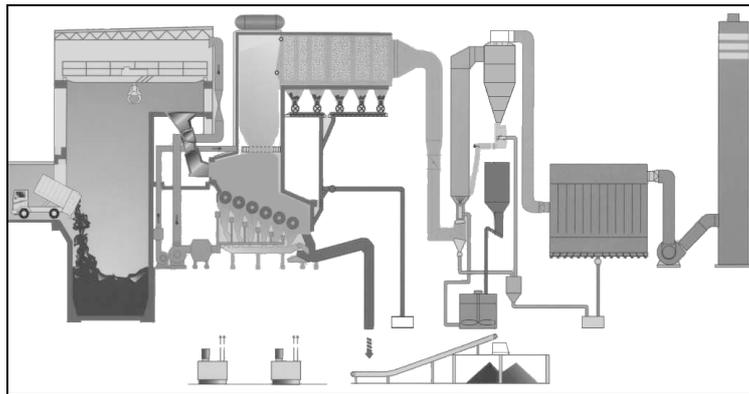


Figura 5.1. Diagrama esquemático de la Planta de incineración de residuos

5.1.3 Simulación del proceso.

A continuación se describen los aspectos más importantes en la etapa de creación del modelo del proceso de incineración. Los aspectos generales sirvieron para identificar el comportamiento de las corrientes y equipos involucrados. Así mismo, los aspectos metodológicos sirvieron como base para obtener diversos modelos, en los cuales se probaron variaciones de equipos y características:

✓ Modelo 1. Proceso de incineración aire/residuo

En este modelo, la simulación se realizó considerando como corrientes de entrada los residuos urbanos y el aire que aporta el oxígeno necesario para la combustión.

✓ Modelo 2. Proceso de incineración aire/residuo y combustible

Este modelo incorpora la adición de combustible (aproximadamente 1% de la masa a incinerar), para iniciar la combustión y hacerla más eficiente.

5.1.3.1 Aspectos Generales de la simulación del proceso.

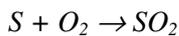
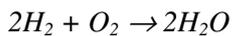
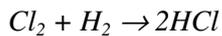
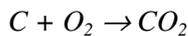
Los aspectos generales de la simulación están relacionados con la definición de las corrientes, las etapas y equipos y la construcción y posterior validación de los modelos. Los aspectos más importantes que se deben tener en cuenta son:

Corrientes. La descripción de las corrientes y su composición, permite conocer las características de los elementos involucrados. La descripción de las corrientes se basa en los siguientes aspectos:

- Características de los residuos (industrial, mixto, doméstico), y su composición.
- Componentes que pueden ser despreciados por su características.
- Determinación del tratamiento que recibe el residuo teniendo en cuenta si estos son orgánicos o inorgánicos.
- Definición de los tratamientos previos.
- Condiciones del proceso.

Cinética. Dado que se desarrolla una reacción de combustión, es necesario describir su cinética y la información que esto aporta en términos de:

- Definición de las reacciones que se desarrollan.
- Evaluación de la cinética y el mecanismo de reacción.



Termodinámica.

Dado que no existe una única ecuación para describir el comportamiento del equilibrio entre fases para cualquier tipo de mezclas y con cualquier tipo de componentes, hay que recurrir a modelos parciales que sólo pueden aplicarse a clases específicas de mezclas y de componentes. De acuerdo con la librería de la herramienta de simulación, el modelo termodinámico elegido ha sido equilibrio líquido-vapor ideal, calculando las presiones de vapor de los componentes a partir de la conocida ecuación de Antoine

Condiciones de operación.

- Determinación de las condiciones de operación.
- Generación de reacciones secundarias. (formación de contaminantes tales como cenizas y sales metálicas)

La caracterización de la corriente de residuo se basa en los datos de un residuo urbano típico

$$T=298 \text{ K}$$

$$P=100 \text{ kPa}$$

A partir de las reacciones de combustión que tienen lugar en el horno es posible calcular la cantidad de oxígeno necesario para que estas se desarrollen completamente, y consecuentemente la cantidad estequiométrica de aire que es necesario alimentar.

Diagramas de flujo del proceso.

- Definición del diagrama del proceso de la planta a simular.
- Descripción de las especificaciones de los equipos para un correcto dimensionamiento.
- Determinación de las condiciones de operación de cada equipo: temperatura y presión.

Variables. Determinación de las variables fijas y las variables a calcular. Cuales son dependientes y cuales independientes.

Estrategias de control. Planteamiento de las estrategias de control del proceso, a partir del entendimiento del entorno dinámico de la simulación.

5.1.3.2 Aspectos metodológicos de la simulación del proceso de incineración de RSU.

Para desarrollar la simulación, y de acuerdo con la literatura revisada, el proceso de incineración, se definió como tres subsistemas: *combustión* (generación de vapor), *recuperación de energía* (utilización del vapor) y *purificación de gases*. La Figura 5.2 presenta los diferentes subsistema del proceso de incineración.

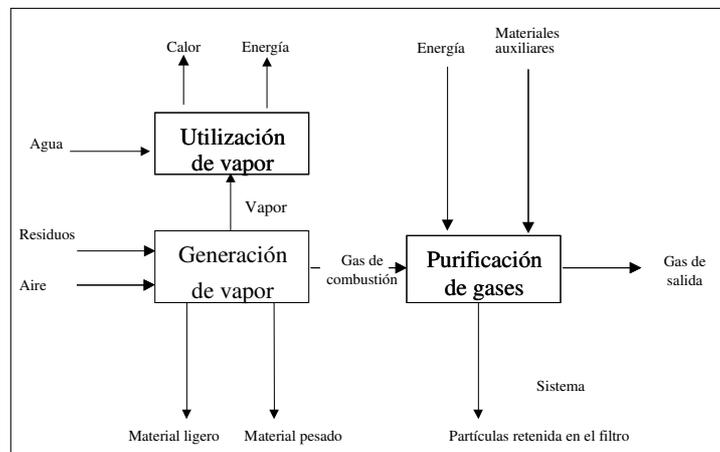


Figura 5.2. Subsistemas del proceso de incineración

Generación de vapor. El subsistema de generación de vapor, consiste en: 1) un reactor de combustión, donde tiene lugar el proceso de combustión a partir de la entrada de residuos, aire, combustible y agua de enfriamiento, 2) un intercambiador de calor, para estabilizar el vapor generado a alta presión, y 3) un precalentador de aire, que acondiciona el aire antes de entrar en el horno. De este subsistema las corrientes de salida son: a) vapor, b) material pesado

(cenizas pesadas y residuos inertes), c) material pesado (cenizas volantes) y, d) gases de combustión, tal como se muestra en el diagrama de la Figura 5.1.

Generación de energía. El subsistema consiste en: 1) una turbina en la que a partir de una expansión del vapor, se obtiene trabajo eléctrico (*poder energético*), 2) un intercambiador de calor en el que se enfría el vapor expandido antes de la entrada al condensador, 3) un condensador en el que tiene lugar el cambio de fase, y 4) finalmente, una bomba que permite mantener el agua a la misma presión del vapor.

Purificación de gases. En general este subsistema cuenta con: 1) un reactor rotativo semiseco que contiene un atomizador de lechada de cal, lo que garantiza el contacto gas-lechada, 2) un sistema de inyección de carbón activo para mejorar la eficacia de eliminación de compuestos orgánicos y metales pesados y, 3) un filtro de mangas que operan al 100% de eficacia con las celdas restantes. El tejido filtrante puede soportar altas temperaturas en funcionamiento continuo.

En el caso actual, sólo se ha considerado en la limpieza de gases el filtro de mangas, puesto que a partir de aquí, la contribución a las cargas ambientales se reduce significativamente. Las corrientes de salida de este subsistema son: a) gas de salida y, b) partículas retenidas en el filtro.

Caracterización de la corriente del residuo. El caudal del residuo alimentado a la incineradora es de 9600 kg/h, lo que corresponde a la capacidad por línea de la planta de incineración. Así mismo, su composición también corresponde a la composición típica⁵. La Figura 5.3, presenta la composición general del residuo urbano recibido en la planta de Tarragona, y el que fue utilizado para la composición de la corriente de entrada en la creación del modelo.

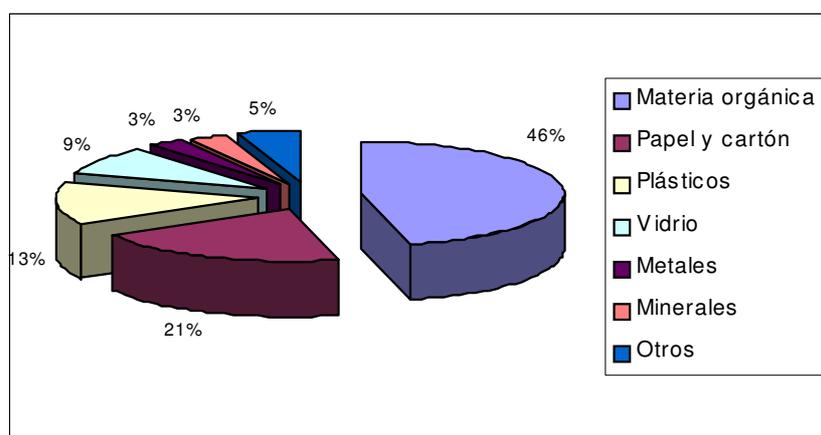


Figura 5.3. Composición del residuo urbano

La corriente de alimentación en la simulación, parte de la composición general del residuo que llega a la planta. La Tabla 5.1 presenta la composición de dicha corriente en fracción másica.

⁵ Datos suministrados por SIRUSA, 1.999.

Tabla 5.1. Composición de la corriente de entrada al reactor de combustión

Componente	Fración Másica (kg/kg totales)	Componente	Fración Másica (kg/kg totales)
Cenizas	1.95E-01	F	2.46E-04
H ₂ O	2.76E-01	H	4.85E-02
Br	2.88E-04	Hg	1.00E-07
C	2.59E-01	N	1.41E-02
Cd	5.20E-06	O	1.90E-01
Cl	1.31E-02	Pb	2.12E-04
Cr	1.27E-04	S	1.93E-03
Cu	6.70E-04	Zn	5.70E-04

Fuente: Kremer T, 1998; Belevi & Moench, 2000

Condiciones de operación. Las condiciones de operación de las diferentes corrientes involucradas en el proceso, se presenta en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2. Condiciones de operación en la simulación del proceso de incineración.

Propiedad	Corrientes de proceso						
	Residuo	Aire	Material pesado	Material ligero	Gases sucios	Partículas retenidas filtro	Gas de salida
Temperatura (°C)	2.5E+01	1.0E+02	1.8E+02	1.8E+02	2.7E+02	2.7E+02	2.7E+02
Presión (kPa)	1.0E+02	1.0E+02	1.0E+02	1.0E+02	1.0E+02	9.8E+01	9.8E+01
Flujo molar (kgmol/h)	6.7E+02	1.3E+03	8.8E+00	1.9E-01	1.6E+03	8.1E-01	1.6E+03
Flujo másico (kg/h)	9.6E+03	3.7E+04	1.7E+03	3.8E+01	4.5E+04	1.6E+02	4.5E+04
Flujo de líquido (m ³ /h)	1.4E+01	4.2E+01	8.6E-01	1.9E+02	5.3E+01	7.7E+02	5.3E+01
Flujo de calor (kJ/h)	-4.3E+07	2.8E+06	1.6E+06	3.5E+04	-1.6E+08	2.3E+05	-1.6E+08

En la tabla 5.2, se describen las propiedades de las corrientes de proceso que corresponden a las corrientes descritas en el diagrama de la Figura 5.2 y que han sido utilizadas para la simulación del proceso que son simuladas. Las variables temperatura, presión y flujo másico, permiten la predicción de variables tales como el flujo de líquido por corriente y su calor específico, el cual en algunos casos puede ser negativo.

5.1.3.3 Resultados de la simulación

Se observó la dificultad de simular el comportamiento de los metales pesados porque no es factible definir sólidos en la herramienta utilizada. Esta dificultad se superó con la utilización de sistemas de separación, aplicando coeficientes de transferencia o arrastre en las corrientes que presentaban sólidos en su composición (lo que implicó forzar la simulación). El modelo fue utilizado para la obtención de datos de proceso, a partir de la información de entrada.

Diagrama de flujo del proceso.

El primer resultado de la simulación es el diagrama de flujo del proceso (PDF) de la planta de incineración, ya que este describe gráficamente el proceso en términos de las corrientes y las etapas que se desarrollan (Figura 5.4).

En la tabla se presenta la composición de las corrientes que forman parte del proceso de incineración, sin embargo, en ella no se referencia la corriente “gas sucio”, puesto que dicha corriente es interna (Sub proceso de purificación de gases), y no tiene incidencia en las posibles cargas generadas por el proceso.

5.1.4. Transferencia de información

La transferencia de información tal como se ha comentado anteriormente, se desarrolló en dos direcciones: desde la herramienta de simulación hacia Excel, y a su vez, de Excel hacia la herramienta de análisis ambiental.

Se definió la estructura de transferencia, de manera que la información generada y necesaria por las herramientas estuviese en la misma interfaz. A continuación, se describen los elementos más importantes de la transferencia de información, y los aspectos tenidos en cuenta para su desarrollo.

5.1.4.1 Importación y exportación de datos entre Excel y Hysys Plant®.

El procedimiento de importación/exportación consiste en capturar los datos de la simulación realizada en Hysys Plant® y exportarlos a una hoja de Excel donde se representan las diferentes salidas en las etapas del proceso simulado. En este estado de la transferencia, se pueden hacer cambios en la hoja de Excel en aspectos tales como composición y/o condiciones de operación, y a través de la opción “volcado a Hysys” simular otra vez el proceso con las nuevas condiciones de operación. [Herrera et al, 2002a].

La Figura 5.5, representa la transferencia de información entre la simulación y la hoja de cálculo. Posteriormente, la Figura 5.5 presenta la interfaz desarrollada para este caso.

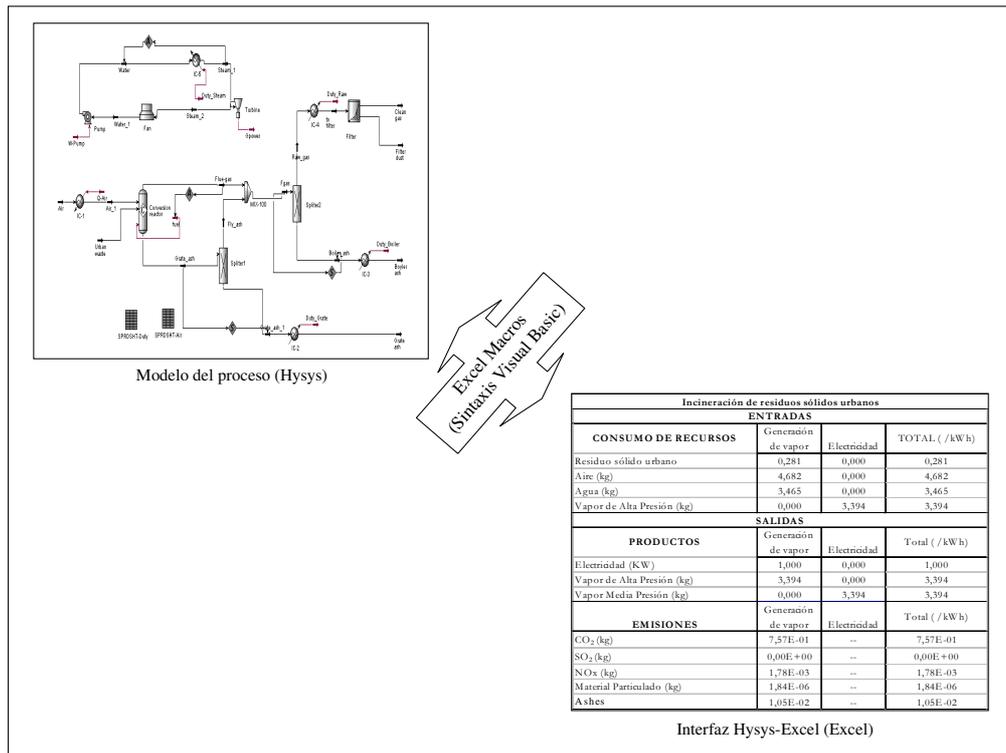


Figura 5.5. Diagrama esquemático de la transferencia de información Hysys-Excel

5.1.4.2 Estructura de la interconexión Excel - TEAM™.

Se definió la estructura de interconexión entre Team y Excel, de manera que la información de TEAM™, estuviese en la misma interfaz con la información de la herramienta de simulación:

- ✓ Creación de una hoja de cálculo para los módulos que configuran el proceso. Estas hojas de Excel están vinculadas al archivo de Excel creado por la macro, de esta manera si se realiza algún cambio en la simulación se modifica automáticamente. Importación del archivo TEAM, función “*Read Excel Modules*”, o con la función “*Update Excel Module*”, cuando el módulo ya está creado y sólo se pretende actualizar los valores.
- ✓ Ecobalances correspondientes. El resultado de estos ecobalances se exporta a partir de la función “*Export*” como archivo de Excel.

El procedimiento descrito anteriormente se presenta gráficamente en la Figura 5.6.

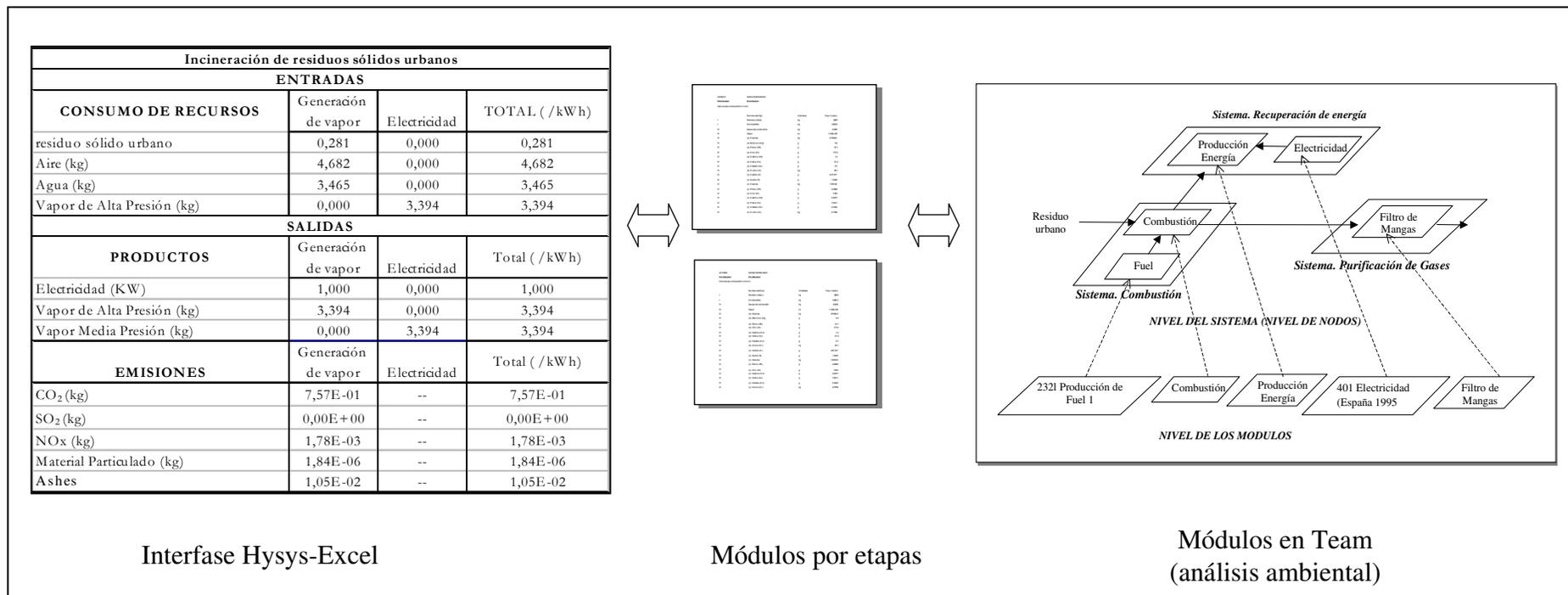


Figura 5.6. Estructura interconexión Excel - TEAM™.

Resultados de la interconexión.

Como resultado de la interconexión se obtuvo la interfaz en Excel, a través de la cual se obtuvo la información del proceso, necesaria para el análisis ambiental. La interfaz de transferencia se presenta en la Figura 5.7.

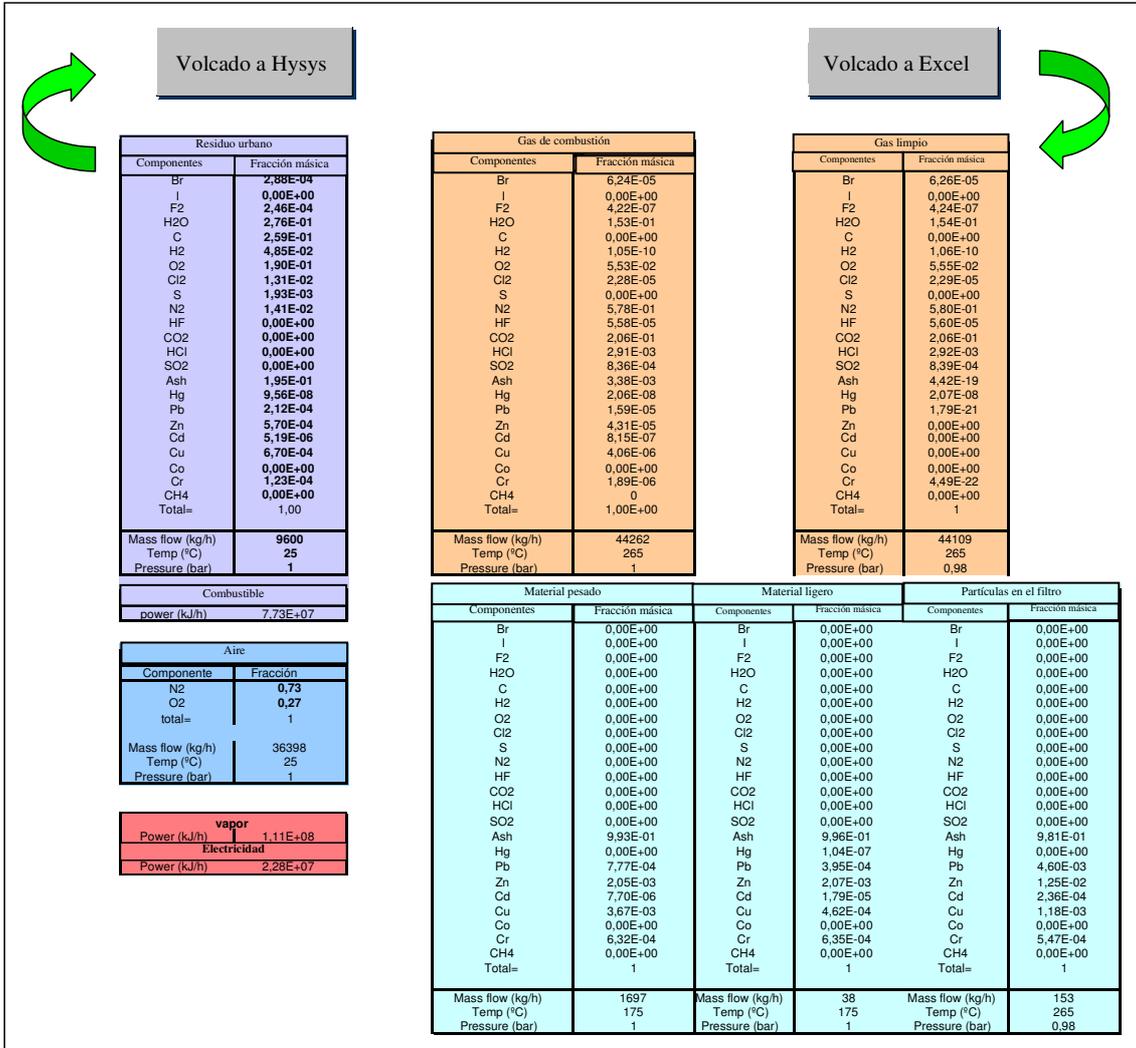


Figura 5.7. Interfaz de transferencia proceso incineración de residuos.

La interfaz de transferencia, es la herramienta que permite realizar cambios en las características del proceso, y evaluar en tiempo real su incidencia en el análisis ambiental. El procedimiento inicia con la obtención de los resultados de la simulación, los cuales son enviados a la hoja de cálculo a través de la opción “volcado a Excel”. Una vez los datos se encuentran en la hoja de cálculo, estos pueden ser analizados allí mismo, o transferidos a una hoja diferente, donde pueden ser modificados.

Una vez la información ha sido analizada, los datos técnicos pueden ser cambiados y enviados nuevamente al simulador por medio de la opción “Volcado a Hysys”, donde inicia nuevamente

el ciclo de obtención de los resultados de la nueva simulación, para su validación desde el punto de vista técnico.

5.1.5. Análisis ambiental del proceso de incineración.

A continuación se presenta la metodología seguida para la aplicación de la herramienta de análisis ambiental en dicho proceso. El desarrollo metodológico se basó en la definición del sistema y la descripción de entradas y salidas.

5.1.5.1 Definición del sistema.

Para analizar el proceso de incineración con la herramienta TEAM™, se dividió el proceso de incineración en tres subsistemas (de la misma forma que en la simulación) y se creó un sistema para cada una de éstas.

La combustión ó generación de vapor (sistema 1), recuperación de energía ó utilización del vapor (sistema 2) y limpieza de gases (sistema 3). Cada sistema, contiene en forma de nodos los distintos equipos o etapas que constituyen el proceso de incineración.

Combustión. En esta etapa, se incluyeron el horno o cámara de combustión, con el nombre de módulo “combustor”; además del fuel-oil necesario para calentar la cámara antes de que se produzca la incineración.

Recuperación de energía. Este bloque corresponde al ciclo de producción de energía eléctrica a partir del vapor aprovechado del calor que se desprende durante el proceso de incineración. Todo el ciclo está contenido en el módulo “Producción Energía”, importado desde las hojas de Excel. Además en este bloque se ha tenido en cuenta la energía eléctrica que consume la bomba que forma parte del ciclo.

Purificación de gases. Este bloque corresponde al sistema de limpieza de gases, y consta de un sistema conformado por el nodo creado “filtro de mangas”. La información de este sistema, se obtiene partir de una hoja de Excel.

En la Figura 5.8, se puede observar el diagrama que representa el sistema creado en TEAM™, con los diferentes nodos y flujos.

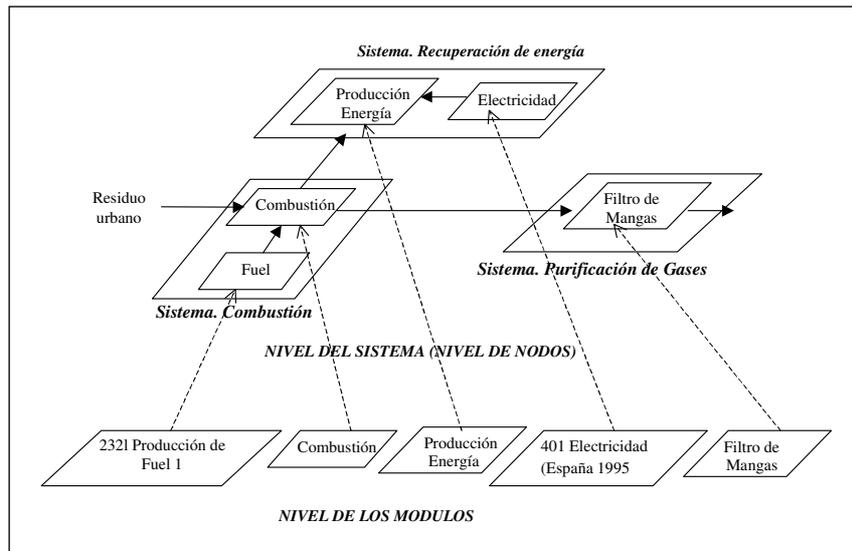


Figura 5.8. Módulos del proceso de incineración para el sistema creado en TEAM™.

5.1.5.2 Descripción de entradas y salidas al proceso.

Al igual que en la simulación del proceso de incineración con Hysys Plant®, en el análisis ambiental, es necesario partir de la composición de entrada del residuo a incinerar, para lo cual se tomó la composición usada en la simulación.

La información de entradas y salidas de los módulos que en TEAM™ representan las etapas del proceso, fue importada desde una hoja de Excel donde se encontraban los datos que había arrojado la simulación. Este procedimiento, se realizó a través de la función "Read Excel Modules". Por su parte, la actualización de la información en los módulos de TEAM™, se realizó con la función "Update Text Modules".

Como se describió en el apartado de definición del sistema, la aplicación de TEAM™ en el proceso de incineración consta de un sistema para cada uno de las etapas del proceso en estudio (Generación de vapor, utilización del vapor y lavado de gases). Cada sistema contiene en forma de nodos derivados los diferentes equipos o procesos de la simulación con Hysys Plant®.

Módulos del análisis ambiental. Cada una de las etapas en el proceso de incineración cuenta con un módulo creado en Excel. La información del módulo es obtenida de la simulación. Cada uno de estas hojas de Excel contiene los flujos de entrada y de salida de cada módulo y su valor correspondiente.

Una vez creadas las hojas en Excel se guardan como ficheros de texto y se importan. Para importar estos módulos se utiliza la función "Read Excel Modules". La Figura 5.9 presenta

a modo de ejemplo, el módulo creado para el combustor, dentro del sub- sistema generación de vapor.

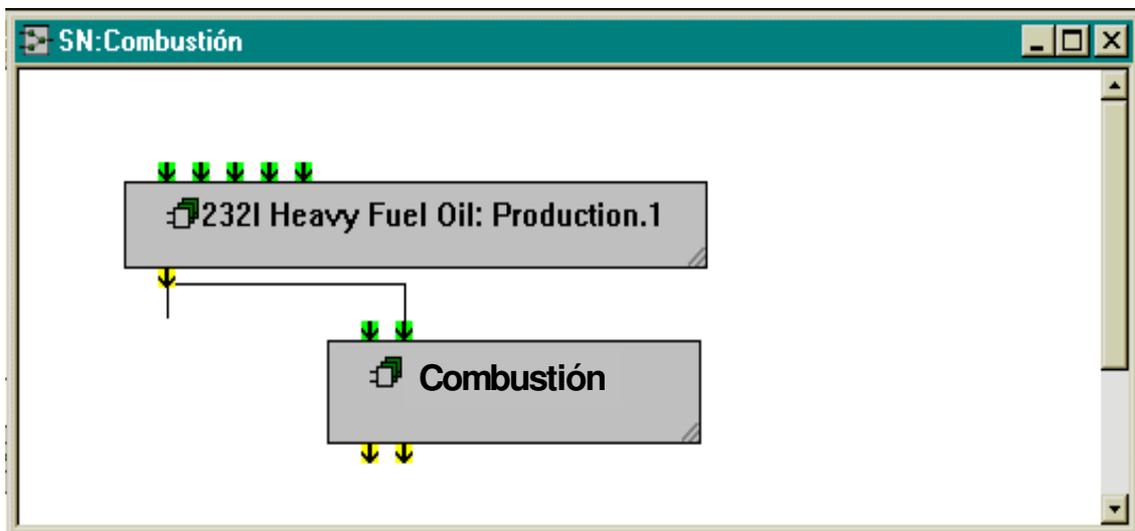


Figura 5.9. Módulo Combustor creado con el software Team™

Sistema creado en TEAM™. El sistema creado en la herramienta de análisis ambiental, se basa en los tres subsistemas simulados, es decir, *combustión, recuperación de energía y purificación de gases*. El sistema general, se muestra en la Figura 5.10.

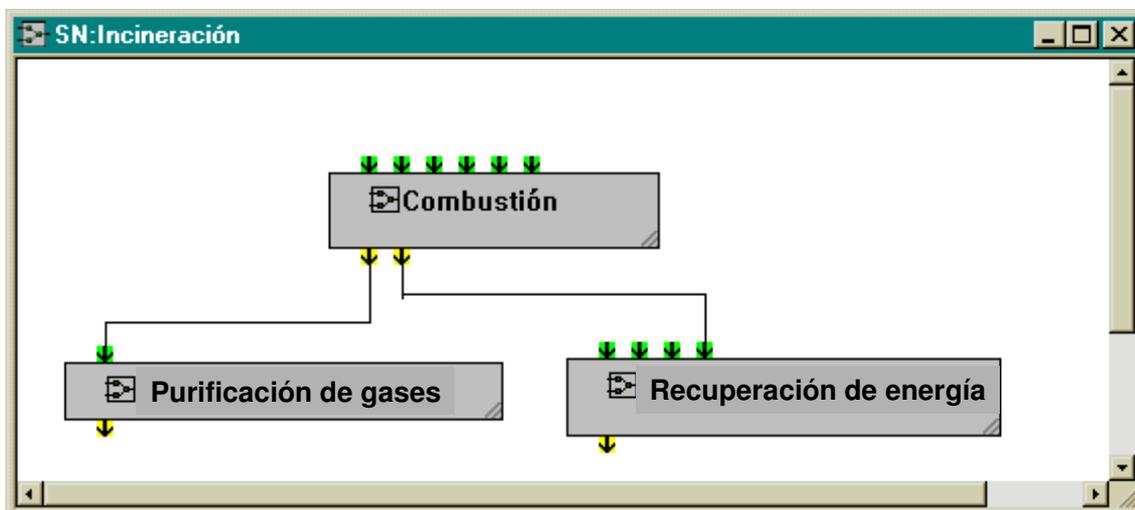


Figura 5.10. Sistema del proceso de incineración con la herramienta TEAM™.

Así mismo, se crearon tres subsistemas que contienen los nodos y sus respectivas conexiones. Estos nodos se presentan a continuación.

Nodos y conexión entre los subsistemas. Los nodos correspondientes al combustor, al filtro y a la producción de energía se han creado como nodos derivados, importados a TEAM™.

Los nodos correspondientes a la producción de combustible y electricidad -que son necesarios para el funcionamiento de los sub-sistemas combustión y recuperación de energía respectivamente-, fueron creados a partir de módulos existentes en la herramienta. En este caso, los módulos ya existían en la base de datos de TEAM™.

Una vez creados todos los nodos, se procede a la conexión entre ellos a partir de los flujos de entrada y de salida. Después de la conexión, se realizó la compilación para cada uno de los subsistemas.

5.1.5.3 Balance de cargas ambientales producidas por el proceso de incineración (Eco-balance)

Una vez insertados los datos en el sistema creado para el proceso de incineración, se ha realizado un ecobalance ó cálculo del total de las cargas ambientales del proceso.

La unidad funcional para la realización del balance de cargas, puede ser tanto el residuo de entrada como la energía generada, en este caso particular, se han realizado balances tomando como unidad funcional inicial 1000 MJ de “poder energético”, que equivale a 9600 kg de residuo. Resultados del balance de cargas obtenido, se presenta en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4. Balance de cargas ambientales del proceso de incineración

Artículo	Unidad*	Cargas ambientales por etapa de proceso			Carga total
		Combustión	Purificación de gases	Generación de energía	Incineración
(r) Bario (Sulfatos)	kg	5,23E-02	-	6,20E-04	5,29E-02
(r) Gas Natural	kg	5,15E+01	-	5,93E-01	5,21E+05
(r) Zinc	kg	3,72E-07	-	4,41E-09	3,76E-07
Electricidad	MJ	2,41E+02	-	-	2,41E+02
Residuos	kg	9,60E+00	-	-	9,60E+00
Agua (total)	L	5,72E+03	-	7,17E+01	5,79E+03
Energía generada	MJ	-	-	1,00E+03	1,00E+03
(a) Acetaldehido	kg	1,12E-06	--	8,19E-06	9,31E-06
(a) Arsenico	kg	3,33E-05	--	5,13E-06	3,84E-05
(a) Cenizas (volátiles)	kg	1,04E-02	--	3,96E-04	1,08E+02
(a) Benceno	kg	1,04E-02	--	3,96E-04	1,08E+02
(a) Cadmio	kg	7,83E-04	--	2,23E-06	7,85E-04
(a) Calcio	kg	2,99E-04	--	2,26E-03	2,56E-03
(a) Dióxido de carbono	kg	4,03E+02	--	2,80E+01	4,31E+02
(a) Monóxido de carbono	kg	2,25E-01	--	2,28E-01	4,53E-01
(a) Tetracl de carbono	kg	1,24E-08	--	1,47E-10	1,25E-08
(a) Cromo	kg	2,00E-02	-	-	2,00E-02
(a) Cobalto	kg	8,31E-05	--	5,48E-06	8,86E-05
(a) Cobre	kg	1,82E-02	--	7,92E-06	1,82E-02
(a) Mercurio	kg	8,54E-06	--	5,93E-07	9,13E-06
(a) NOx	kg	1,11E-04	--	5,71E-06	1,16E-04
(a) Oxidos de Sulfuro	kg	2,77E+00	--	1,60E-01	2,93E+00
(s) Cenizas (sólidas)	kg	1,76E+03	1,41E+02	--	1,90E+03
(s) Cadmio	kg	1,36E-02	3,39E-02	1,43E-12	4,76E-02
(s) Calcio	kg	2,67E-03	--	3,16E-05	2,70E-03
(s) Cobre	kg	6,50E+00	1,69E-01	7,26E-12	6,67E+00
(s) Lead	kg	1,37E+00	6,60E-01	3,32E-11	2,03E+00
(w) Arsenico	kg	5,76E-05	--	3,05E-07	5,79E-05
(w) DBO5	kg	3,14E-03	--	5,25E-06	3,14E-03
(w) Cadmio	kg	4,73E-05	--	9,64E-08	4,74E-05
(w) DQO	kg	5,99E-02	--	8,44E-05	6,00E-02

a:aire, s:suelo, w: agua, r: residuos

* Unidades referidas a la unidad funcional (1000 MJ)

De acuerdo con la información presentada en la Tabla 5.4, los recursos naturales consumidos en mayor proporción, son agua y gas natural en este orden. En términos de las emisiones, las cenizas (sólidas y volátiles) conforman la carga ambiental mayoritariamente identificada. A

continuación, en la discusión de los resultados del caso de aplicación, se considerará más ampliamente, esta información.

5.1.6. Discusión de los resultados

La discusión de los resultados obtenidos en el primer caso de aplicación, se orientará en tres áreas específicas. Inicialmente se discutirán los resultados de la simulación en término de los aspectos técnicos del proceso. La segunda parte de la discusión se centrará en la transferencia de información, para finalmente repasar los resultados obtenidos en el análisis ambiental del proceso estudiado.

5.1.6.1 Resultados de la simulación del proceso de incineración

Desde el punto de vista de la simulación, ha sido posible modelizar un proceso de mucho interés desde el punto de vista técnico, puesto que la incineración de residuos, es una práctica cada vez más utilizada no sólo en el ámbito urbano, sino también industrial. En este sentido, la posibilidad de contar con una herramienta que permita evaluar diferentes características de este proceso, ayudará a la elección de mejores alternativas de incineración.

Ahora bien, el hecho de utilizar coeficientes de transferencia en la simulación, implica que los modelos obtenidos no representan el comportamiento exacto del proceso desde el punto de vista fisicoquímico y termodinámico, puesto que la respuesta del sistema no depende de las relaciones entre sus variables. No obstante, esta opción permite obtener información muy útil en la posterior evaluación ambiental del proceso, que finalmente era el objetivo más relevante de este caso de estudio.

Un aspecto específico de la simulación, el cual es muy importante en el desarrollo de futuras mejoras a la simulación del proceso, es que la operación de incineración contenida en la herramienta de simulación utilizada, no se ejecuta, por lo tanto, se ha asimilado dicha operación unitaria a un reactor de conversión.

Así mismo, en lo concerniente a la simulación del proceso, la herramienta utilizada no permite desarrollar el entorno dinámico debido a la existencia de componentes en estado sólido. Este hecho significó la imposibilidad de realizar el control del proceso. Sin embargo, es necesario aclarar que dicha actividad no formaba parte de los objetivos buscados en este caso de aplicación.

5.1.6.2 Integración de las herramientas (transferencia)

En términos generales, la integración de las herramientas se basa en la posibilidad de transferir información del proceso entre ellas. En este caso específico, se transfirió a TEAM™ información generada en la simulación con Hysys Plant® del proceso de incineración, consiguiéndose así, el objetivo principal del caso en estudio.

Por otra parte, la posibilidad de evaluar cambios en las características técnicas del proceso – corrientes o condiciones de operación-, en tiempo real, no sólo en la herramienta de simulación, sino también, en el análisis ambiental, abre nuevas posibilidades de integrar las variables ambientales en el análisis de procesos, de manera que se tengan en cuenta, las posibles cargas ambientales de un proceso, aún cuando este se encuentre en fase de desarrollo.

5.1.6.3 Resultados del análisis ambiental del proceso de incineración.

Desde el punto de vista del análisis ambiental del proceso, es posible orientar la discusión en dos vías, por un lado con la actual aplicación, se ha confirmado cual es la etapa más significativa en términos de cargas ambientales (de acuerdo con la Tabla 5.4 es la combustión), y por otro lado, es posible plantear mejoras en el proceso simulado a partir de cambios en las características del proceso -condiciones de operación, flujos de materia y composición de las corrientes-.

En términos generales, el proceso obtención de energía a partir de incineración de residuos sólidos urbanos, presenta menores consumos de combustibles fósiles, comparado con los procesos normales de generación energética, debido a la importante disminución en el uso de combustibles al utilizar los residuos como fuente energética.

Por otra parte y también con base en el eco-balance, se observa que existe una alta generación de cenizas (aproximadamente 2100kg / MJ producido), las cuales llegan a ser la carga ambiental mayoritariamente presente, y que son atribuibles a la mayor proporción de sólidos en el material utilizado como combustible.

En términos de las etapas del proceso de incineración, la etapa de combustión es la que presenta una mayor generación de cenizas, de igual forma, es en esta etapa, donde se observa la generación de óxidos de diferentes sustancias. Los óxidos de carbono, se encuentran en mayor proporción (431kg/ MJ producido), comparados con los óxidos de Azufre (3kg/ MJ producido) y los de Nitrógeno que podrían llegar a ser despreciables, comparados con otros procesos de combustión.

Lo relativo a los metales pesados ha sido discutido ya en la parte inicial de este apartado, y desde el punto de vista del análisis ambiental, sólo es preciso aclarar que se mantienen en concordancia con los coeficientes de transferencia aplicados en la creación del modelo.

Con base en lo anterior, es posible simular nuevamente el proceso donde dichos cambios repercuten en diferentes áreas tales como cambios en equipos, composición de los residuos y relaciones alimento/aire, de manera que se disminuyan las cargas ambientales del proceso.

5.2 SISTEMAS DE SEPARACIÓN (PROPANO-ISOPROPANO; ETANOL-AGUA)

5.2.1 Resumen del caso de aplicación.

En este ejemplo se describe la aplicación de la metodología de integración de análisis ambiental y de procesos, en sistemas de separación por destilación. La metodología, se aplicó a dos mezclas frecuentemente encontradas en la industria de procesos: 1) proceso hipotético de separación de Propano y Propileno, proveniente de una corriente de la refinación de petróleo, y 2) proceso real de destilación de Alcohol (mezcla Etanol-Agua), realizado en una planta del laboratorio de procesos de fabricación del departamento de Ingeniería Química de la Universitat Rovira i Virgili.

Con esta aplicación, el objetivo fue analizar desde el punto de vista técnico y ambiental, el sistema de separación por destilación, y plantear mejoras a través de alternativas viables. A su vez, el alcance de la aplicación, se centró en la obtención de las cargas ambientales y su comparación para las alternativas o variaciones en el proceso evaluado.

Los principales resultados de esta aplicación van desde mejoras en la transferencia de información entre herramientas de análisis de procesos y evaluación ambiental (interfaz desarrollada con el caso de incineración), hasta el desarrollo de técnicas de evaluación y comparación de los procesos en estudio.

En términos de la transferencia, un resultado palpable es la **interfaz completa de transferencia**, la cual presenta mejoras significativas con respecto a la presentada en el proceso de incineración-y que permite obtener una **memoria de cálculo** completa de cada uno de los procesos analizados.

Por otra parte, las comparaciones entre alternativas diferentes de proceso, se presentan en forma gráfica, para facilitar su interpretación.

En el caso de la mezcla Propano-Isopropano, toda la información fue tomada de la literatura, por lo que no fue posible validar los resultados obtenidos. Por el contrario, la separación de la mezcla Etanol-Agua, correspondió al proceso real desarrollado en el equipo de destilación (o planta piloto) del laboratorio de procesos de fabricación, y los datos técnicos obtenidos por la simulación, fueron validados con datos reales.

5.2.2. Desarrollo metodológico

Para la aplicación de la integración del análisis de procesos y la evaluación ambiental en el caso actual, se desarrollaron cuatro fases de la metodología propuesta por Herrera & Kulay [Herrera et al 2002b). Esta metodología se basa en el desarrollo de cinco etapas, tal como se presenta en la Figura 5.11.

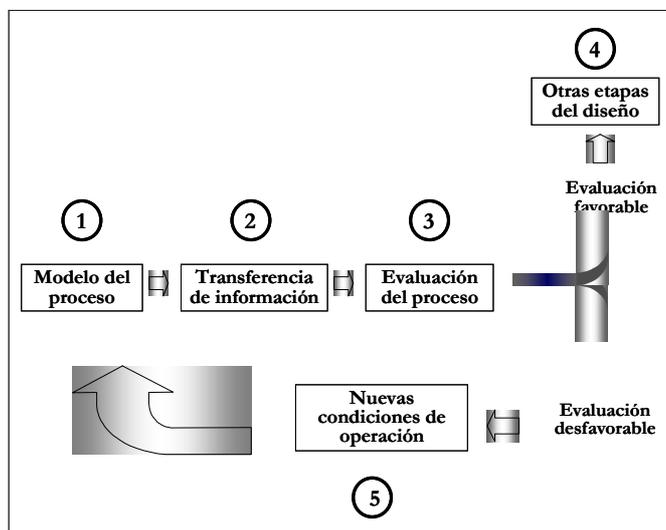


Figura 5.11. Metodología para la evaluación ambiental en el análisis de procesos

5.2.2.1 Generación del modelo del proceso (Simulación)

La simulación es el primer paso del desarrollo metodológico seguido, el objetivo de esta fase es generar un modelo del proceso, de manera que se obtenga información técnica de las diferentes corrientes y etapas.

5.2.2.2 Transferencia de información

La transferencia de información permite utilizar de forma ágil y recíproca la información del proceso evaluado generada con la herramienta de simulación. La interfaz es una herramienta de transferencia de información útil que permite comparar en tiempo real variaciones en las condiciones de operación y a partir de ellas, evaluar su incidencia ambiental.

5.2.2.3 Evaluación del sistema en estudio (viabilidad técnica y ambiental).

El último paso del actual desarrollo metodológico consiste en la evaluación de la viabilidad técnica y ambiental del proceso. En esta fase de la metodología, se compara no sólo los aspectos técnicos más relevantes del proceso, sino también su incidencia ambiental. Con base en dicha información, es posible determinar nuevas condiciones de operación que permitan obtener configuraciones de los procesos (escenarios), viables desde un punto de vista técnico y ambiental.

5.2.3. Resultados de la aplicación de la metodología de integración en sistemas de separación.

Los resultados de este caso de aplicación corresponden a la metodología seguida. Inicialmente se presenta una descripción del sistema de separación. El siguiente apartado consiste en la descripción de la información necesaria para la creación de los modelos. Con base en esta información, se genera la interfaz de transferencia, con la que se obtiene la memoria de cálculo. Finalmente, se presenta la evaluación técnica y ambiental con base en nuevos escenarios o alternativas al proceso original.

5.2.3.1 Descripción del sistema de separación y construcción de modelos.

El sistema de separación objeto de este caso de aplicación se simplificó suponiendo tres etapas de proceso: 1) generación de mezcla, 2) destilación y 3) generación de energía, tal como se muestra en la Figura 5.12.

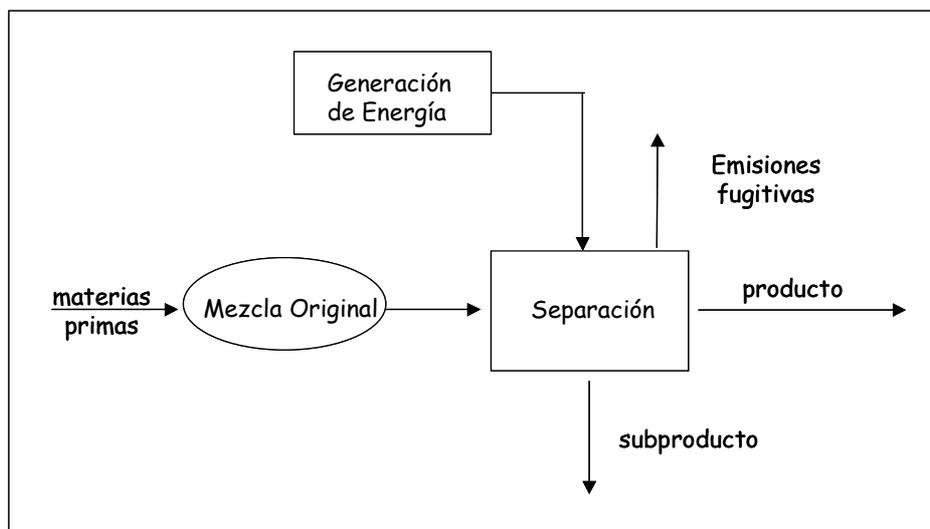


Figura 5.12. Simplificación del proceso de separación para su análisis.

La generación de la mezcla representa los procesos desarrollados para la obtención de la corriente de entrada al sistema de separación. De acuerdo con la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, esta etapa puede ser considerada parte del proceso dependiendo de la ubicación

de las barreras del sistema. La etapa siguiente, separación por destilación, consiste en la obtención del producto y es en esta etapa donde se presentan los mayores requerimientos de agua y energía del sistema. La última etapa considerada en el análisis, es la generación energética, etapa que consiste en la obtención de la energía necesaria (calor y electricidad) para llevar a cabo la separación.

Simulación del proceso de separación.

Los aspectos que se mencionan a continuación, han sido tenidos en cuenta para la obtención del modelo a través de la simulación.

- ✓ La columna de destilación dispone de una serie de platos teóricos, con un único punto de alimentación. Todos los equipos se prueban a diferentes condiciones de operación.
- ✓ Se han fijados diferentes fracciones másicas, las cuales a su vez fueron probadas para las diferentes condiciones de operación.
- ✓ Se probaron diversos sistemas de condensación, desde un condensador convencional hasta un conjunto compuesto por un intercambiador de calor (E) y un separador líquido-vapor (S).
- ✓ Los sistemas de intercambio de calor (E) se componen de una unidad del tipo tubo-carcasa, que operan con agua o aire entre 25 y 30°C como agentes de condensación.
- ✓ Las variaciones de temperatura se han establecido con base en las condiciones climáticas de la zona donde se desarrolla el estudio (Tarragona).
- ✓ El sistema se completa con separadores de gases (TEE) cuya función es la de representar emisiones fugitivas y pérdidas residuales que no se pueden medir durante el proceso.
- ✓ La solución líquida separada de la mezcla original, es enviada por diferencia de presión a tanques de almacenamiento (V), desde donde pueden ser enviadas a diferentes zonas del sistema, todo esto con ayuda de energía eléctrica.
- ✓ El agua usada en la condensación, originariamente almacenada a presión atmosférica en el tanque, es transferida por la bomba eléctrica a las diferentes unidades.

A continuación se describen los sistemas de separación que han sido analizados. Esta descripción, se realiza en términos de sus características técnicas, y las variables de operación tenidas en cuenta para la creación de los modelos. Inicialmente se describe el proceso Propano-Iso-propano, y finalmente el de la mezcla Etanol-Agua

Separación Propano-Propileno.

Este proceso corresponde a la producción de propileno líquido a partir de intermediarios del refinamiento del petróleo. Se tomó como referencia una mezcla $C_3H_6-C_3H_8$ cuyas variables de proceso - presión, temperatura, flujo y composición - se obtuvieron de información consultada

en diversas fuentes bibliográficas. La Tabla 5.5, resume los principales datos técnicos utilizados para la creación del modelo.

Tabla 5.5. Condiciones de operación del proceso de separación de Propileno.

<i>Propiedad</i>	<i>Corrientes de proceso</i>			
	<i>Alimento</i>	<i>Propileno líquido</i>	<i>Propileno vapor</i>	<i>Propano</i>
Temperatura (°C)	3.94E+01	3.64E+01	3.64E+01	4.95E+01
Presión (kPa)	5.00E+03	1.50E+03	1.50E+03	6.00E+03
Flujo másico (kg/h)	5.83E+04	1.51E+04	7.39E+03	3.85E+05
Flujo de líquido (m³/h)	1.14E+02	2.91E+01	1.42E+01	7.42E+02

El proceso original que fue simulado, se ha considerado como una etapa más de una refinería de petróleo, por lo tanto, los requerimientos energéticos son provistos por el mismo complejo (vapor y electricidad en refinería). Esta alternativa fue comparada con otras de generación de energía.

Separación Etanol-Agua

El sistema consiste en un dispositivo de destilación (columna empacada) completamente automatizado. Donde la preparación de la solución del alimento, salidas de producto y subproductos funcionan en continuo. Las variables de proceso de la mezcla de referencia *Etanol-agua* se establecieron a través de pruebas de laboratorio.

Tabla 5.6. Condiciones de operación del proceso de separación de Etanol.

<i>Propiedad</i>	<i>Corrientes de proceso</i>				
	<i>Solución 1</i>	<i>Solución 2</i>	<i>Solución 3</i>	<i>alimento</i>	<i>Etanol</i>
Temperatura (°C)	2.00E+01	2.00E+01	2.00E+01	5.50E+01	7.88E+01
Presión (kPa)	1.01E+02	1.50E+03	1.01E+02	1.50E+03	6.00E+03
Flujo másico (kg/h)	2.00E+02	1.51E+04	7.39E+03	7.39E+03	3.85E+05
Flujo de líquido (m³/h)	2.06E-01	2.91E+01	1.42E+01	1.42E+01	7.42E+02

El análisis del proceso de obtención de Etanol, se basa en el estudio de tres escenarios de producción de energía, de manera que se elija la alternativa o escenario que presente la mayor viabilidad no sólo técnica, sino ambiental.

5.2.3.2 Modelos de los procesos de separación.

Los modelos de los procesos estudiados han sido generados por medio de la herramienta de simulación HysysPlant®. Con dicha herramienta, además de los modelos, se han desarrollado los diagramas de flujo y modelos en estado estacionario, que representan en un alto grado de aproximación, la funcionalidad de estos procesos. Los diagramas de flujo de dichos procesos se muestran en las Figuras 5.13 y 5.14.

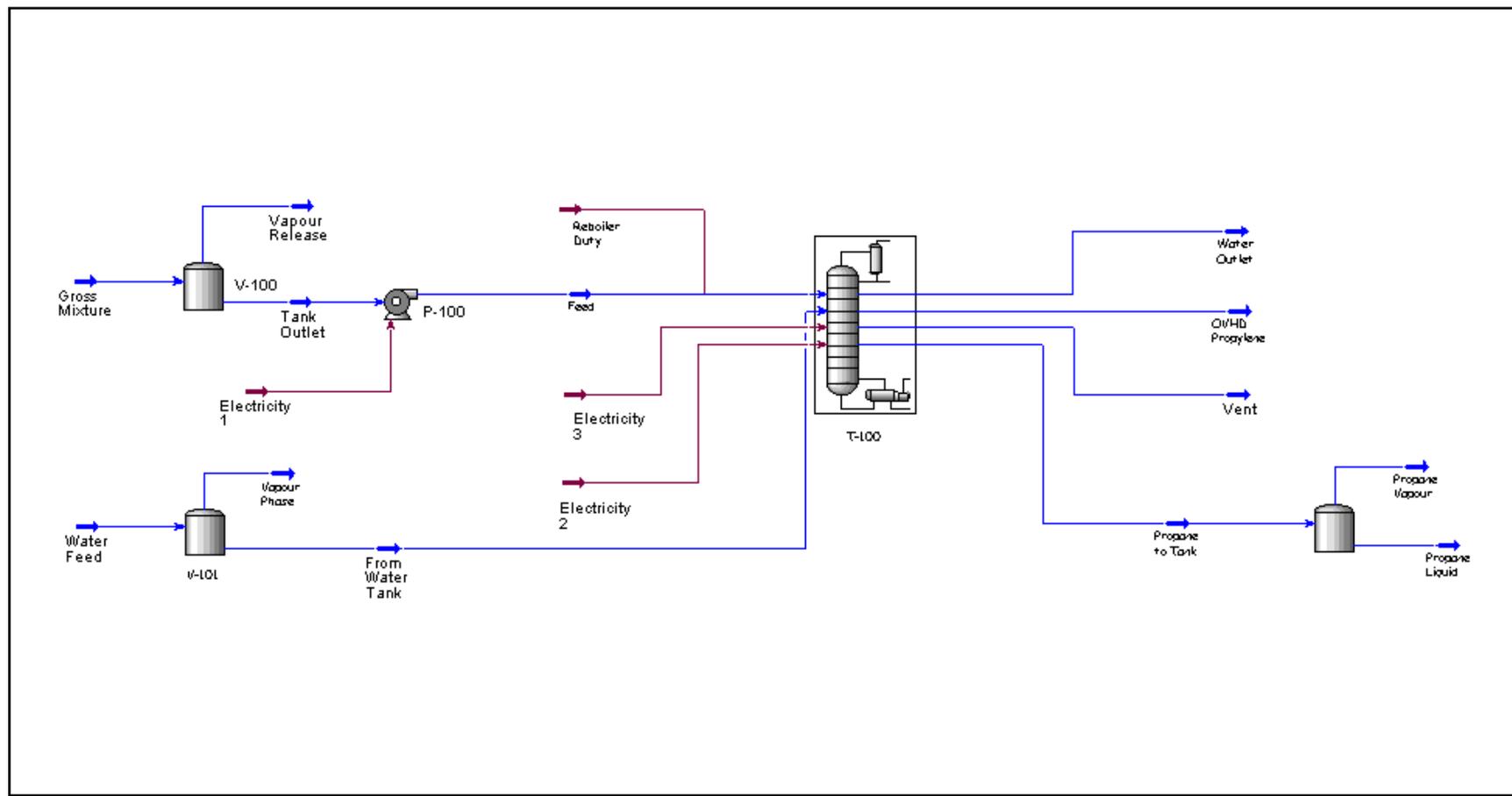


Figura 5.13. Diagrama de flujo proceso de separación de Propano-Propileno.

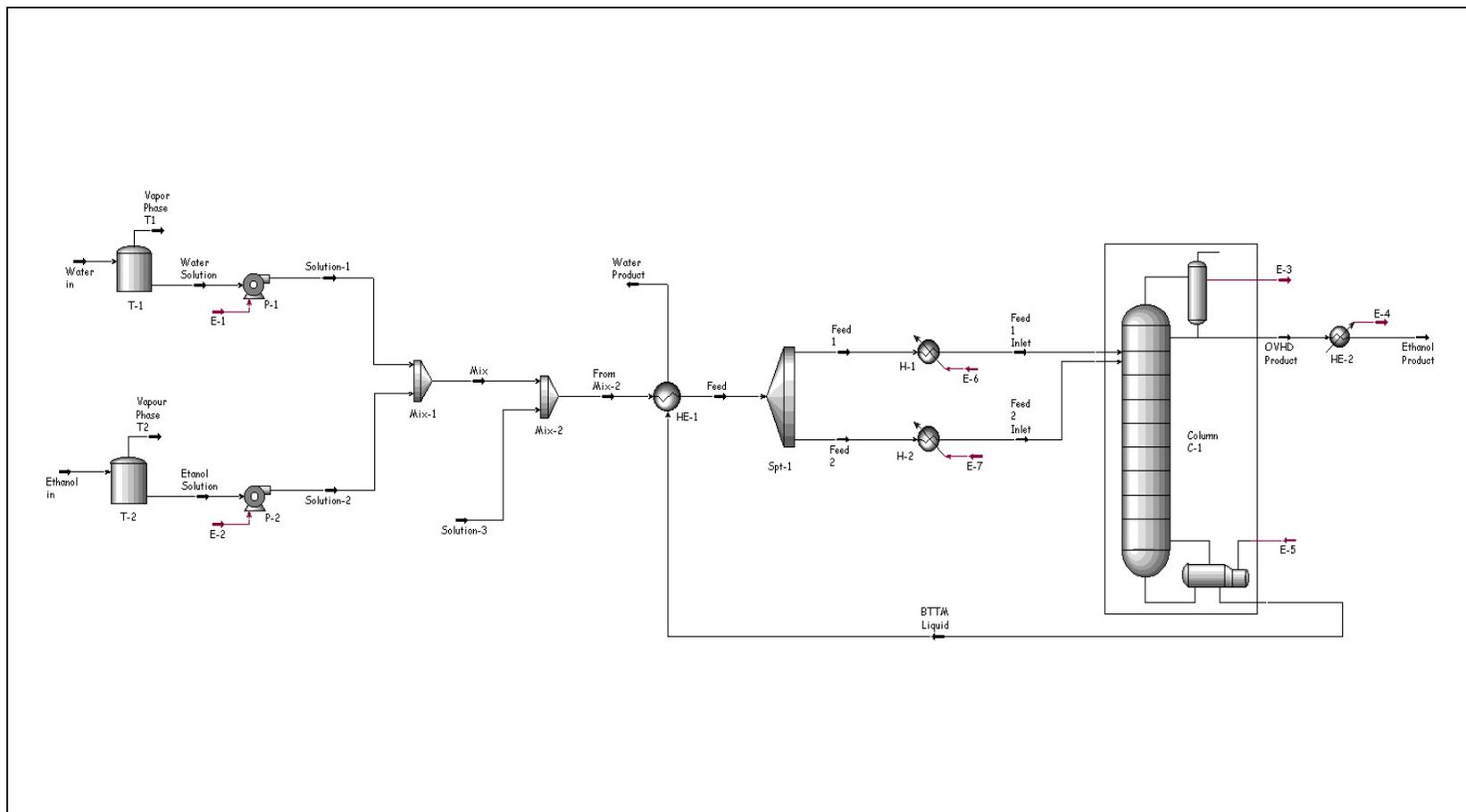


Figura 5.14. Diagrama de flujo proceso de separación de Etanol-Agua

De acuerdo con la metodología seguida en el caso de aplicación, la totalidad de la información generada por la herramienta de simulación, es posteriormente transferida a una hoja de cálculo para su análisis.

5.2.3.3 Interfaz de transferencia

La interfaz de transferencia, para cada uno de los procesos estudiados, incluye las corrientes de mayor interés, así como una descripción detallada de los requerimientos energéticos.

El aspecto más importante en el desarrollo de la interfaz de transferencia de información, es la creación de la memoria de cálculo del sistema estudiado, donde se genera toda la información necesaria para el análisis técnico y ambiental. La Figura 5.15 presenta la interfaz del sistema de separación de Propano-Propileno

Mezcla inicial		Propileno líquido(producto)		Propano Líquido	
Componente	Fracción másica	Componente	Fracción másica	Componente	Fracción másica
C ₃ H ₈	0,60	C ₃ H ₈	0,10	C ₃ H ₈	0,92
H ₂ O	0,00	H ₂ O	0,00	H ₂ O	0,00
C ₃ H ₆	0,40	C ₃ H ₆	0,90	C ₃ H ₆	0,08
total	1,00	total	1,00	total	1,00
Mass Flow (tonne/d)	1400,00	Mass Flow (tonne/d)	362,92	Mass Flow (tonne/d)	858,36
Temp (°C)	20,0	Temp (°C)	42,6	Temp (°C)	49,9
Pres (bar)	20	Pres (bar)	60	Pres (bar)	60

Venteo (emisiones fugitivas)		Entrada a la columna		Agua alimentada	
Componente	Fracción másica	Componente	Fracción másica	Componente	Fracción másica
C ₃ H ₈	0,60	C ₃ H ₈	0,60	C ₃ H ₈	0,00
H ₂ O	0,00	H ₂ O	0,00	H ₂ O	1,00
C ₃ H ₆	0,40	C ₃ H ₆	0,40	C ₃ H ₆	0,00
total	1,00	total	1,00	total	1,00
Mass Flow (tonne/d)	1,40	Mass Flow (tonne/d)	1398,60	Mass Flow (tonne/d)	18000
Temp (°C)	24,4	Temp (°C)	39,4	Temp (°C)	25,0
Pres (bar)	50	Pres (bar)	50	Pres (bar)	1

Propileno vapor (recirculado)		Agua de salida	
Componente	Fracción másica	Componente	Fracción másica
C ₃ H ₈	0,09	C ₃ H ₈	0,00
H ₂ O	0,00	H ₂ O	1,00
C ₃ H ₆	0,91	C ₃ H ₆	0,00
total	1,00	total	1,00
Mass Flow (tonne/d)	177,32	Mass Flow (tonne/d)	18000
Temp (°C)	36,4	Temp (°C)	62,1
Pres (bar)	15	Pres (bar)	23

Consumo de energía	
Total Electricidad (MJ/h)	4520
Total Vapor (MJ/h)	123469
Total Energía (MJ/h)	127989

Figura 5.15. Interfaz de transferencia para el proceso separación de Propileno

La misma estructura de interfaz, se presenta en la Figura 5.16, en la que se describen las principales corrientes del proceso de separación de Etanol-Agua.

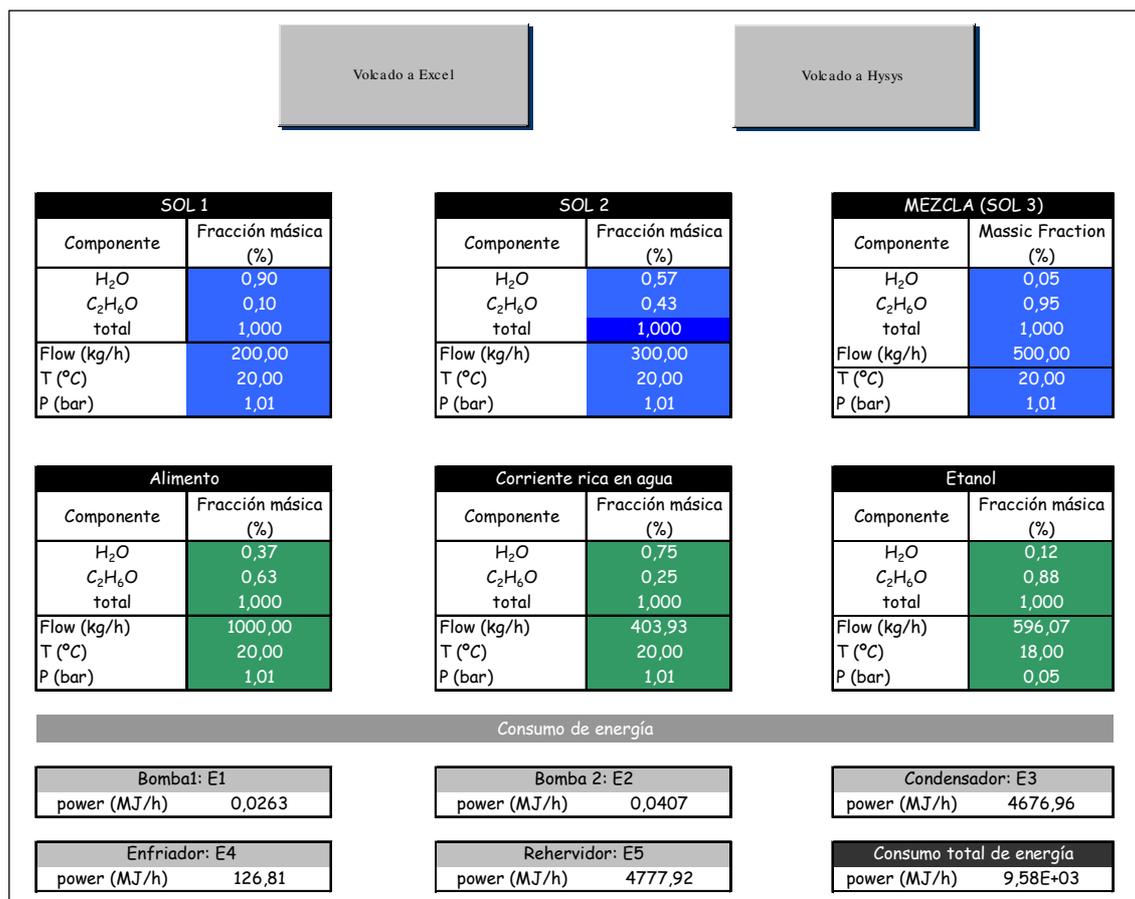


Figura 5.16. Interfaz de transferencia del proceso Etanol-Agua.

5.2.3.4 Evaluación de los sistemas en estudio.

La evaluación se desarrolló con base en la información de la memoria de cálculo. La información contenida en la memoria de cálculo, varía dependiendo del proceso, sin embargo, generalmente está conformada por información técnica del proceso –*equipos y corrientes principales*–.

En la memoria de cálculo se han registrado los datos generados en el modelo del proceso. El desarrollo de la interfaz es muy importante, puesto que a partir de ella, se obtiene la información que permite crear y comparar las diferentes alternativas.

Por otra parte, en la denominada memoria de cálculo se creó el eco-vector donde han sido relacionadas las cargas ambientales con que se evalúa la viabilidad ambiental del proceso y se comparan las alternativas propuestas.

En los siguientes apartados, se presentan los resultados de la evaluación de los sistemas estudiados, inicialmente el caso de separación de Propileno, y en segundo lugar, la evaluación del caso de obtención de Etanol.

Caso separación Propano-Propileno.

Los resultados de la simulación, fracciones másicas de las corrientes de entrada a los procesos simulados, productos y subproductos obtenidos, así como requerimientos de energía se describen en las Tablas 5.7, 5.8, y 5.9 respectivamente.

Tabla 5.7. Composiciones de la corriente de entrada

<i>Propano (Fracción másica)</i>	<i>Propileno (Fracción másica)</i>
0.75	0.25
0.70	0.30
0.60	0.40
0.50	0.50
0.40	0.60
0.30	0.70
0.20	0.80
0.10	0.90

De acuerdo con la Tabla 5.7, se utilizaron diferentes fracciones másicas de la mezcla original como alimento en el proceso de separación. La finalidad de utilizar diferentes fracciones másicas, fue evaluar la respuesta del sistema simulado, y también evaluar la variación en los requerimientos. La incidencia en los resultados del proceso de las diferentes fracciones másicas, se discutirá más adelante.

Tabla 5.8. Principales corrientes del proceso obtenidas de la simulación

Flujos	Cantidades (Ton/d)
Alimento a la columna	1400.00
Venteo (Emisiones fugitivas)	1.40
Propileno líquido (90,0%)	373.05
Propileno Vapor	232.62

Tabla 5.9. Demanda energética para las condiciones establecidas de proceso.

Demanda energética	Etapa de Proceso	Consumo (MJ/h)	(MJ/ton alimento)
Vapor	Calentamiento (Re-hervidor)	28318	485.44
Vapor	Calentamiento (Separador)	533	9.14
Electricidad 1	Alimento	161	2.76
Electricidad 2	Agua de enfriamiento	2520	43.20
Electricidad 3	Corriente Propano líquido. (92%)	117	2.00
Electricidad 4	Reflujo	134	2.29
Electricidad 5	Corriente Propileno Líquido (90%)	43	0.74
Total		31825	546

Considerando los resultados presentados en la tabla anterior, se puede corroborar la importancia del consumo energético en el proceso.

Análisis técnico

La Tabla 5.10, presenta la variación de la producción de propileno (líquido o vapor) a partir de cambios en la mezcla original. Lo novedoso de la fase de integración, es que dicha evaluación se hizo en línea con cambios en el proceso a través de la herramienta de simulación.

Tabla 5.10. Producción de Propileno (líquido / vapor) a partir de la mezcla original

Propileno en Mezcla (%)	Producción de Propileno líquido (ton/d)	Producción de Propileno vapor (ton/d)
0.25	291.97	0.00
0.30	323.18	58.00
0.40	362.19	173.00
0.50	377.46	318.65
0.60	396.92	482.64
0.70	381.92	660.78
0.80	320.14	894.10
0.90	36.41	1347.55

Teniendo en cuenta que el objetivo del proceso es obtener Propileno líquido, se puede observar que a partir de una mezcla original con una composición 50/50 (Propileno/Propano), la producción de Propileno líquido es muy similar a la del Propileno vapor, esto además de ser una limitante del proceso, indica que el sistema definido, es ineficiente para proporciones mayores de la establecida.

Lo anterior puede verse de manera gráfica en la Figura 5.17, donde se representa la variación del Propileno separado en las dos fases, a partir de los cambios de concentración de la mezcla original.

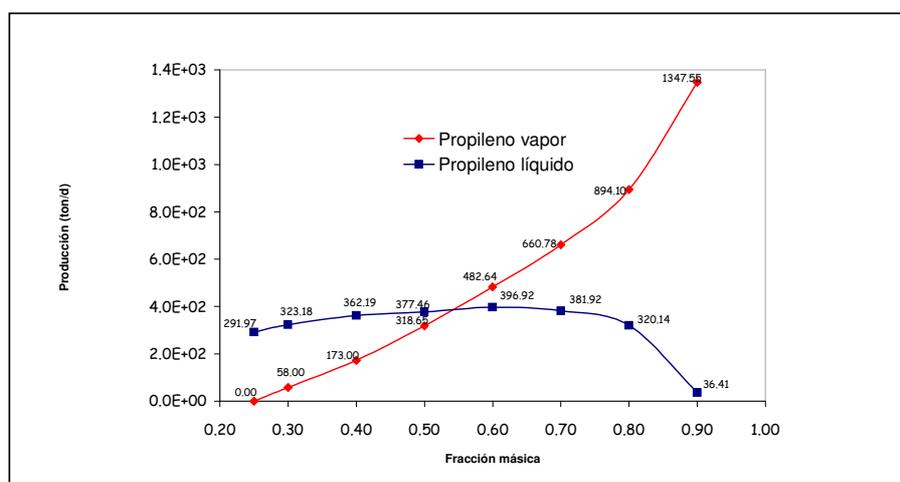


Figura 5.17. Variación de la producción de Propileno en función de la mezcla original

De acuerdo con la figura, es fácilmente observable la proporción en la mezcla original, que permite obtener la mayor cantidad de producto de interés (Propileno líquido).

Otro aspecto también evaluado, ha sido el consumo de agua para diferentes proporciones en la mezcla original. La Tabla 5.11, y la Figura 5.18 presentan los datos del consumo de agua para diferentes proporciones de la mezcla separada.

Tabla 5.11. Consumo de agua alimentada en función de la composición de la mezcla original.

Propileno en Mezcla (%)	Consumo de agua(t/d)
0.26	18000
0.30	24000
0.40	27000
0.50	29000
0.60	29000
0.70	28000
0.80	24000
0.90	2900

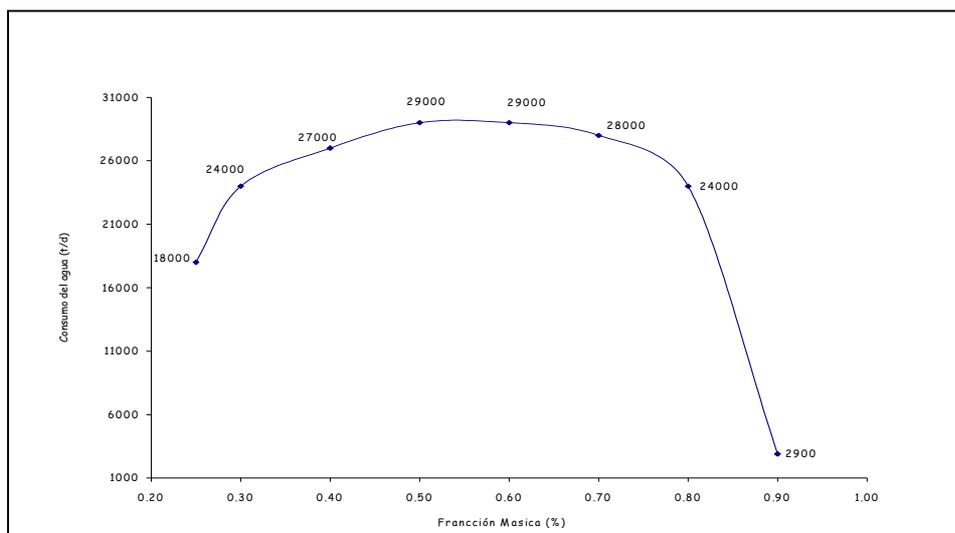


Figura 5.18. Comparación del consumo de agua y su relación con la mezcla original

El mayor consumo de agua se obtiene para una mezcla con proporción cercana 50/50. Mezclas con proporciones más altas de Propileno, presenta una disminución del consumo de agua, pero implicarían, como se observó anteriormente, una menor obtención del producto de interés.

De acuerdo con el objetivo inicial, el proceso inicial debía ser comparado con alternativas viables tanto técnica como ambientalmente. Considerando que no disponemos de información real de la etapa de obtención de la mezcla, dicha etapa no es factible de ser modificada.

Los resultados de la simulación permiten predecir que desde el punto de vista técnico, la destilación no genera mayores dificultades, por lo que la única etapa factible de ser modificada

para generar alternativas de producción al proceso en estudio, es la generación energética. Con base en esto, se plantearon tres escenarios de proceso que involucran alternativas de generación de vapor y electricidad. La Tabla 5.12, resume las características de los tres escenarios definidos.

Tabla 5.12. Alternativas de generación energética para el proceso

<i>Alternativas</i>	<i>Generación de vapor</i>	<i>Generación de electricidad</i>
Proceso Original	Producción en Refinería	Producción en Refinería
Escenario 1	Producción en Refinería	Red Eléctrica de España
Escenario 2	Combustión Gas Natural	Red Eléctrica de Francia
Escenario 3	Combustión Gas Natural	Red Eléctrica de España

Como ya se ha descrito antes, los escenarios establecidos involucran las mismas etapas de producción. Las diferencias consisten únicamente en lo referente a la generación de energía, para la cual se definieron tres diferentes formas de obtención.

Evaluación Ambiental

Para la evaluación ambiental del proceso, se definió un eco-vector. Las cargas ambientales que conforman el eco-vector deben permitir tener una visión representativa del sistema en estudio. Por lo tanto, fueron elegidos para componerlo, los siguientes contaminantes: emisiones de dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂), compuestos orgánicos volátiles (VOC), y la carga ambiental referente a los vertidos líquidos, representada por la demanda química de oxígeno (COD). La Figura 5.19, representa el eco-vector que ha sido definido para la evaluación de cargas ambientales del proceso de separación de Propileno.

	<u>Carga</u>	<u>Mezcla</u>	<u>Energía</u>	<u>Separación</u>	
{	CO₂	--	--	--	
	SO₂	--	--	--	
	COD	--	--	--	
	VOC's	--	--	--	}

Figura 5.19. Eco-vector para el análisis ambiental

A partir de las cargas definidas en el eco-vector y con ayuda de la base de datos del programa TEAM™, se calculó el inventario de entradas y salidas del proceso. Esta información permitió evaluar la incidencia ambiental del proceso a través de la cuantificación de su carga ambiental. La información relacionada con las alternativas de producción de energía (vapor/electricidad) que conforman los tres escenarios de evaluación se presenta en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13. Carga ambiental por alternativa.

Carga ambiental	Vapor - Refinería	Vapor-Combustión Gas Natural	Electricidad - RED ESPAÑA (1996)	Electricidad - RED FRANCIA (1995)
	g/kg (vapor prod)	g/kg (vapor prod)	g/MJ	g/MJ
CO ₂	1.53E+02	2.20E+02	1.61E+02	1.17E+02
SO ₂	1.40E+00	6.48E-02	9.18E-01	1.15E-03
COD	1.00E-03	1.67E-03	4.85E-04	1.83E-06
VOC	2.10E+00	4.60E-01	8.13E-01	8.91E-04

Fuente: TEAM, 2001. SimaPro, 2002.

La información de la Tabla 5.13, representa las cargas ambientales de dos alternativas de generación de vapor y electricidad. Con ellas, se muestran diferentes opciones, no sólo de la disponibilidad de técnicas, sino también geográfica, para la obtención de energía. Las fuentes consultadas, se basan en información recogida de estudios realizados en países de Europa [Ecobilan, 2000]. Más adelante se discutirán estos resultados, y la forma como deben ser interpretados, para que puedan ser utilizados como soporte en la toma de decisiones respecto al proceso.

Evaluación de las cargas ambientales a partir de la información de proceso

La incidencia ambiental de un proceso, se puede definir a partir de la cuantificación de las cargas ambientales. En este caso de aplicación se utilizó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), para la cuantificación de las cargas a través del eco-vector (Figura 5.19). La Tabla 5.14 presenta los valores obtenidos para el eco-vector, con base en las diferentes etapas del proceso y las cargas totales.

Tabla 5.14. Eco-vector, proceso original

Eco-vector	Etapa				Proceso
	Obtención de la mezcla	Vapor	Electricidad	E. fugitivas	Emisiones totales Kg/h
CO ₂	5.24E+02	6.20E+02	1.42E+02	--	1.29E+03
SO ₂	2.23E+00	5.68E+00	1.30E+00	--	9.21E+00
COD	5.67E-02	4.05E-03	9.00E-04	--	6.17E-02
VOC's	2.84E+00	8.51E+00	1.94E+00	8.31E-08	1.33E+01

De acuerdo con la información presentada en la Tabla 5.14, la mayor carga ambiental se debe a la emisión de dióxido de carbono, que supera a las demás en forma considerable. Además, la etapa con un mayor aporte es la generación de energía (o la suma de vapor y electricidad). La

Figura 5.20 presenta gráficamente las cargas ambientales, descritas por etapas y sustancias emitidas.

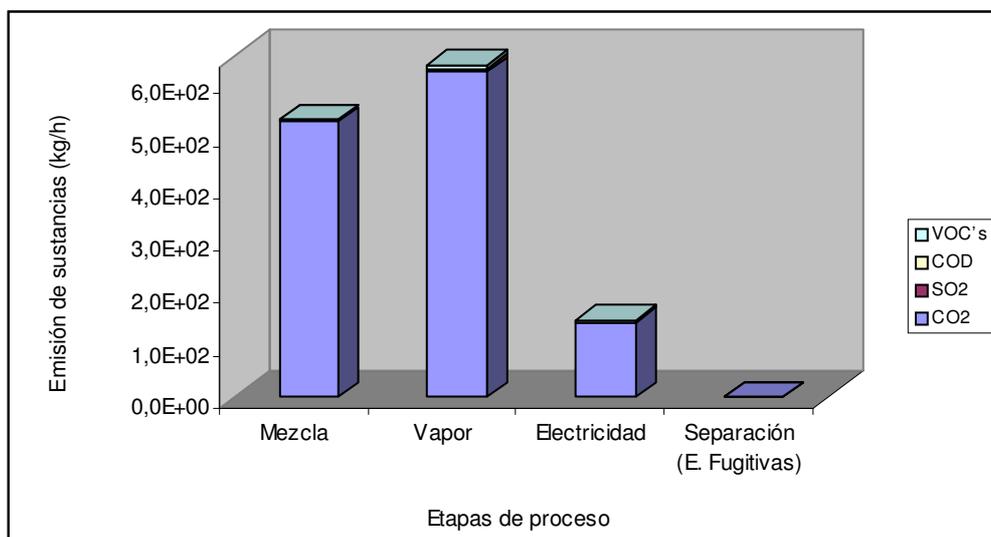


Figura 5.20. Cargas ambientales por etapa en el proceso original

Gráficamente se puede apreciar que la obtención de la mezcla es un aspecto de gran contribución de cargas. Sin embargo, como ya ha sido mencionado, no es una etapa factible de ser revisada, debido a que se encuentra por fuera de los límites de las fronteras definidas para el análisis de este proceso. Por esta razón, el análisis técnico y ambiental está orientado hacia las otras dos etapas consideradas en el proceso: columna de separación y la generación energética.

En este mismo sentido, la mayor carga ambiental es la emisión de dióxido de carbono, que supera a las demás en forma considerable. Así mismo, la etapa que presenta un mayor aporte es la generación de energía (o la suma de vapor y electricidad).

La Tabla 5.15 presenta una descripción comparativa de los escenarios. En ella, se observan las diferencias en la incidencia ambiental de la combinación de alternativas del proceso.

Tabla 5.15. Comparativa de las cargas ambientales de los escenarios desarrollados

Eco-vector	Proceso Original kg/Ton Propileno	Escenario 1 kg/Ton Propileno	Escenario 2 kg/Ton Propileno	Escenario 3 kg/Ton Propileno
CO2	1.29E+03	1.20E+03	1.50E+03	1.35E+03
SO2	9.21E+00	8.20E+00	2.46E+00	2.75E+00
COD	6.17E-02	6.09E-02	6.27E-02	6.27E-02
VOC's	1.33E+01	1.16E+01	4.08E+00	4.28E+00

Gráficamente, el aporte total por alternativa del proceso, se muestra en la Figura 5.21.

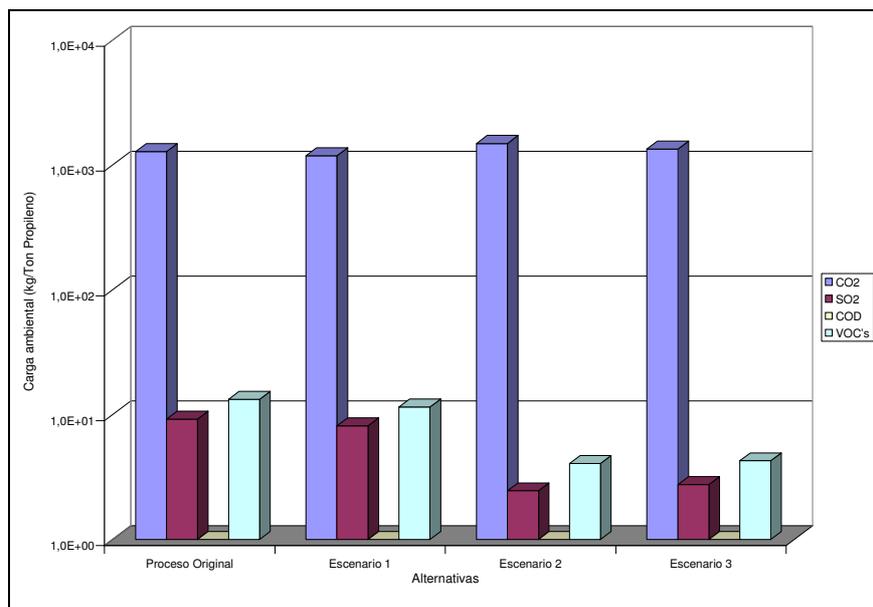


Figura 5.21. Carga ambiental del proceso y alternativas por sustancia

La figura representa las cargas totales del proceso original y las diferentes alternativas de producción de energía. Se observa que existe una variación en la carga total del proceso. Mientras, en el escenario 1 decrece la carga total, en los escenarios 2 y 3, se ve claramente un aumento de la misma. Este análisis es absolutamente cualitativo, y debe tomarse con precaución, debido al hecho de que no existe una proporcionalidad directa entre la cantidad de carga y los posibles daños.

En la Tabla 5.15 y Figura 5.21 se realizó un análisis por sustancia emitida. En este sentido, la discriminación de carga ambiental por sustancia, ayuda a evidenciar que con respecto a la emisión de dióxido de carbono, existe una fuerte disminución en el escenario 1, contrariamente a lo que sucede en los escenarios 2 y 3, en los cuales se presenta un aumento de la carga en mención, en forma considerable para el escenario 2 y de menor magnitud en el escenario 3.

Con respecto a las otras cargas estudiadas (SO_2 y VOC's), estas registran una variación menos marcada. Esto puede ser explicado, por el hecho de que las cantidades emitidas son menores, y la relación entre la alternativa de generación y la emisión es más estable. En este sentido, estas cargas ambientales presentan una leve disminución para el escenario 1 con respecto al proceso original. En el escenario 2, se observa disminución de las cargas de SO_2 y VOC's con respecto al proceso original, mostrando una tendencia opuesta a lo observado para la emisión de CO_2 .

Finalmente, en el escenario 3 se puede observar una mayor disminución en la emisión de SO₂, y un leve aumento de la emisión de COV's. Por otra parte, la carga ambiental relativa a la carga orgánica en agua, muestra una leve disminución en el escenario 1, sin embargo, la emisión permanece casi constante para los otros dos escenarios.

Caso separación Etanol-Agua.

Aspectos técnicos evaluados

Las Tablas 5.16 a la 5.18, presentan la información obtenida a través de la interfaz del sistema, o memoria de cálculo del estudio, base para el análisis.

Tabla 5.16. Composiciones de la mezcla de alimento

Etanol (fracción másica)	Agua (fracción másica)
0.26	0.74
0.33	0.67
0.47	0.53
0.53	0.47
0.60	0.40
0.65	0.35

Tabla 5.17. Flujo másico de las principales corrientes del proceso

Corrientes	Flujo másico (kg/h)	% Etanol
Sol 1 (Rica en agua)	2.00E+02	10.06
Sol 2 (reciclo del proceso)	3.00E+02	43.09
Sol 3 (Solución rica en etanol)	5.00E+02	95.23
Alimento	1.00E+03	62.55
Solución pobre (Subproducto)	4.04E+02	25.00
Etanol (Producto principal)	5.96E+02	88.00

Tabla 5.18. Requerimientos energéticos del proceso de destilación (Etanol-Agua)

Equipo/corriente	Etapas de proceso	Consumo (MJ/h)	Consumo específico (MJ/kgalimento)
E1	Sol1. Bomba 1. (Electricidad)	2.63E-02	2.63E-05
E2	Sol2. Bomba 2. (Electricidad)	4.07E-02	4.07E-05
E3	Condensación (Electricidad)	4.68E+03	4.68E+00
E4	Enfriador (Electricidad)	1.27E+02	1.27E-01
E5	Re-hervidor (vapor)	4.78E+03	4.78E+00
Total		9.58E+03	9.58E+00

A través de la interfaz, se realizaron pruebas para comparar los resultados en el modelo con diferentes porcentajes de Etanol en la mezcla a separar. La Tabla 5.19 muestra la respuesta del modelo en términos de Etanol producido y consumo de energía.

Tabla 5.19. Variación de la producción de Etanol y del consumo de energía

Mezcla (%etanol)	Producción de Etanol (kg/h)	Consumo de energía (MJ/h)
0.26	17.88	1.78E+04
0.33	121.13	1.65E+04
0.47	348.71	1.31E+04
0.53	445.79	1.19E+04
0.60	555.30	1.02E+04
0.65	633.85	8.94E+03

La producción de Etanol, el consumo de energía, y su variación con la concentración, se presenta en las Figuras 5.22 y 5.23 respectivamente.

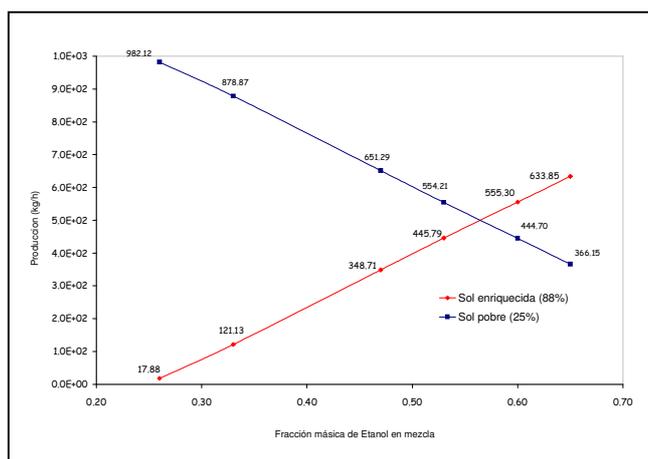


Figura 5.22. Producción de Etanol vs concentración de mezcla en el alimento

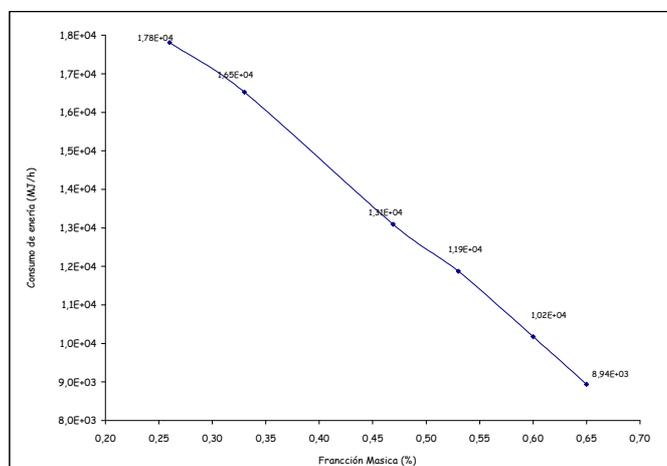


Figura 5.23. Consumo de energía vs concentración de Etanol en el alimento

De las figuras anteriores, se puede ver claramente el aumento de la producción de Etanol (Sol enriquecida) y la disminución en el consumo de energía. Esto puede ser explicado por el hecho de que a mayores concentraciones de Etanol en la mezcla alimentada, el sistema resulta mucho más eficiente.

Evaluación Ambiental

Para la evaluación ambiental del proceso, se definió un eco-vector con las cargas que se presenta en la Figura 5.24.

	<u>Carga</u>	<u>Vapor</u>	<u>Electricidad</u>
{	Agua	--	--
	CO	--	--
	SO₂	--	--
}	NO_x	--	--

Figura 5.24. Eco-vector del proceso Etanol-Agua.

Hasta ahora, el análisis del proceso se ha realizado asumiendo que toda la energía se toma de la red eléctrica. Para la evaluación ambiental se analizaron y compararon cuatro escenarios de generación energética.

Los escenarios están compuestos por alternativas que comprenden la producción de vapor en refinería y a partir de Gas Natural. A su vez, la generación de electricidad ha sido evaluada para la red nacional de suministro y para combustión de carbón. Los escenarios y alternativas se presentan en la Tabla 5.20

Tabla 5.20. Escenarios de generación de energía.

<i>Alternativas</i>	<i>Generación de vapor</i>	<i>Generación de electricidad</i>
Escenario 1 (V/R-E/RE)	Producción en Refinería (V/R)	Red Eléctrica de España (E/RE)
Escenario 2 (V/R-E/CC)	Producción en Refinería (V/R)	Combustión de carbón (E/CC)
Escenario 3 (V/GN-E/RE)	Combustión Gas Natural (V/GN)	Red Eléctrica de España (E/RE)
Escenario 4 (V/GN-E/CC)	Combustión Gas Natural (V/GN)	Combustión de carbón (E/CC)

Los diferentes escenarios se compararon con base en el eco-vector definido, el que se representa en la Figura 5.24. Para una correcta comparación, se han calculado las cargas por unidad de mezcla alimentada. En la Tabla 5.21, se describen las diferentes cargas asociadas al eco-vector en cada alternativa. Los valores de las cargas ambientales, al igual que en los otros casos estudiados, fueron tomados de la base de datos de la herramienta TEAM™.

Tabla 5.21. Carga ambiental por alternativa de generación energética.

<i>Carga Ambiental</i>	V/R	V/GN	E/RE	E/CC
	/(kg Alimento)			
CO (g)	1.06E-01	1.49E-01	5.32E+00	6.23E-01
SO ₂ (g)	2.96E+00	1.11E-01	3.60E+00	2.47E+00
NO _x (g)	3.18E+00	2.35E-01	1.26E+00	1.10E+00
Consumo de agua (L)	5.72E-01	2.83E-01	1.77E+00	5.30E-01

V=vapor; E= electricidad; R= refinería; GN= gas natural

La información de esta tabla se presenta de forma gráfica en la figura 5.25, donde se puede contrastar fácilmente las diferencias en cada una de las alternativas elegidas

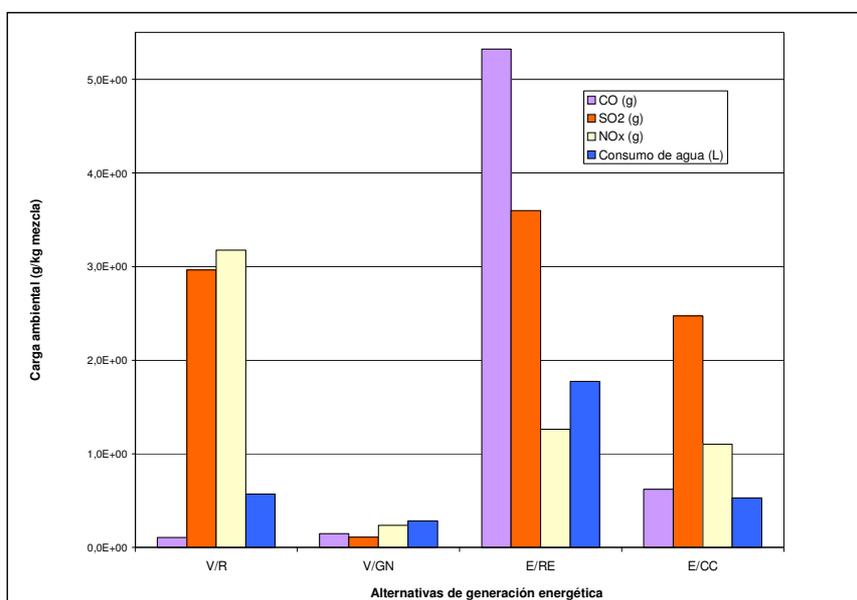


Figura 5.25. Carga ambiental por alternativa de generación de energía.

En la figura anterior se observa que existe un mayor aporte de carga ambiental por producción de electricidad, y por la otra, la alternativa de Gas Natural representa el menor aporte contaminante.

Evaluación de las cargas ambientales de los escenarios evaluados.

La evaluación de las cargas ambientales del proceso de obtención de Etanol se desarrolló con base en dos conceptos muy importantes: 1) la definición de la unidad funcional y 2) la asignación de cargas.

La unidad funcional elegida para la evaluación y comparación de cargas, es la producción de Etanol (Ton de producto).

Por otra parte, la asignación másica de cargas (reparto o localización) se ha realizado, considerando una corriente de Etanol al 100% en volumen (el producto contiene 88%).

La Tabla 5.22, presenta el criterio de asignación de cargas, y el valor real utilizado para la determinación de las cargas ambientales.

Tabla 5.22. Reparto o localización de cargas

Corriente	Caudal (kg/h)
Mezcla alimentada	1000.00
Solución de producto (88% de etanol)	596.07
Solución base para la determinación de cargas (100% Etanol)	355.31

En la anterior tabla se muestra la localización de las cargas ambientales, siguiendo un criterio másico. La producción de Etanol utilizada como unidad funcional, representa aproximadamente el 60% de la producción real.

Cargas ambientales. Las cargas ambientales de los escenarios de generación energética se presentan en la Tabla 5.23. Gráficamente, el aporte de cada carga ambiental en los escenarios evaluados, se presenta en la Figura 5.26.

Tabla 5.23. Eco-vector por escenario de evaluación

Carga (g/kgEtanol (100%))	Alternativas			
	V/R-E/RE	V/R-E/CC	V/GN-E/RE	V/GN-E/CC
Agua	3.93E+00	1.85E+00	3.45E+00	1.36E+00
CO	9.11E+00	1.22E+00	9.18E+00	1.30E+00
SO₂	1.10E+01	9.12E+00	6.22E+00	4.33E+00
NO_x	7.45E+00	7.18E+00	2.51E+00	2.24E+00

En la Tabla 5.23, se presentan las cargas ambientales que conforman el eco-vector, definido para cada una de las alternativas de producción de energía. Las entradas al sistema, se representan por el consumo de agua, y las emisiones consisten en monóxido de carbono, azufre y nitrógeno.

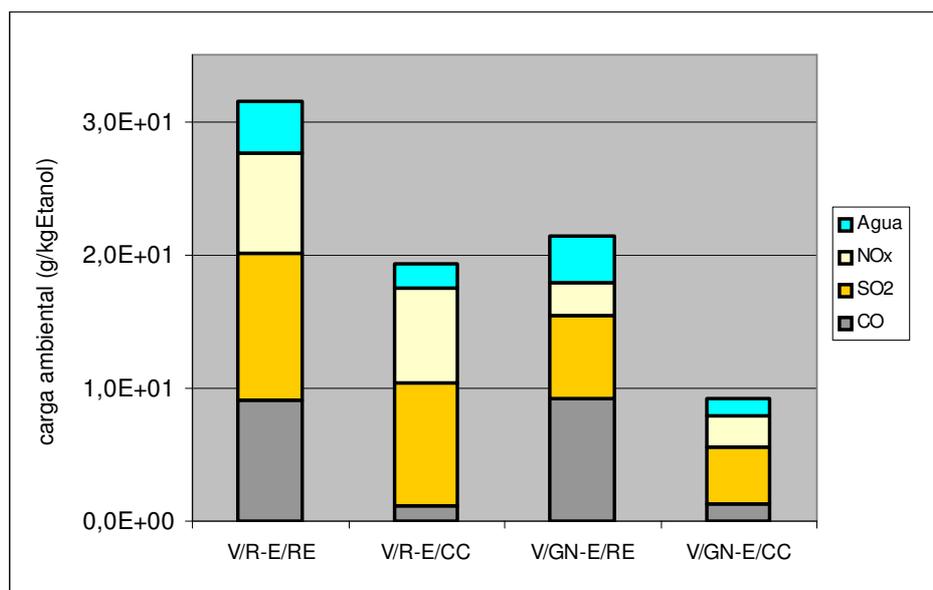


Figura 5.26. Carga ambiental discriminada por sustancia y escenario de producción

De acuerdo con la información observada en la Figura 5.26, los escenarios 1 y 3, presentan los valores más altos en carga total comparados con los escenarios 2 y 4. Sin embargo, es necesario realizar un análisis más detallado por carga y escenario, de manera que se evalúe cada carga por separado. Las Tablas 5.24 a 5.27, muestran información de las cargas del eco-vector, discriminada por escenario y etapa del proceso.

Tabla 5.24. Discriminación del consumo de agua por escenario y etapa

Alternativa	Producción de Vapor		Producción de Electricidad		Consumo total (kg/ton Etanol)
	(kg/Ton Etanol)	(%)	(kg /Ton Etanol)	(%)	
V/R-E/RE	9.59E-01	24.38	2.97E+00	75.62	3.93E+00
V/R-E/CC	9.59E-01	51.88	8.89E-01	48.12	1.85E+00
V/GN-E/RE	4.74E-01	5.04	8.93E+00	94.96	9.40E+00
V/GN-E/CC	2.51E-01	22.00	8.89E-01	78.00	1.14E+00

Tabla 5.25. Discriminación de Monóxido de carbono por escenario y etapa.

Alternativa	Producción de Vapor		Producción de Electricidad		Emisión total (kg/ton Etanol)
	(kg/Ton Etanol)	(%)	(kg /Ton Etanol)	(%)	
V/R-E/RE	1.78E-01	1.95	8.93E+00	98.05	9.11E+00
V/R-E/CC	1.78E-01	14.51	1.05E+00	85.49	1.22E+00
V/GN-E/RE	2.51E-01	2.73	8.93E+00	97.27	9.18E+00
V/GN-E/CC	2.51E-01	5.70	4.15E+00	94.30	4.40E+00

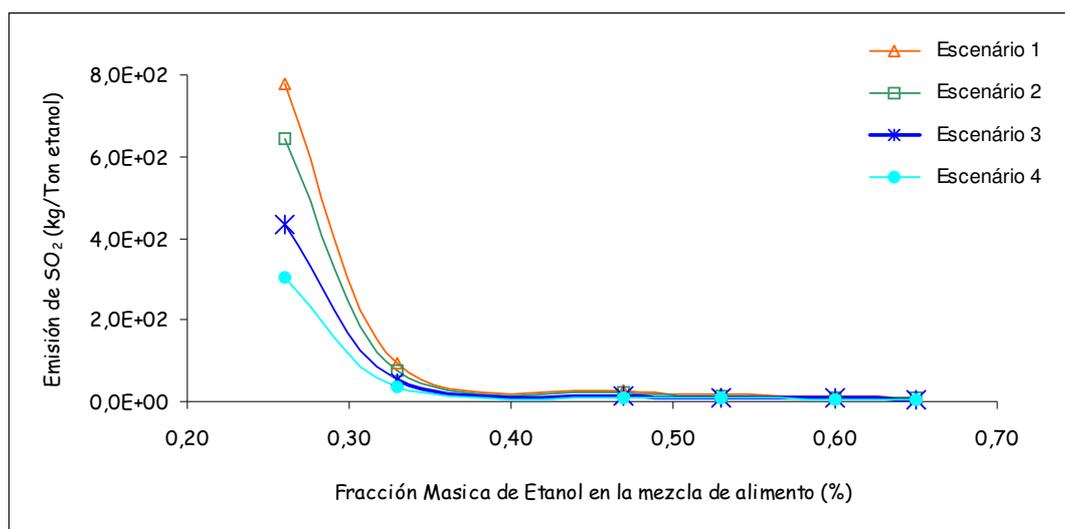
Tabla 5.26. Discriminación de la emisión de Óxidos de Azufre por escenario y etapa

Alternativa	Producción de Vapor		Producción de Electricidad		Emisión total (kg/ton Etanol)
	(kg/Ton Etanol)	(%)	(kg /Ton Etanol)	(%)	
V/R-E/RE	4.97E+00	45.16	6.04E+00	54.84	1.10E+01
V/R-E/CC	4.97E+00	54.51	4.15E+00	45.49	9.12E+00
V/GN-E/RE	1.85E-01	2.98	6.04E+00	97.02	6.22E+00
V/GN-E/CC	1.85E-01	4.28	4.15E+00	95.72	4.33E+00

Tabla 5.27. Discriminación de la emisión de Óxidos de Nitrógeno por escenario y etapa

Alternativa	Producción de Vapor		Producción de Electricidad		Emisión total (kg/ton Etanol)
	(kg/Ton Etanol)	(%)	(kg /Ton Etanol)	(%)	
V/R-E/RE	5.33E+00	71.54	2.12E+00	28.46	7.45E+00
V/R-E/CC	5.33E+00	74.23	1.85E+00	25.77	7.18E+00
V/GN-E/RE	3.94E-01	15.69	2.12E+00	84.31	2.51E+00
V/GN-E/CC	3.94E-01	17.58	1.85E+00	82.42	2.24E+00

Adicionalmente, la información descrita en las Tablas 5.24 a 5.27, permite desarrollar en cada escenario, el perfil de variación la emisión de sustancia con la concentración de mezcla inicial. Las Figuras 5.27 a 5.29, muestran los perfiles obtenidos para la emisión de dióxido de azufre, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno, respectivamente.

Figura 5.27. Emisión de SO₂ por escenario y porcentaje de Etanol en la mezcla

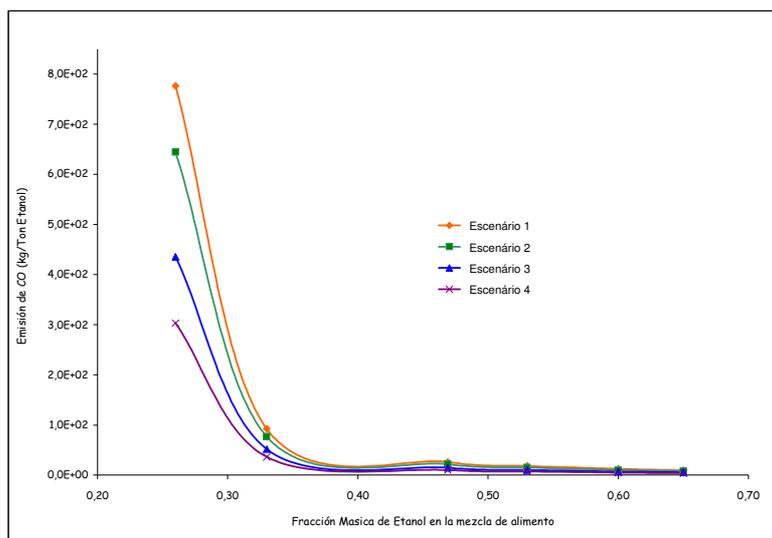


Figura 5.28. Emisión de CO por escenario y porcentaje de Etanol en la mezcla

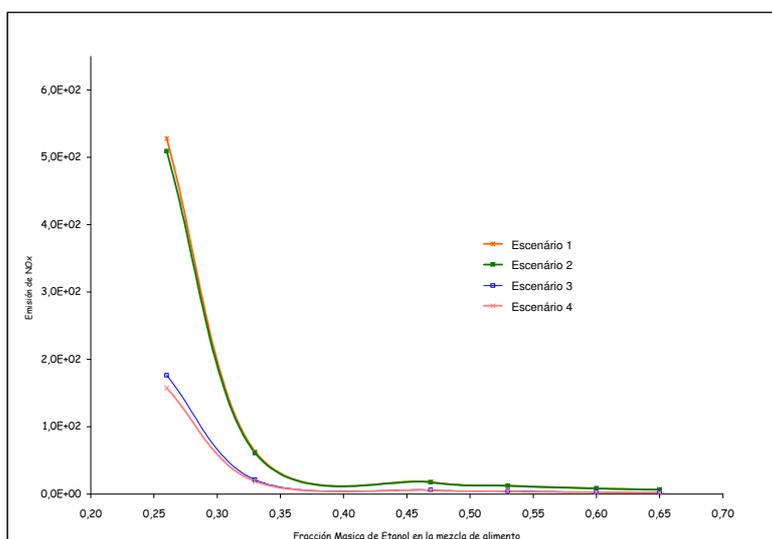


Figura 5.29. Emisión de NOx por escenario y porcentaje de Etanol en la mezcla

Los perfiles de emisión de cargas ambientales presentan la misma tendencia en los escenarios evaluados. De acuerdo con estos perfiles, para mezclas con un contenido de Etanol, por debajo del 30%, las emisiones son mucho más altas que para el resto de proporciones analizadas. Además, por encima del 40% de Etanol en mezcla, las emisiones son prácticamente iguales en los cuatro escenarios.

5.2.4 Discusión de resultados de los casos de separación

Los resultados obtenidos en este caso de aplicación, pueden ser discutidos no sólo desde el punto de vista de la viabilidad de la aplicación del desarrollo metodológico, sino también, desde la evaluación de los procesos y las alternativas propuestas.

Con respecto al primer aspecto, las mejoras obtenidas en la transferencia de información, y su utilización en el desarrollo de la memoria de cálculo, no sólo son satisfactorias, sino que permiten avanzar en la creación de módulos más complejos para procesos que involucren más etapas.

De igual forma, el análisis técnico del proceso, desarrollado con base en la memoria de cálculo, permite conocer rápidamente y con detalle, aspectos muy importantes de la producción, que de otra forma, tardarían mucho más tiempo en ser analizados.

Así mismo, la evaluación ambiental desarrollada con base en el concepto de eco-vector, permite evaluar sistemáticamente las variaciones en las condiciones de operación y su repercusión en las cargas ambientales generadas.

Por otra parte, desde la perspectiva de los procesos analizados, se encontraron resultados un tanto sorprendentes, que en el caso del proceso de Propileno y debido a la carencia de datos reales y/o contrastables, no ha sido posible comprobar que para fracciones de propileno en la mezcla original por encima del 40%, el sistema genera una mayor cantidad de Propileno vapor, haciendo al sistema técnicamente inviable.

Como se mencionó antes, debido a la limitación por la carencia de datos reales, los resultados obtenidos en el análisis del sistema Propano-Propileno no pueden ser contrastado, por lo que el mismo, se ha utilizado únicamente como opción para comprobar las mejoras en la transferencia de información.

Ahora bien, la evaluación del proceso de obtención de Etanol a partir de una mezcla etanol-agua en diferentes proporciones, ha mostrado resultados coincidentes no sólo con la información reportada en la literatura para este proceso, sino también, con los datos obtenidos del equipo utilizado en el laboratorio.

La evaluación técnica predice satisfactoriamente los cambios en la producción y consumo con respecto a variaciones en la proporción de Etanol en mezcla. Adicionalmente, la evaluación ambiental sugiere como mejor alternativa el *escenario 4*.

En orden de prioridad de elección al escenario 4, le sigue el escenario 2 (vapor de refinería y electricidad por combustión de carbón), el escenario 3 (vapor por gas natura y electricidad de la red eléctrica nacional), y finalmente, el escenario 1 (vapor de refinería y electricidad por la red eléctrica nacional).

La elección de la alternativa con menores índices de emisión, se fundamenta en la tendencia observada en diversos sectores industriales (en ocasiones plasmados en compromisos concretos), de reducir las emisiones de sustancias que puedan generar efectos de repercusión internacional (efecto invernadero, calentamiento global, lluvia ácida, entre otros).

El siguiente paso en la metodología es el avance en dos frentes, por una parte en las técnicas de evaluación ambiental, de manera que puedan ser evaluadas, las emisiones, el destino y los efectos de las sustancias descargadas por los procesos productivos. Por otra parte, en la generación de todos los módulos que conformen los procesos estudiados, de manera que sean modeladas todas las etapas involucradas en el proceso analizados.

5.3. PROCESO DE SEPARACIÓN DE ISOPENTANO-NAFTA

5.3.1 Introducción

La aplicación de la metodología a un caso real, donde las condiciones de operación estaban establecidas de antemano y los requerimientos de producción imponían no sólo los materiales a utilizar, sino también la energía necesaria, se utilizó como base para su validación, al tiempo que permitió concebir los aspectos de mayor importancia en la metodología.

El caso de aplicación se basó en el desarrollo de las etapas establecidas en la metodología. Inicialmente se analizó el proceso y sus características; posteriormente, se estudió una simulación previa del proceso y se adecuó a las condiciones requeridas de energía y consumo de materias primas. El siguiente paso, la transferencia de información entre la simulación y una hoja de cálculo, permitió la posterior utilización de dicha información en el análisis ambiental y la determinación de las cargas ambientales, completando así el cuarto paso. Finalmente, se realizó la evaluación ambiental del proceso para basar la toma de decisiones acerca de la continuación de las siguientes fases de diseño.

En la evaluación ambiental del proceso en estudio, se definió un eco-vector, o vector multidimensional cuyas mediciones corresponden a una carga ambiental específica que está dada en términos de masa de un contaminante específico o cantidad de energía requerida. Además, se plantearon diferentes escenarios de evaluación, los cuales aunque involucran las mismas etapas del sistema, presentan diferencias en cuanto a las materias primas utilizadas y a los procesos de generación energética. En este caso, se desarrollaron los modelos de los procesos de generación de energía, utilizados en los escenarios de evaluación.

5.3.2 Objetivos y alcances.

5.3.2.1 Descripción del proceso

El proceso analizado consiste en una planta desisopentanizadora, el cual hace parte de un sistema general de procesamiento de hidrocarburos (refinería). La planta en mención separa el Isopentano (iC_5H_{12}) de una mezcla de Naftas. Antes de producirse la mezcla de Naftas, una corriente de ellas ha sido tratada para retirar los butanos.

El proceso de separación consta de columnas de separación por destilación, mezclador, sistema de intercambiadores para la transmisión de calor, tanques de almacenamiento, bombas. Además, la generación de energía, se realiza mediante una unidad de cogeneración que consta de una turbina de gas y una caldera de recuperación de gases de combustión.

Los requerimientos del proceso materiales y energéticos están conformados por las *Naftas* a las cuales se le separan inicialmente los butanos y posteriormente el isopentano, *Agua y Aire* para la transmisión del calor. La *energía eléctrica* y el *vapor*, forman parte de los requerimientos energéticos necesarios para llevar a cabo el proceso.

La generación energética presenta altos requerimientos de *combustible, agua y aire* para la generación tanto de electricidad como de vapor, dichos consumos forman parte del inventario del proceso.

5.3.2.2 Objetivos del estudio

El objetivo principal de este caso de estudio, fue evaluar el desempeño ambiental del proceso de separación de Isopentano de una corriente de Nafta proveniente del tratamiento de hidrocarburos, a través del perfil ambiental de diferentes alternativas de producción de energía, las cuales fueron comparadas para la elección de la mejor(es) alternativa(s).

El objetivo principal se consiguió a partir del desarrollo de los objetivos específicos que se describen a continuación:

- ✓ Desarrollo de la memoria de cálculo del proceso, a través del modelo y la interfaz de transferencia.
- ✓ Evaluación del proceso en términos de su viabilidad ambiental aplicando diferentes criterios y niveles de evaluación ambiental.
- ✓ Evaluación del Perfil Ambiental del Proceso para diferentes alternativas de materias primas y operaciones en el proceso.
- ✓ Comparación y elección de la mejor alternativa del proceso.

5.3.2.4 Alcances

En términos del análisis del proceso, se estudiaron los subsistemas de separación de IP y de generación energética. Con respecto a la evaluación ambiental, se decidió llegar hasta la obtención de la alternativa(s) que presente(n) el mejor comportamiento ambiental en los cuatro niveles de detalle de la evaluación ambiental (emisión, destino, efectos y daños). Así como dos diferentes niveles de diferenciación espacial (local, global). Los siguientes apartados describen los aspectos que se tuvieron en cuenta a la hora de definir los criterios de evaluación del proceso.

Determinación del nivel de evaluación ambiental.

La incidencia ambiental del proceso en estudio, fue analizada en los cuatro niveles de evaluación, teniendo en cuenta que para este proceso, existe una marcada importancia, no solo en términos de las emisiones, sino también de los efectos y daños.

Nivel de la diferenciación espacial.

Para la evaluación del destino, riesgos e impactos, se han de tener en cuenta los niveles local y global. Estos niveles se basan en la configuración de los entornos definidos en la metodología.

Definición de las fronteras del sistema.

El sistema en estudio comprende el proceso de separación de Isopentano por medio de dos columnas de destilación y la generación de energía. De acuerdo con la metodología propuesta, se consideran las fronteras del sistema a partir de la entrada de materias primas, la separación y la generación de energía. (PPGE).

Información básica para el análisis del proceso

Esta información consta de tres aspectos diferenciados: diagramas del proceso, corrientes involucradas, y etapas del proceso. A continuación, se describen cada uno de estos aspectos y los elementos que los conforman.

✓ Diagramas del proceso.

Como se mencionó en el apartado anterior, el proceso en estudio se concibió como un sistema comprendido por dos subsistemas. El subsistema de separación o subsistema 1 y la generación energética (subsistema 2). Esquemáticamente, el sistema general y los subsistemas que se han definido para el proceso se presentan en las Figura 5.30, 5.31 y 5.32.

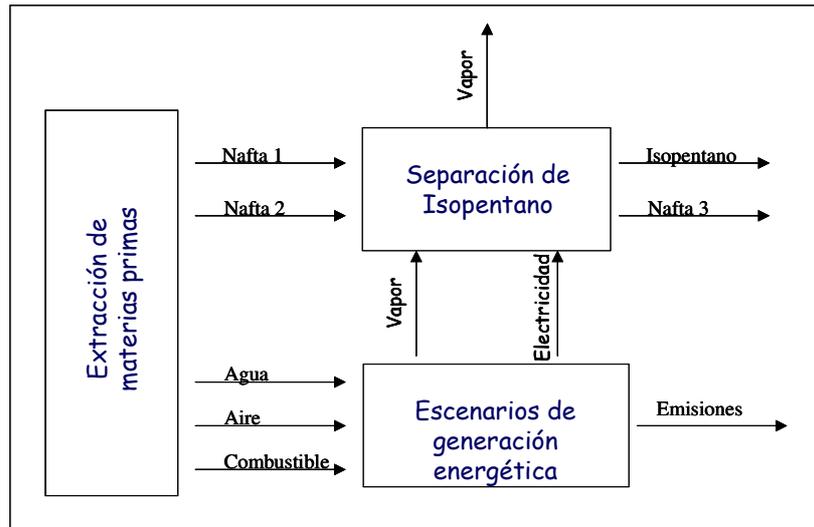


Figura 5.30 Diagrama del sistema general de separación de Isopentano

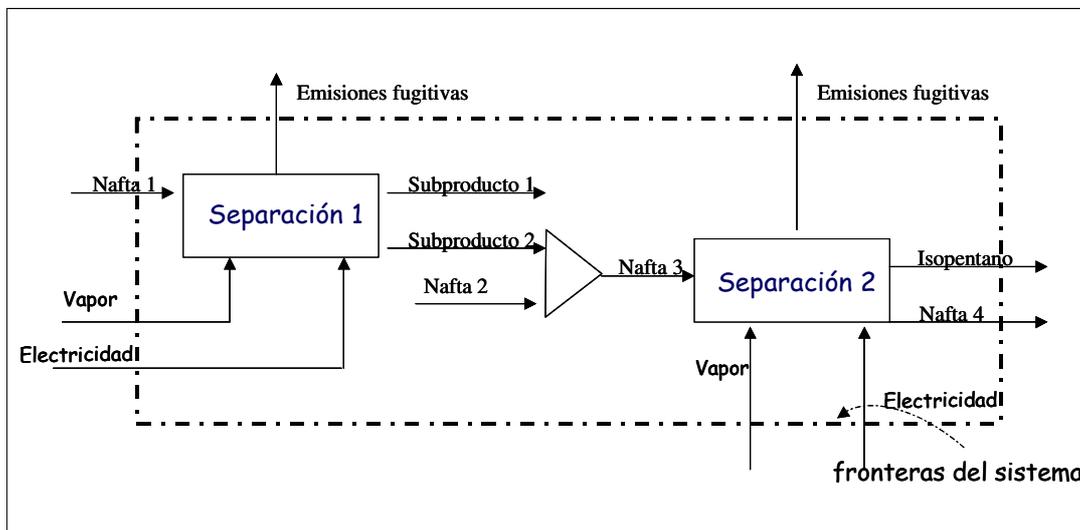


Figura 5.31 Diagrama del subsistema de separación en el proceso general

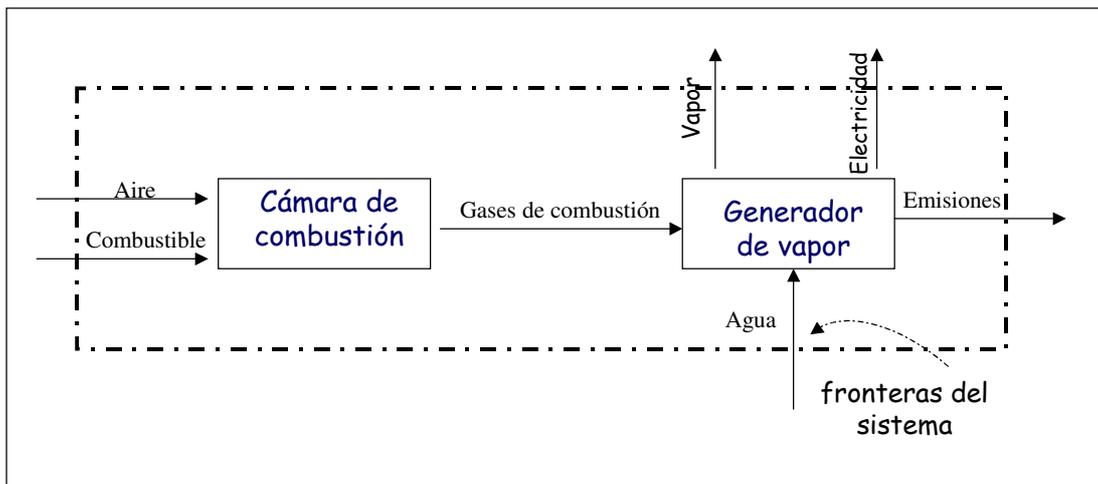


Figura 5.32 Subsistema de generación de energía.

✓ Corrientes involucradas en el proceso

Las corrientes tenidas en cuenta diferenciadas en corrientes de entrada y salida tal como se muestran en la Tabla 5.28.

Tabla 5.28 Corrientes de proceso tenidas en cuenta para el análisis

<i>Corrientes de proceso</i>	
Entrada	Salida
Nafta 1	Isopentano (89%)
Nafta 2	Nafta 4 (11% de IP)
Gas Natural	Subproducto 1 (89% de Butanos)
Gasoil pesado desulfurado	Emisiones fugitivas (Mezcla N1+N2)
Agua	Gases de combustión
Aire	
Vapor (alta, media y baja)	
Electricidad	

✓ Etapas del proceso (operaciones)

A continuación se presentan las etapas (operaciones) del proceso con una breve descripción, sus características más importantes y las condiciones de operación:

Separación. La separación se lleva a cabo en dos columnas de destilación, la primera de ellas separa los butanos de la Nafta 1. En la segunda columna, una vez se ha mezclado la salida por fondos de la primera columna con la Nafta 2, se separa el IP, recuperándolo para almacenamiento y la Nafta se envía a una etapa posterior. Esta etapa presenta un alto consumo energético no sólo en términos eléctricos, sino también térmico, puesto que el consumo de vapor es elevado.

Mezclado. El mezclado se realiza en un mezclador convencional a donde llegan una corriente de Nafta a la que se le ha retirado gran parte de los butanos, y una corriente de Nafta sin tratamiento previo, para ser homogeneizadas y enviadas a la segunda columna de destilación.

Transmisión de calor. La transmisión de calor se realiza por medio de intercambiadores de calor, algunas veces aprovechando la energía de corrientes del proceso, y otras veces utilizando vapor generado específicamente para este propósito.

Almacenamiento. El almacenamiento se realiza en tanques o depósitos que presentan unas condiciones específicas de temperatura y presión.

Combustión. La combustión es utilizada para la generación energética y en el proceso original se lleva a cabo en un cámara de combustión previa a la turbina de gas.

Condensación (laminación y expansión de vapor). La condensación de vapor, por medio de laminación y/o expansión, se utiliza para la obtención del vapor a las condiciones requeridas, y después de ser utilizado en la producción de electricidad.

5.3.3 Modelo del proceso y transferencia de información.

5.3.3.1 Modelo del proceso a partir de datos reales y condiciones de operación establecidas.

El diagrama de flujo de los procesos de separación y generación energética generados en la herramienta de simulación se presentan en la Figuras 5.33 y 5.34, y se describen seguidamente.

La corriente inicial de Nafta, que aquí denominaremos Nafta 1, es alimentada a la columna 1 (613-c-8) previo aumento de su temperatura, para aprovechar la energía de la corriente de fondos de esta columna. Una vez en la columna, se separan los butanos de la Nafta y el producto de cabeza de esta columna (LPG) es almacenado, mientras que el producto de fondos se alimenta al mezclador 1 (MIX) junto con la Nafta 2, para generar la mezcla de Nafta (Nafta 3) que es alimentada a la columna 2, igualmente esta corriente es precalentada.

En la columna 2 (618-C2), se separa el Isopentano, que sale por cabeza con una composición aproximada de 89% en peso. El producto de fondo (Nafta 4) se envía a una línea de proceso independiente, para que continúe su transformación.

La generación energética por su parte, se desarrolla en cercanías de la planta desisopentanizadora, y utiliza *gas natural* o *Gasoil pesado de vacío desulfurado*, dependiendo casi exclusivamente del aspecto económico. En la cámara de combustión de la turbina, se alimenta el combustible y el aire, en una proporción determinada que permita la combustión. Los gases de combustión pasan a la turbina donde se produce la electricidad y se envían los gases resultantes a la caldera de recuperación donde se alimenta el agua para producir el vapor. Para la simulación del proceso mediante el software Hysys.Plant®, se utilizó el “entorno de columna” como de la simulación del sistema.

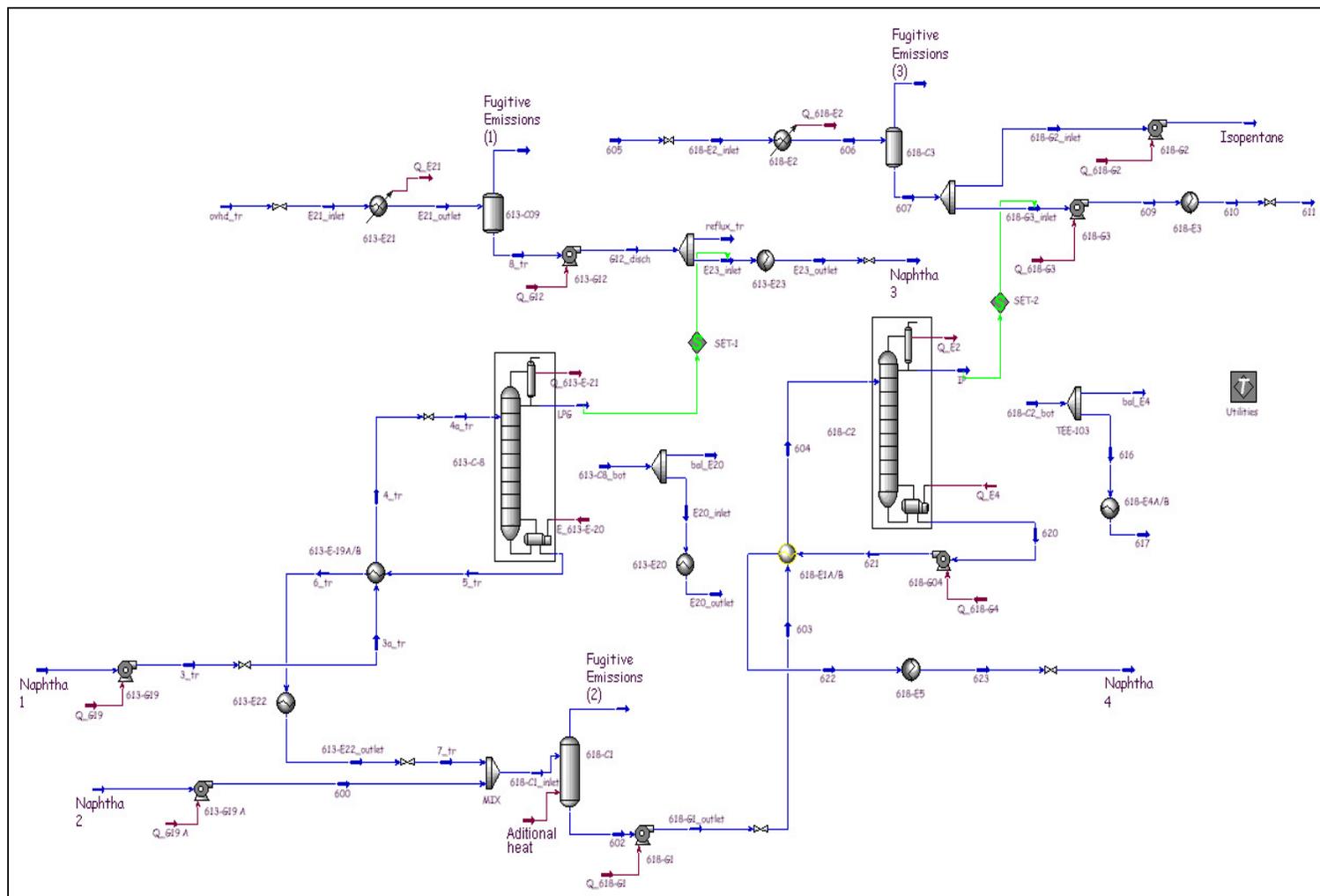


Figura 5.33. Diagrama de flujo del proceso de separación.

5.3.3.2 Memoria de cálculo del proceso

Un aspecto novedoso en la transferencia de información, es el desarrollo de una extensión en la herramienta de simulación, que permitió la visualización de las cargas ambientales en las diferentes corrientes del modelo simulado.

El resultado de la extensión fue la inclusión en la simulación del valor de las cargas ambientales de las diferentes corrientes. La extensión puede contener las características y elementos deseados, y su desarrollo se divide en dos partes: 1) creación de la ventana de visualización y 2) la programación de los datos de interés.

Se realizaron dos extensiones con diferentes características de programación, pero con la misma funcionalidad, la de facilitar la transferencia de información entre Excel y Hysys.Plant.

Como resultado de esta integración, se crearon al interior de las simulaciones desarrolladas en Hysys, dos ventanas con diferentes características: la primera (Figura 5.35), hace posible la elección de corrientes, proporciona información general de éstas y tiene definida diferentes cargas ambientales (CO₂, NO_x, etcétera). La segunda (Figura 5.36), posee las mismas características que la anterior, pero se diferencia en el lugar donde deben situarse los valores de las cargas ambientales. En la primera, la tabla destinada a las emisiones tiene definidas todas las cargas deseadas como *User Variables*, y en cambio en la segunda ventana las cargas no están definidas, sino que se define una matriz, con el fin que la transferencia de información entre Excel y Hysys.Plant se realice allí.

Un aspecto importante a tener en cuenta, es que las dos extensiones han sido programadas en diferentes lenguajes: C++ para la primera extensión y Visual Basic para la segunda.

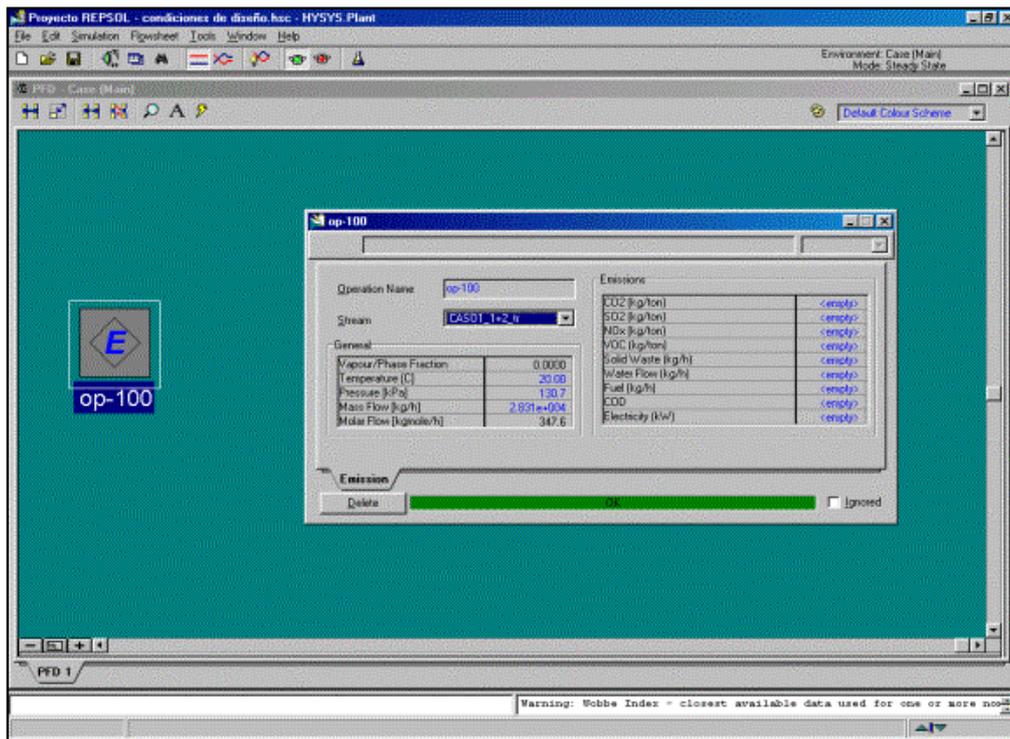


Figura 5.35. Extensión de la transferencia programada en lenguaje C++.

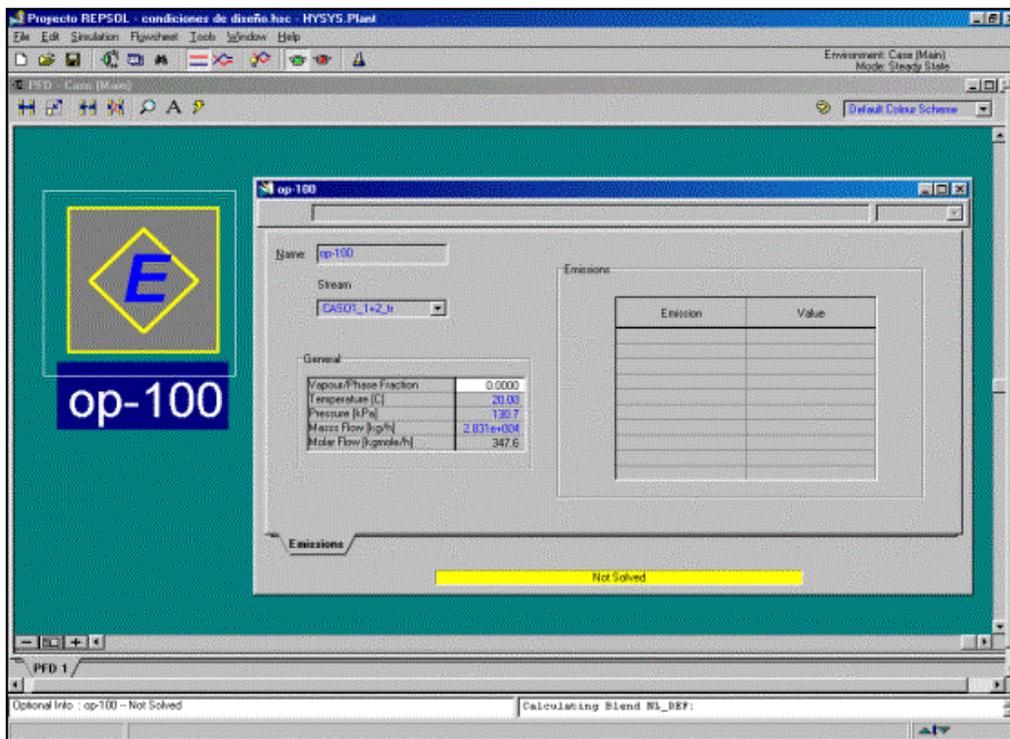


Figura 5.36. Extensión en Visual Basic.

Las ventanas creadas en el entorno de simulación del proceso -de manera que se pudieran incluir las cargas ambientales-, fue satisfactoria, si embargo, la aplicación de las extensiones a la

fase de transferencia de información en la evaluación del proceso, presentó algunos inconvenientes, debido al hecho de que cada corriente debía ser programada en un módulo diferente con el consecuente coste en tiempo de programación.

Transferencia de información.

La transferencia de información se realizó en concordancia con lo propuesto en el desarrollo metodológico presentado en el capítulo cuarto. En este caso específico, la información de salida generada por la simulación, se transfirió a una hoja de cálculo (Microsoft Excel®) a través de macros programados en Visual Basic

En la Figura 5.37, se muestra parte de la interfaz de transferencia, que posteriormente es utilizada para la creación de la memoria de cálculo del análisis, que es evidentemente, la base para la evaluación técnica y ambiental del proceso. Las Tablas 5.29 y 5.30 presentan la información importada del modelo (extraída a través de la interfaz), que conforma la memoria de cálculo y permite iniciar la evaluación.

Volcado a Hysys		Volcado a Excel																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Nafta 1</th> </tr> <tr> <th>Component</th> <th>Massic Fraccion</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>i - C4</td><td>0,0030</td></tr> <tr><td>n - C4</td><td>0,0234</td></tr> <tr><td>i - C5</td><td>0,1969</td></tr> <tr><td>n - C5</td><td>0,2179</td></tr> <tr><td>Ciclopentano</td><td>0,0069</td></tr> <tr><td>22 - Mbutano</td><td>0,0068</td></tr> <tr><td>23 - Mbutano</td><td>0,0090</td></tr> <tr><td>2 - Mpentano</td><td>0,0558</td></tr> <tr><td>3 - Mpentano</td><td>0,0295</td></tr> <tr><td>n - C6</td><td>0,0897</td></tr> <tr><td>Mciclopentano</td><td>0,0130</td></tr> <tr><td>Ciclohexano</td><td>0,0154</td></tr> <tr><td>Benzeno</td><td>0,0186</td></tr> <tr><td>NBP(0)85*</td><td>0,0499</td></tr> <tr><td>NBP(0)93*</td><td>0,0339</td></tr> <tr><td>NBP(0)101*</td><td>0,0312</td></tr> <tr><td>NBP(0)109*</td><td>0,0306</td></tr> <tr><td>NBP(0)118*</td><td>0,0314</td></tr> <tr><td>NBP(0)126*</td><td>0,0347</td></tr> <tr><td>NBP(0)134*</td><td>0,0331</td></tr> <tr><td>NBP(0)85141*</td><td>0,0198</td></tr> <tr><td>NBP(0)150*</td><td>0,0157</td></tr> <tr><td>NBP(0)85158*</td><td>0,0134</td></tr> <tr><td>NBP(0)166*</td><td>0,0108</td></tr> <tr><td>NBP(0)175*</td><td>0,0096</td></tr> <tr><td>NBP(1)83*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(1)90*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(1)97*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(1)103*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>Total</td><td>1,0000</td></tr> <tr><td>Mass Flow (kg/h)</td><td>28300</td></tr> <tr><td>T (°C)</td><td>20,0</td></tr> <tr><td>P (KPa)</td><td>130,7</td></tr> </tbody> </table>		Nafta 1		Component	Massic Fraccion	i - C4	0,0030	n - C4	0,0234	i - C5	0,1969	n - C5	0,2179	Ciclopentano	0,0069	22 - Mbutano	0,0068	23 - Mbutano	0,0090	2 - Mpentano	0,0558	3 - Mpentano	0,0295	n - C6	0,0897	Mciclopentano	0,0130	Ciclohexano	0,0154	Benzeno	0,0186	NBP(0)85*	0,0499	NBP(0)93*	0,0339	NBP(0)101*	0,0312	NBP(0)109*	0,0306	NBP(0)118*	0,0314	NBP(0)126*	0,0347	NBP(0)134*	0,0331	NBP(0)85141*	0,0198	NBP(0)150*	0,0157	NBP(0)85158*	0,0134	NBP(0)166*	0,0108	NBP(0)175*	0,0096	NBP(1)83*	0,0000	NBP(1)90*	0,0000	NBP(1)97*	0,0000	NBP(1)103*	0,0000	Total	1,0000	Mass Flow (kg/h)	28300	T (°C)	20,0	P (KPa)	130,7	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Nafta 2</th> </tr> <tr> <th>Component</th> <th>Massic Fraccion</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>i - C4</td><td>0,0006</td></tr> <tr><td>n - C4</td><td>0,0073</td></tr> <tr><td>i - C5</td><td>0,1480</td></tr> <tr><td>n - C5</td><td>0,1638</td></tr> <tr><td>Ciclopentano</td><td>0,0168</td></tr> <tr><td>22 - Mbutano</td><td>0,0029</td></tr> <tr><td>23 - Mbutano</td><td>0,0185</td></tr> <tr><td>2 - Mpentano</td><td>0,1024</td></tr> <tr><td>3 - Mpentano</td><td>0,0556</td></tr> <tr><td>n - C6</td><td>0,1480</td></tr> <tr><td>Mciclopentano</td><td>0,0769</td></tr> <tr><td>Ciclohexano</td><td>0,0344</td></tr> <tr><td>Benzeno</td><td>0,0190</td></tr> <tr><td>NBP(0)85*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)93*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)101*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)109*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)118*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)126*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)134*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)85141*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)150*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)85158*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)166*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)175*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(1)83*</td><td>0,1043</td></tr> <tr><td>NBP(1)90*</td><td>0,0348</td></tr> <tr><td>NBP(1)97*</td><td>0,0334</td></tr> <tr><td>NBP(1)103*</td><td>0,0333</td></tr> <tr><td>Total</td><td>1,0000</td></tr> <tr><td>Mass Flow (kg/h)</td><td>71500</td></tr> <tr><td>T (°C)</td><td>43,0</td></tr> <tr><td>P (KPa)</td><td>336,7</td></tr> </tbody> </table>		Nafta 2		Component	Massic Fraccion	i - C4	0,0006	n - C4	0,0073	i - C5	0,1480	n - C5	0,1638	Ciclopentano	0,0168	22 - Mbutano	0,0029	23 - Mbutano	0,0185	2 - Mpentano	0,1024	3 - Mpentano	0,0556	n - C6	0,1480	Mciclopentano	0,0769	Ciclohexano	0,0344	Benzeno	0,0190	NBP(0)85*	0,0000	NBP(0)93*	0,0000	NBP(0)101*	0,0000	NBP(0)109*	0,0000	NBP(0)118*	0,0000	NBP(0)126*	0,0000	NBP(0)134*	0,0000	NBP(0)85141*	0,0000	NBP(0)150*	0,0000	NBP(0)85158*	0,0000	NBP(0)166*	0,0000	NBP(0)175*	0,0000	NBP(1)83*	0,1043	NBP(1)90*	0,0348	NBP(1)97*	0,0334	NBP(1)103*	0,0333	Total	1,0000	Mass Flow (kg/h)	71500	T (°C)	43,0	P (KPa)	336,7	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Consumo de energía</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>613-619</td><td></td></tr> <tr><td>power (KW)</td><td>15,51</td></tr> <tr><td>613-612</td><td></td></tr> <tr><td>power (KW)</td><td>15,32</td></tr> <tr><td>613-E21</td><td></td></tr> <tr><td>n° fans</td><td>14</td></tr> <tr><td>power (KW)</td><td>87,92</td></tr> <tr><td>618-G3</td><td></td></tr> <tr><td>power (KW)</td><td>19,92</td></tr> <tr><td>618-G4</td><td></td></tr> <tr><td>power (KW)</td><td>71,16</td></tr> <tr><td>618-E2</td><td></td></tr> <tr><td>n° fans</td><td>14</td></tr> <tr><td>power (KW)</td><td>243,46</td></tr> <tr><td>Total Electricity Consumption of U-613</td><td></td></tr> <tr><td>power (KW)</td><td>118,75</td></tr> <tr><td>Total Electricity Consumption of U-618</td><td></td></tr> <tr><td>power (KW)</td><td>430,83</td></tr> <tr><td>Electric Consumption of Auxiliar Systems</td><td></td></tr> <tr><td>power (KW)</td><td>11,86</td></tr> <tr><td>Total Electricity Consumption of Plant</td><td></td></tr> <tr><td>power (KW)</td><td>561,45</td></tr> <tr><td>Total Steam Consumption</td><td></td></tr> <tr><td>power (KW)</td><td>20047,63</td></tr> </tbody> </table>		Consumo de energía		613-619		power (KW)	15,51	613-612		power (KW)	15,32	613-E21		n° fans	14	power (KW)	87,92	618-G3		power (KW)	19,92	618-G4		power (KW)	71,16	618-E2		n° fans	14	power (KW)	243,46	Total Electricity Consumption of U-613		power (KW)	118,75	Total Electricity Consumption of U-618		power (KW)	430,83	Electric Consumption of Auxiliar Systems		power (KW)	11,86	Total Electricity Consumption of Plant		power (KW)	561,45	Total Steam Consumption		power (KW)	20047,63	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Subproducto 1</th> </tr> <tr> <th>Component</th> <th>Massic Fraccion</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>i - C4</td><td>0,1624</td></tr> <tr><td>n - C4</td><td>0,8365</td></tr> <tr><td>i - C5</td><td>0,0011</td></tr> <tr><td>n - C5</td><td>0,0001</td></tr> <tr><td>Ciclopentano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>22 - Mbutano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>23 - Mbutano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>2 - Mpentano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>3 - Mpentano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>n - C6</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>Mciclopentano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>Ciclohexano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>Benzeno</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)85*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)93*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)101*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)109*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)118*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)126*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)134*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)85141*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)150*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)85158*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)166*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)175*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(1)83*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(1)90*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(1)97*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(1)103*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>Total</td><td>1,0000</td></tr> <tr><td>Mass Flow (kg/h)</td><td>510</td></tr> <tr><td>T (°C)</td><td>47,7</td></tr> <tr><td>P (KPa)</td><td>493,6</td></tr> </tbody> </table>		Subproducto 1		Component	Massic Fraccion	i - C4	0,1624	n - C4	0,8365	i - C5	0,0011	n - C5	0,0001	Ciclopentano	0,0000	22 - Mbutano	0,0000	23 - Mbutano	0,0000	2 - Mpentano	0,0000	3 - Mpentano	0,0000	n - C6	0,0000	Mciclopentano	0,0000	Ciclohexano	0,0000	Benzeno	0,0000	NBP(0)85*	0,0000	NBP(0)93*	0,0000	NBP(0)101*	0,0000	NBP(0)109*	0,0000	NBP(0)118*	0,0000	NBP(0)126*	0,0000	NBP(0)134*	0,0000	NBP(0)85141*	0,0000	NBP(0)150*	0,0000	NBP(0)85158*	0,0000	NBP(0)166*	0,0000	NBP(0)175*	0,0000	NBP(1)83*	0,0000	NBP(1)90*	0,0000	NBP(1)97*	0,0000	NBP(1)103*	0,0000	Total	1,0000	Mass Flow (kg/h)	510	T (°C)	47,7	P (KPa)	493,6	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">Isopentano</th> </tr> <tr> <th>Component</th> <th>Massic Fraccion</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>i - C4</td><td>0,0028</td></tr> <tr><td>n - C4</td><td>0,0458</td></tr> <tr><td>i - C5</td><td>0,8900</td></tr> <tr><td>n - C5</td><td>0,0614</td></tr> <tr><td>Ciclopentano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>22 - Mbutano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>23 - Mbutano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>2 - Mpentano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>3 - Mpentano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>n - C6</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>Mciclopentano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>Ciclohexano</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>Benzeno</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)85*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)93*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)101*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)109*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)118*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)126*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)134*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)85141*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)150*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)85158*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)166*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(0)175*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(1)83*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(1)90*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(1)97*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>NBP(1)103*</td><td>0,0000</td></tr> <tr><td>Total</td><td>1,0000</td></tr> <tr><td>Mass Flow (kg/h)</td><td>16075</td></tr> <tr><td>T (°C)</td><td>47,7</td></tr> <tr><td>P (KPa)</td><td>204,3</td></tr> </tbody> </table>		Isopentano		Component	Massic Fraccion	i - C4	0,0028	n - C4	0,0458	i - C5	0,8900	n - C5	0,0614	Ciclopentano	0,0000	22 - Mbutano	0,0000	23 - Mbutano	0,0000	2 - Mpentano	0,0000	3 - Mpentano	0,0000	n - C6	0,0000	Mciclopentano	0,0000	Ciclohexano	0,0000	Benzeno	0,0000	NBP(0)85*	0,0000	NBP(0)93*	0,0000	NBP(0)101*	0,0000	NBP(0)109*	0,0000	NBP(0)118*	0,0000	NBP(0)126*	0,0000	NBP(0)134*	0,0000	NBP(0)85141*	0,0000	NBP(0)150*	0,0000	NBP(0)85158*	0,0000	NBP(0)166*	0,0000	NBP(0)175*	0,0000	NBP(1)83*	0,0000	NBP(1)90*	0,0000	NBP(1)97*	0,0000	NBP(1)103*	0,0000	Total	1,0000	Mass Flow (kg/h)	16075	T (°C)	47,7	P (KPa)	204,3
Nafta 1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Component	Massic Fraccion																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
i - C4	0,0030																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
n - C4	0,0234																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
i - C5	0,1969																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
n - C5	0,2179																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Ciclopentano	0,0069																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
22 - Mbutano	0,0068																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
23 - Mbutano	0,0090																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
2 - Mpentano	0,0558																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
3 - Mpentano	0,0295																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
n - C6	0,0897																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Mciclopentano	0,0130																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Ciclohexano	0,0154																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Benzeno	0,0186																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)85*	0,0499																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)93*	0,0339																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)101*	0,0312																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)109*	0,0306																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)118*	0,0314																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)126*	0,0347																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)134*	0,0331																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)85141*	0,0198																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)150*	0,0157																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)85158*	0,0134																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)166*	0,0108																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)175*	0,0096																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)83*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)90*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)97*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)103*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Total	1,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Mass Flow (kg/h)	28300																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
T (°C)	20,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
P (KPa)	130,7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Nafta 2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Component	Massic Fraccion																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
i - C4	0,0006																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
n - C4	0,0073																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
i - C5	0,1480																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
n - C5	0,1638																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Ciclopentano	0,0168																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
22 - Mbutano	0,0029																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
23 - Mbutano	0,0185																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
2 - Mpentano	0,1024																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
3 - Mpentano	0,0556																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
n - C6	0,1480																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Mciclopentano	0,0769																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Ciclohexano	0,0344																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Benzeno	0,0190																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)85*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)93*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)101*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)109*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)118*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)126*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)134*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)85141*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)150*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)85158*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)166*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)175*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)83*	0,1043																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)90*	0,0348																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)97*	0,0334																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)103*	0,0333																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Total	1,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Mass Flow (kg/h)	71500																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
T (°C)	43,0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
P (KPa)	336,7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Consumo de energía																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
613-619																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
power (KW)	15,51																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
613-612																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
power (KW)	15,32																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
613-E21																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
n° fans	14																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
power (KW)	87,92																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
618-G3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
power (KW)	19,92																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
618-G4																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
power (KW)	71,16																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
618-E2																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
n° fans	14																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
power (KW)	243,46																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Total Electricity Consumption of U-613																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
power (KW)	118,75																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Total Electricity Consumption of U-618																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
power (KW)	430,83																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Electric Consumption of Auxiliar Systems																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
power (KW)	11,86																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Total Electricity Consumption of Plant																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
power (KW)	561,45																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Total Steam Consumption																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
power (KW)	20047,63																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Subproducto 1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Component	Massic Fraccion																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
i - C4	0,1624																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
n - C4	0,8365																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
i - C5	0,0011																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
n - C5	0,0001																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Ciclopentano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
22 - Mbutano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
23 - Mbutano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
2 - Mpentano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
3 - Mpentano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
n - C6	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Mciclopentano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Ciclohexano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Benzeno	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)85*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)93*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)101*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)109*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)118*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)126*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)134*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)85141*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)150*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)85158*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)166*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)175*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)83*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)90*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)97*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)103*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Total	1,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Mass Flow (kg/h)	510																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
T (°C)	47,7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
P (KPa)	493,6																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Isopentano																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																			
Component	Massic Fraccion																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
i - C4	0,0028																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
n - C4	0,0458																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
i - C5	0,8900																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
n - C5	0,0614																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Ciclopentano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
22 - Mbutano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
23 - Mbutano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
2 - Mpentano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
3 - Mpentano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
n - C6	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Mciclopentano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Ciclohexano	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Benzeno	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)85*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)93*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)101*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)109*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)118*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)126*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)134*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)85141*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)150*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)85158*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)166*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(0)175*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)83*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)90*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)97*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
NBP(1)103*	0,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Total	1,0000																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
Mass Flow (kg/h)	16075																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
T (°C)	47,7																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
P (KPa)	204,3																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		

Figura 5.37 Interfaz proceso de separación

Tabla 5.29 Consumos de materias primas y recursos naturales

	Operación del Proceso	Consumo (kg/h)
Materias primas	Columna 1	2.83E+04
	Columna 2	7.15E+04
Total materias primas		9.98E+04
Agua	Equipo 613-E22	2.34E+03
	Equipo 613-E23	1.60E+02
	Equipo 618-E3	6.84E+04
	Equipo 618-E5	9.03E+03
	Torre de Refrigeración	2.51E+03
<i>Total consumo de agua</i>		8.25E+04
Agua de reposición		6.60E+04

Tabla 5.30 Consumos de recursos energéticos

Recurso energético	Operación del Proceso	Consumo (KW)	(KW/Kg alimento)
Vapor	Calentador de 613-C8	1.61E+03	5.80E+01
	Calentador de 618-C2	1.84E+04	6.65E+02
Total vapor		2.00E+04	7.23E+02
Electricidad	bomba 613-G19	1.55E+01	5.60E-01
	bomba 613-G12	1.53E+01	5.53E-01
	bomba 618-G19 A	1.33E+01	4.78E-01
	bomba 618-G1	3.14E+01	1.13E+00
	bomba 618-G2	5.16E+01	1.86E+00
	bomba 618-G3	1.99E+01	7.19E-01
	bomba 618-G4	7.12E+01	2.57E+00
	Bomba/torre de Refrigeración	1.19E+01	4.28E-01
	sistema refrigerante U-618	2.43E+02	8.78E+00
sistema refrigerante U-613	8.79E+01	3.17E+00	
Total electricidad	-	5.61E+02	2.03E+01
Energía total	-	2.06E+04	7.43E+02

La información contenida en las Tablas 5.29 y 5.30, sirve de base para determinar el inventario y definir los escenarios a evaluar.

5.3.4 Análisis técnico y económico del proceso de separación de Isopentano

5.3.4.1 Escenarios evaluados

A partir del proceso general, se definieron ocho escenarios o alternativas de producción, en las cuales se mantuvo invariable la separación de IP por destilación, pero donde varió la forma de generación energética. Los escenarios considerados para la generación de electricidad y vapor se presentan en la Tabla 5.31.

Tabla 5.31 Escenarios para la evaluación ambiental del proceso

Escenario	Generación Electricidad	Generación Vapor	Combustibles
1	Cogeneración	Laminación de vapor (LV)	Gas Natural
2	Cogeneración	Expansión de vapor (EV)	Gas Natural
3	Cogeneración	LV con recuperación de calor	Gas Natural
4	Cogeneración	EV con recuperación de calor	Gas Natural
5	Expansión de vapor caldera (EVC)	Combustión de fuel oil y fuel gas	90,9% Fuel Oil 9,1% Fuel Gas
6	Matriz España	Laminación de vapor de caldera (LVC)	86,7% Fuel Oil 8,7% Fuel Gas 0,4% Gas Natural 0,7% Crudo 3,6% Carbón
7	EVC y Matriz España	Caldera con recuperación de calor	75,5% Fuel Oil 7,5% Fuel Gas 1,5% Gas Natural 2,6% Crudo 13,9% Carbón
8	Matriz España	LVC y recuperación de calor	58,0% Fuel Oil 5,8% Fuel Gas 3,0% Gas Natural 5,3% Crudo 27,9% Carbón

En la tabla anterior, los escenarios representan las diferentes alternativas de producción de energía identificadas para el proceso de producción. Sin perder de vista que es un proceso existente y que forma parte de un proceso de mayor cobertura, la decisión de mantener la etapa de separación igual en todos los escenarios, se basa en la dificultad técnica de realizar cambios para todo el proceso.

Los escenarios del 1 al 4 como se puede ver en la tabla anterior, representan la producción de energía a través de co-generación por laminación y expansión, utilizando gas natural como combustible. En estos cuatro escenarios, también se evalúa el ahorro energético por medio de la transmisión de energía de procesos o etapas diferentes al proceso estudiado.

Por otra parte, los escenarios 5 al 8 representan una variación de las condiciones de operación y por consiguiente, se evaluaron alternativas tales como: 1) diferencias en combustibles, 2) diferencias en los equipos de generación de vapor y 3) utilización de la red nacional de electricidad.

5.3.4.2 Análisis técnico

La caracterización técnica consistió en la especificación y descripción de cada uno de los equipos que configuran los escenarios junto con las corrientes de proceso y las especies químicas presentes.

Para cada uno de los equipos se detallaron las variables más representativas, tales como temperatura y presión de operación, eficiencias, pérdidas de carga y flujos energéticos asociados, además de las corrientes de entrada y salida y su conexión con los equipos restantes. La Tabla 5.32 presenta un resumen de la caracterización técnica para los escenarios evaluados.

Tabla 5.32 Resumen general de la caracterización técnica.

<i>Elemento técnico</i>		<i>Escenarios</i>							
		1	2	3	4	5	6	7	8
Corrientes		26	25	22	21	25	26	21	22
Equipos		15	14	12	11	13	14	10	11
Tipo de equipo	Mezclador	1	1	1	1	1	1	1	1
	Reactor	1	1	1	1	1	1	1	1
	Turbina de expansión	1	3	1	2	2	-	1	-
	Intercambiador	4	4	4	4	4	4	4	4
	Separador de flujo	3	3	2	2	3	3	2	2
	Enfriador	3	2	2	1	2	3	1	2
	Válvula	2	-	1	-	-	2	-	1

La Tabla 5.32, permite disponer de la información relacionadas con las condiciones de operación, las especificaciones de equipos y corrientes y la configuración final del proceso. El Anexo B (sección B1), muestra los datos obtenidos para cada uno de los escenarios evaluados.

5.3.4.3 Análisis económico

El análisis se centró en la evaluación económica de los principales equipos que componen cada escenario. Los resultados finales se muestran en la Tabla 5.33 y en el Anexo B (sección B.2). Para poder efectuar dicha comparación se ha evaluado el coste del equipo unitario y el coste asociado a la corriente de operación. El primer tipo de coste se evaluó a través de la herramienta CAPCOST©Software actualizando el valor del índice de costes CEPCI [Turton et al, 1998]. Así mismo, se desarrolló un balance económico, calculando el coste de operación asociado al flujo de calor y/o vapor, [Ulrich, 1984].

En el actual análisis económico, la amortización de los equipos -considerándola como un concepto económico en el que se incluyen la pérdida de valor que sufren los activos fijos y que, por lo tanto, supone un coste para la empresa -, se consideró como la parte del coste de adquisición que se incorpora en el coste final del producto [Jiménez, 2003]

Tabla 5.33 Resumen general de la caracterización económica de equipos.

Costes	Escenarios							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Coste de equipos (\$)	1,33E+06	4,59E+06	4,59E+06	1,27E+06	1,53E+06	2,83E+05	9,65E+05	2,83E+05
Costes de producción (\$/kW)	1,38E+02	3,60E+02	3,60E+02	1,32E+01	1,31E+01	1,36E+02	1,26E+01	1,18E+01

La información de la Tabla 5.33, se representa gráficamente en la Figura 5.38, donde puede verse claramente la variación de los costes por equipos y de producción de una forma mucho más clara.

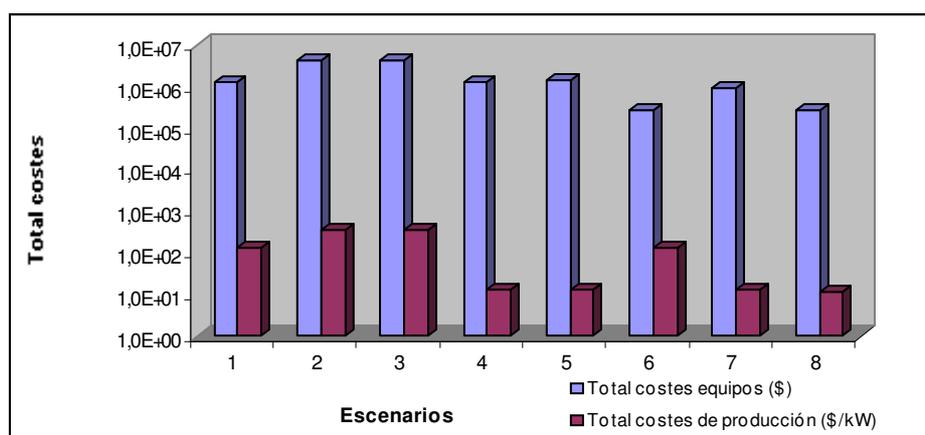


Figura 5.38. Comparación de costes en el análisis económico del proceso.

De acuerdo con la Tabla 5.33 y la Figura 5.38, las alternativas de menor coste total por equipo, son los escenarios 6 y 8, mientras que el menor coste por producción, lo presentan los escenarios 8, 7, 5 y 4 respectivamente.

5.3.5 Análisis del Inventario

En el presente apartado, se presentan los resultados del inventario del proceso en estudio. Dicho inventario se muestra en forma de eco-vector y comprende no solo el consumo de materiales por unidad funcional, sino también las descargas de sustancias a través de emisiones -fugitivas y de gases de combustión-, vertidos líquidos y residuos sólidos. La asignación de cargas estuvo basada principalmente en el rendimiento másico de productos y sub-productos.

5.3.5.1 Inventario de consumos y descargas del sistema

Como unidad funcional se tomó la producción anual de Isopentano (IP), que corresponde a 1.27E5 toneladas, aplicando criterios másicos. Este compuesto corresponde a la corriente "Isopentane" en el diagrama de la Figura 5.34. A continuación, la Tabla 5.34 muestra el inventario de flujos de entrada y salida para el escenario 1 (electricidad por cogeneración y vapor por laminación). Los resultados para los demás escenarios se muestran en el Anexo B

Tabla 5.34 flujos de materia y energía del escenario 1

<i>1 ENTRADAS</i>		
Corrientes	Caudales	Total
Gas Natural (kg/h)	2120.65	73007.75
Aire (kg/h)	35333.57	
Agua (kg/h)	35553.53	
<i>2 SALIDAS</i>		
<i>2.1 PRODUCTOS DEL SISTEMA</i>		
Electricidad Turbina a Gas (KW)	560.80	560.80
Vapor de Media Presión (kg/h)	3021.93	34837.69
Vapor de Baja Presión (Kg/h)	31815.76	
<i>2.2 EMISIONES ATMOSFERICAS</i>		
Caudal de Gases por la Chimenea (kg/h)		37453.84
Compuestos	Fracción másica	Caudal (kg/h)
N ₂	0.68747	25748.22
O ₂	0.03864	1447.10
CO ₂	0.15261	5715.65
H ₂ O	0.12121	4539.80
NOx	0.00008	3.06
Partículas	-	0.285
<i>2.3 VERTIDOS LIQUIDOS</i>		
COD (kg/l)	-	0.073

5.3.5.2 Evaluación de otras descargas puntuales

No se han observado descargas puntuales en el proceso debido a accidentes, ni ha sido posible medir las emisiones fugitivas en las instalaciones. Sin embargo, y considerando los reportes de este tipo de emisiones en la literatura, se ha supuesto una emisión fugitiva en el modelo simulado, correspondiente al uno por ciento (1%) de la Nafta alimentada.

5.3.5.3 Reporte de resultados del inventario

Una vez desarrollados todos los escenarios, y evaluadas las corrientes de entrada y salida, el siguiente paso es establecer las cargas que conforman el eco-vector. En este caso de estudio, las cargas tenidas en cuenta, se presentan en la Figura 5.39.

<u>Carga</u>	<u>Vapor</u>	<u>Electricidad</u>	<u>Separación</u>
Entradas			
Agua	--	--	--
Gas Natural	--	--	--
Fuel Oil	--	--	--
Fuel Gas	--	--	--
Carbón	--	--	--
Crudo	--	--	--
Salidas			
CO ₂	--	--	--
SO ₂	--	--	--
NO _x	--	--	--
COV's	--	--	--
COD	--	--	--

Figura 5.39. Cargas ambientales a evaluar en el inventario del proceso de separación

El informe resultado del inventario, es el primer nivel de detalle de la evaluación ambiental, con base en él, se desarrollarán los siguientes niveles en el análisis ambiental del proceso.

Con base en la unidad funcional, los balances de todos los escenarios evaluados, la Tabla 5.35 presenta el eco-vector para los escenarios evaluados. Inicialmente se describen las entradas en forma de consumo de recursos naturales, y finalmente las descargas o emisiones para cada uno de los escenarios evaluados.

Tabla 5.35. Eco-vector de cargas ambientales por escenario evaluado.

(Ton/Ton IP)	Escenarios de evaluación							
	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6	Esc 7	Esc 8
Consumos								
Agua	4,27E+00	5,89E+00	4,27E+00	4,27E+00	5,89E+00	5,94E+00	4,28E+00	4,31E+00
Gas Natural	1,32E-01	1,29E-01	1,40E-02	1,23E-02	--	5,83E-04	2,28E-04	1,13E-02
Fuel Oil	--	--	--	--	1,31E-01	1,31E-01	1,13E-02	1,13E-03
Fuel Gas	--	--	--	--	1,31E-02	1,31E-02	1,13E-03	5,45E-03
Carbón	--	--	--	--	--	5,44E-03	2,13E-03	1,03E-03
Crudo	--	--	--	--	--	1,03E-03	4,02E-04	4,31E+00
Emisiones								
CO ₂	3,57E-01	3,02E-01	3,78E-02	3,32E-02	3,97E-01	4,73E-01	4,61E-02	5,58E-02
SO ₂	--	--	--	--	5,07E-04	6,50E-04	3,69E-05	1,43E-04
Nox	--	--	--	--	--	3,31E-05	1,29E-05	3,31E-05
COV	5,22E-02	5,22E-02	5,22E-02	5,22E-02	5,22E-02	5,23E-02	5,22E-02	5,23E-02
Vap de agua	1,57E-01	1,57E-01	1,57E-01	1,57E-01	1,57E-01	1,57E-01	1,57E-01	1,57E-01
Mat Part	1,77E-05	1,54E-05	1,54E-06	1,54E-06	3,17E-04	4,38E-04	5,98E-05	1,04E-04
DQO	4,53E-06	3,92E-06	3,93E-07	3,93E-07	2,43E-06	2,87E-06	2,66E-07	3,02E-07
Resid Sól	--	--	--	--	--	3,10E-03	--	3,10E-03

La información de los consumos de la Tabla 5.35, puede verse representada gráficamente en las Figuras 5.40, y 5.41, donde se puede hacer una comparación cuantitativa del consumo de agua y combustibles respectivamente.

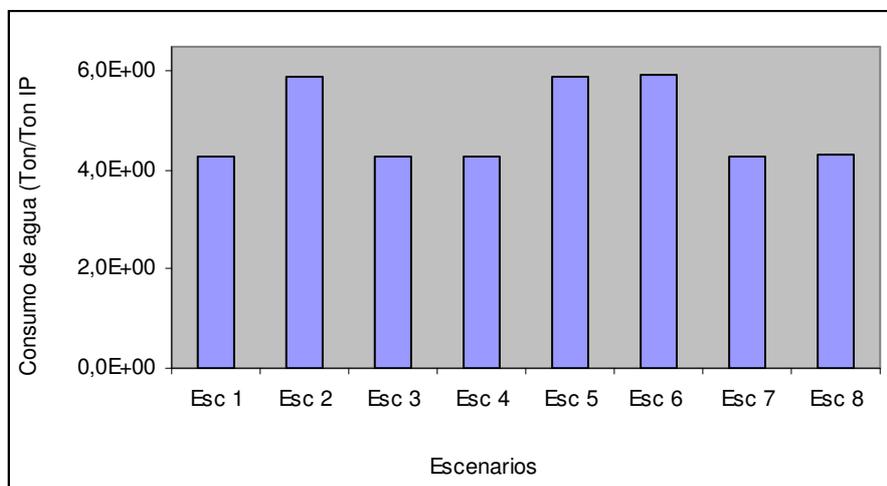


Figura 5.40 Consumo de agua por escenario.

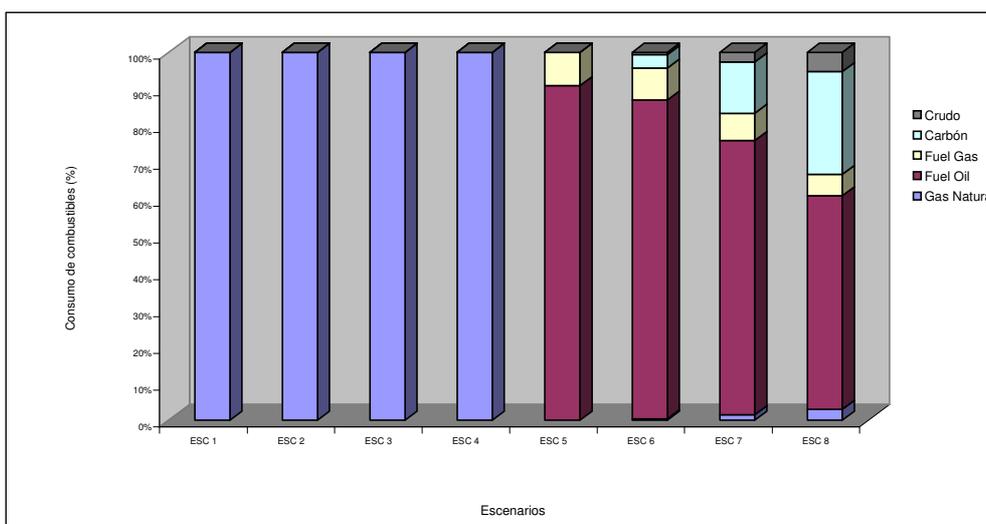


Figura 5.41 Consumo de combustibles en el proceso de separación de Isopentano.

En la figura anterior, puede verse claramente que los escenarios del 5 al 8 utilizan más de un tipo de combustible, lo que genera dificultades en la determinación de los efectos y su relación con una carga determinada.

En cuanto a las emisiones (ver Tabla 5.35), en términos generales, las sustancias que muestran una mayor descarga al aire son el dióxido de carbono y el vapor de agua. Todos los escenarios muestran una alta contribución de dichos compuestos en sus descargas, sin embargo, vale la pena considerar en forma separada las demás cargas, debido a su importancia en los efectos que

posteriormente se determinarán. La Figura 5.41 describe de manera gráfica las emisiones para la comparación de los diferentes escenarios.

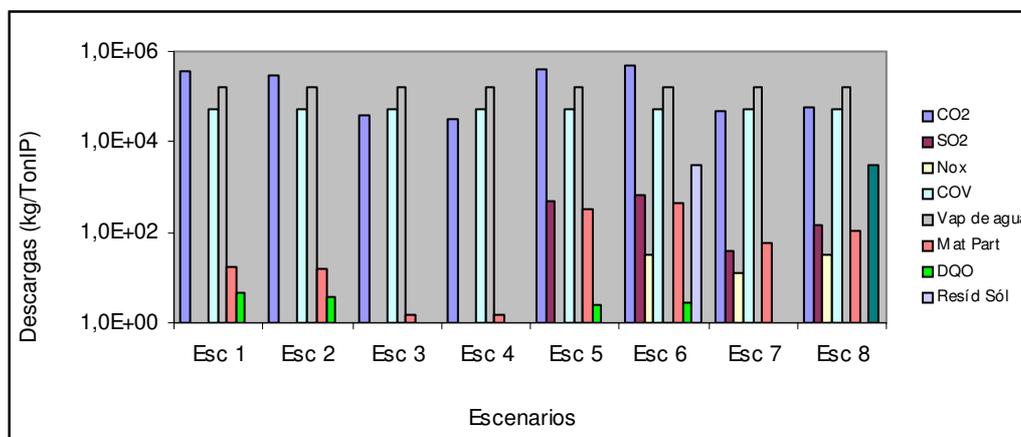


Figura 5.42 Emisiones del proceso por escenario

De acuerdo con la Figura 5.42, los escenarios que presentan una mayor contribución en la mayoría de las emisiones son el grupo conformado por los escenarios del 5 al 8. Este resultado es evidente, considerando que son los escenarios donde se utiliza una mayor variedad de combustibles y con una menor proporción de Gas Natural, situación diferente a la observada en los cuatro escenarios iniciales. Así mismo, es importante resaltar, que los escenarios 5 y 7, en los cuales el combustible principal es el Fuel Oil y donde además no se realiza recuperación de energía, son los que presentan un mayor aporte de emisión.

5.3.5.4 Análisis de los resultados del inventario

Los resultados obtenidos en la cuantificación del inventario, muestran una clara evidencia de los escenarios que presentan las mayores cargas ambientales. Dichas cargas se presentan no sólo en forma de consumo de recursos naturales, sino también como descargas. Como se describió en el apartado anterior, los escenarios que presentan un mayor aporte en cargas ambientales son los últimos cuatro (grupo del 5 al 8), sin embargo, es necesaria una evaluación en mayor detalle, de manera que puedan ser determinadas las cargas más importantes y que presenten diferencias considerables entre ellas y los escenarios.

La carga ambiental presente en mayor proporción en todos los escenarios de evaluación, es el dióxido de carbono. La Figura 5.43, muestra en forma gráfica, la variación de la descarga de dicha sustancia en ton/ton de producto, para los ocho escenarios evaluados.

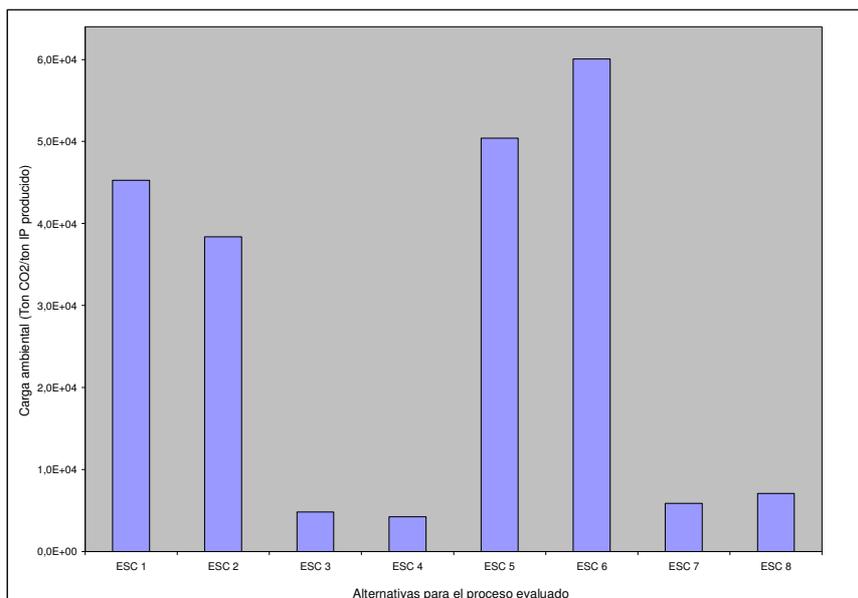


Figura 5.43. Emisión de dióxido de carbono por alternativa evaluada

Además del dióxido de carbono, están presentes otras cargas ambientales que deben ser tenidas en cuenta. Manteniendo un criterio másico de selección (Toneladas emitidas), las demás cargas ambientales que fueron tenidas en cuenta para el análisis del inventario son: los compuestos orgánicos volátiles (COV's), óxidos de nitrógeno (NO_x), y óxidos de azufre (SO₂). Los resultados de estas cargas se presentan en la Figura 5.44.

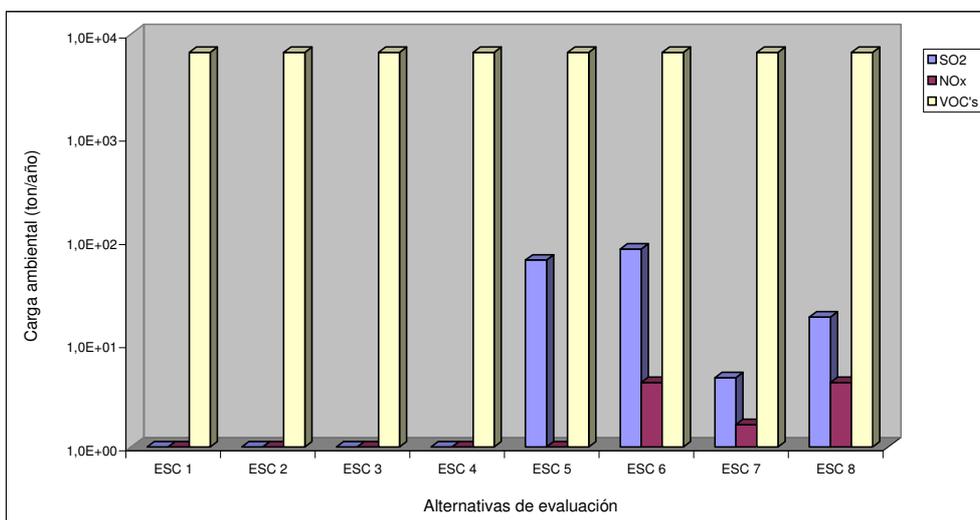


Figura 5.44. Cargas ambientales de interés para el análisis del proceso

En los escenarios 6, 7 y 8 se observan emisiones considerables de óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno, y compuestos orgánicos volátiles (COV's). Teniendo en cuenta que el objetivo de la evaluación es analizar las cargas ambientales reportadas como importantes en el análisis de

inventario, es sobre estas sustancias, que se desarrollarán las siguientes etapas de la evaluación ambiental.

La siguiente etapa del análisis ambiental, es la evaluación del destino de las sustancias descargadas en los compartimentos: aire, agua, suelo y sedimento. Sabiendo que los procedimientos de evaluación de destino tienen en cuenta, los mecanismos de transformación de las sustancias emitidas, el estudio se realizó teniendo en cuenta los compuestos que pueden ser formados por las todas las sustancias estudiadas.

En el caso de los COV's, se han contabilizado como tal, las emisiones fugitivas de las Naftas en el proceso. A su vez, los óxidos de azufre y nitrógeno cuantificados en el inventario, fueron evaluados no sólo de forma individual, sino también los contaminantes secundarios que pueden formarse a partir de estos por oxidación (NO_2 , HNO_3 , H_2SO_4), y pueden formar sales (nitratos, sulfatos). La Figura 5.45 presenta un esquema de transformación de dichos óxidos.

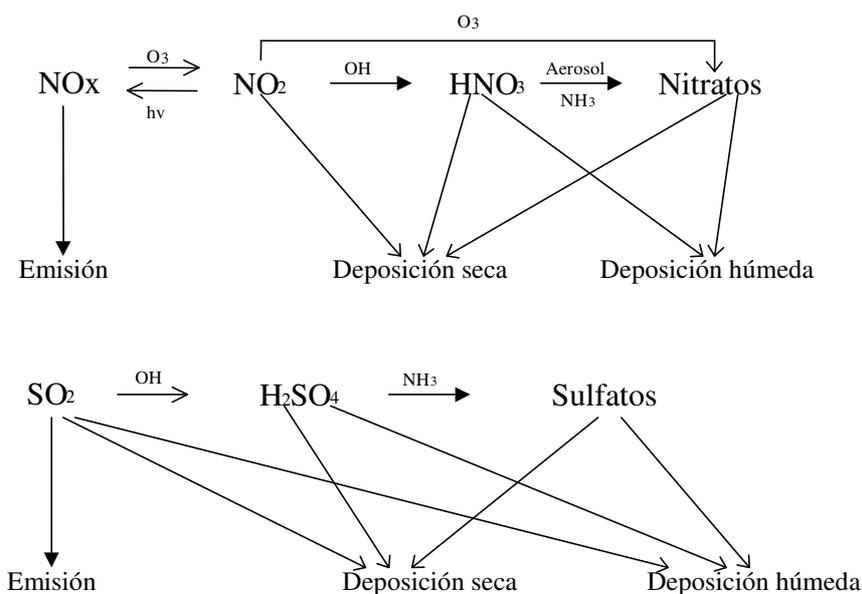


Figura 5.45. Transformación de contaminantes primarios y secundarios de óxidos de azufre y nitrógeno

La Figura 5.45, muestra los contaminantes primarios y secundarios que pueden llegar a ser formados por los óxidos de azufre y nitrógeno. La siguiente etapa del análisis ambiental, se centró en estos contaminantes, y los compuestos orgánicos volátiles.

5.3.6 Evaluación del destino y exposición

La evaluación del destino de sustancias corresponde al tercer paso de la metodología, y de acuerdo con los objetivos y alcances definidos para el actual estudio, incluye aire (con presencia de óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre), agua y sedimentos (presencia de ácidos por

deposición húmeda y seca) y suelo (presencia de sulfatos y nitratos por deposición húmeda y seca).

La evaluación del destino, se basa en el desarrollo de dos pasos: 1) la caracterización de las sustancias que serán evaluadas y 2) la caracterización del entorno donde se depositarán.

3.5.6.1 Caracterización de sustancias provenientes del inventario

Las sustancias provenientes del inventario evaluadas en la etapa anterior deben ser caracterizadas a través de sus propiedades fisicoquímicas.

El primer paso para la caracterización, es la identificación de las sustancias factibles de ser evaluadas y para las cuales se pueden identificar las propiedades que permiten su caracterización. Por lo tanto, las sustancias emitidas pueden ser clasificadas en orgánicas, inorgánicas, además de partículas y metales pesados.

De acuerdo con los resultados de la etapa de inventario, las sustancias más importantes, en términos de cantidades son: el dióxido de carbono, los óxidos de azufre y nitrógeno, y las emisiones fugitivas de Naftas (las emisiones fugitivas, se tomaron como compuestos orgánicos volátiles para su análisis). En la etapa de destino, no ha sido evaluado el dióxido de carbono, debido del que no se ha reportado su presencia en compartimentos diferentes al aire, y así mismo, por que aún, se desconocen objetivamente sus efectos. En este sentido, las sustancias que se han evaluado y caracterizado se presentan en la Tabla 5.36.

Tabla 5.36. Propiedades fisicoquímicas de las sustancias a evaluar.

Sustancias	Propiedades					
	Peso mol (g/mol)	P. de ebullición (°C)	P. de fusión (°C)	Presión de vapor (Pa)	Solubilidad (mg/l)	Vida media en aire (días)
Óxidos de azufre (SO ₂)	6.40E+01	-7.60E+01	-1.00E+01	3.86E+05	1.12E+02	3.00E+00
Óxidos de nitrógeno (NO _x)	3.00E+01	-1.64E+02	-1.52E+02	1.01E+05	--	1.00E+00
Naftas (COV's)	1.07E+02	8.45E+01	--	4.97E+02	4.60E+00	1.62E+03

Fuente: CEPIS, 2003; Calamari, 1993.

Con base en los resultados obtenidos en la aplicación de los modelos de evaluación del destino de sustancias, la Tabla 5.37 presenta los coeficientes de partición en los diferentes medios estudiados.

Tabla 5.37. Coeficientes de partición de las sustancias a evaluar su destino

<i>Coeficientes de partición</i>	<i>Sustancias</i>		
	<i>Contaminantes primarios y secundarios de nitrógeno</i>	<i>Contaminantes primarios y secundarios de azufre</i>	<i>COV's (Nafta)</i>
Octanol-Agua (Kow)	2.63E-01	1.02E+00	2.40E+03
Aire-Agua (Kaw)	1.90E-03	7.54E-02	2.14E-04
Suelo-Agua	5.18E-03	2.01E-02	4.72E+01
Sedimento-Agua	1.04E-02	4.03E-02	9.44E+01

Fuente: Crettaz, 2001; Hertwich E, 2001

La información contenida en las tablas anteriores, caracteriza las sustancias que han de ser evaluadas en términos de su destino. Por otra parte, las características del entorno, hacia donde las sustancias se transportarán y depositarán, es otro aspecto que debe ser evaluado.

5.3.6.2 Caracterización del entorno (Diferenciación espacial)

En la caracterización del entorno es necesario relacionar los aspectos espaciales que determinan en alguna medida el destino de las sustancias descargadas por los procesos industriales y cuantificadas en el inventario. Estas características se definieron con ayuda de los modelos de evaluación del destino.

La planta de separación de Isopentano, está localizada en la área industrial de Tarragona, aproximadamente a 15 Km. del centro de la ciudad. Las principales características del entorno que han sido tenidas en cuenta en la evaluación del destino de las cargas ambientales en el proceso de separación de Isopentano, se presentan a continuación en la Tabla 5.38

Tabla 5.38 Características del entorno de ubicación de la planta

Característica	Medio	Valor
Área (m ²)	Aire	6.30E+09
	Agua	6.30E+07
	Suelo	1.39E+11
	Sedimento	1.07E+07
Altura media capa de aire (km)		1.00E+00
Superficie cubierta de agua (% del total)		1.00E+01
Velocidad (km/h)	Viento	1.44E+01
	Agua	3.60E+00
Condiciones de temperatura (°C)	Media anual	1.50E+01
	Media invierno	1.00E+01
	Media verano	3.00E+01
Velocidades de transporte (m/h)	Aire y aire-agua	5.00E+00
	Agua y aire-agua	5.00E-02
	Velocidad lluvia	1.00E-04
	Difusión en aire-suelo	2.00E-02
	Difusión suelo-aire	1.00E-05

A partir de los datos de ubicación de la planta, se definieron las características de los entornos de evaluación del destino. La Tabla 5.39 muestra los principales valores de las variables involucradas en un entorno local.

Tabla 5.39 Características del compartimento local para un entorno genérico

Característica	Compartimento	Local
Área (m ²)	Aire	6.30E+09
	Agua	6.30E+07
	Suelo	1.39E+11
	Sedimento	1.07E+10
Profundidad	Aire	1.00E+03
	Agua	2.00E+01
	Suelo	1.00E-01
	Sedimento	1.00E-02
Altura media aire (km)		2.00E+00
Superficie cubierta de agua (% del total)		1.00E+01
Velocidad (km/h)	Viento	1.44E+01
	Agua	3.60E+00
Fracción volumétrica aire	Aerosol	2.00E-11
	Partículas	2.00E-11
Fracción volumétrica agua	Sedimento suspendido	5.00E-06
	Peces	1.00E-06
Fracción volumétrica suelo	Aire	2.00E-01
	Agua	3.00E-01
	Sólidos	5.00E-01
Fracción volumétrica sedimentos	Agua	8.00E-01
	Sólidos	2.00E-01
Densidad (kg/m ³) subcompartimento aire	Vapor	1.21E+03
	Aerosol	2.40E+03
Densidad (kg/m ³) subcompartimento agua	Agua	1.00E+03
	Sedimentos suspendidos	1.50E+03
	Peces	1.00E+03
Densidad (kg/m ³) subcompartimento suelo	Aire	1.21E+03
	Agua	1.00E+03
	Sólidos	2.40E+03
Densidad (kg/m ³) subcompartimento sedim.	Agua	1.00E+03
	Sólidos	2.40E+03
Carbón orgánico (g/g)	Suelo	2.00E-02
	Sedimento	4.00E-02
	Sedimento suspendido	2.00E-01
	Sedimentos sólidos	4.00E-02
	Partículas en agua	2.00E-01
Condiciones de temperatura (°C)	Media anual	1.50E+01
	Media invierno	1.00E+01
	Media verano	3.00E+01
Velocidades de transporte (m/h)	Aire y aire-agua	5.00E+00
	Agua y aire-agua	5.00E-02
	Velocidad lluvia	1.00E-04
	Difusión en aire-suelo	2.00E-02
	Difusión suelo-aire	1.00E-05
	Difusión sedimento-agua	1.00E-04

Los valores de la escala local, han sido fijados para la evaluación en los correspondientes modelos.

La Tabla 5.39 resume las principales características definidas en la caracterización del entorno, sin embargo, estas no son las únicas, y su definición depende así mismo, del objetivo y alcance propuesto para cada estudio particular.

En otras palabras, la Tabla 5.39 es un resultado de la aplicación, puesto que las características de cada entorno de evaluación, varían en cada caso. Sin embargo, las variables que lo definen pueden servir de base para la determinación de diferentes entornos, cuando el objetivo del análisis, sea la ubicación de la planta industrial en un sitio diferente.

Finalmente en este apartado, vale la pena destacar, que en este caso particular las sustancias evaluadas, no presentan una fuerte variación con las características que en el desarrollo metodológico se proponen, como son persistencia, bioacumulación y toxicidad.

5.3.6.3 Cuantificación del destino de sustancias

Con base en las características de las sustancias cuyo destino se pretende evaluar, y las propiedades del entorno genérico (global o local), a continuación, se presentan la cuantificación de destino, para los compartimientos aire, agua, suelo y sedimento. De acuerdo con la definición de la unidad funcional, (Ton de isopentano producido) se ha tomado como base para evaluar el destino de las sustancias, un año de descarga continua. Las Tablas 5.40 a la 5.43 presentan los resultados obtenidos por la aplicación de los diferentes modelos de evaluación del destino (Caltox, ChemCan, TaPL3 y LIII), en los cuatro escenarios donde se observa la mayor emisión de las sustancias de interés (VOC's, compuestos derivados de los óxidos de nitrógeno y azufre). Los resultados presentados en estas tablas, representan los valores promedios obtenidos con los cuatro (4) modelos utilizados⁶, y son característicos para el entorno local tal como se planteó en la definición del objetivo y alcance del caso de aplicación

Los resultados obtenidos para los escenarios donde ha sido evaluado el destino en un entorno global, se presentan en el Anexo B, correspondiente a los resultados de los casos de aplicación.

Tabla 5.40. Matriz de destino (ecomedia) para el escenario 5

Concentración de Sustancia (g/m ³)	Aire	Agua	Suelo	Sedimento
Compuestos de azufre	3,00E-09	3,77E-09	1,33E-08	2,93E-09
COV's (Nafta)	5,56E-07	1,84E-05	3,27E-02	3,48E-04

⁶ Los modelos utilizados fueron: Caltox, Chemcan, Level III y TaPL3

De acuerdo con la información presentada en la Tabla 5.40, no existen compuestos derivados de los óxidos de nitrógeno en los cuatro compartimentos donde se evaluó el destino. La concentración de compuestos de azufre y de orgánicos volátiles, no presenta una diferencia tan marcada en los compartimentos evaluados, con excepción del suelo, donde se reporta una diferencia considerable entre los dos tipos de compuestos.

Tabla 5.41. Matriz de destino (ecomedia) para el escenario 6

Concentración de Sustancia (g/m ³)	Aire	Agua	Suelo	Sedimento
Compuestos de nitrógeno	1,98E-11	5,99E-09	1,19E-08	3,61E-09
Compuestos de azufre	2,18E-10	2,74E-10	9,70E-10	2,13E-10
COV's (Nafta)	1,10E-10	6,02E-02	1,58E+01	1,79E+00

Tabla 5.42. Matriz de destino (ecomedia) para el escenario 7

Concentración de Sustancia (g/m ³)	Aire	Agua	Suelo	Sedimento
Compuestos de nitrógeno	4,26E-09	1,64E-02	7,86E-03	1,31E-02
Compuestos de azufre	8,59E-09	1,56E-04	3,44E-04	1,26E-04
COV's (Nafta)	1,10E-10	6,02E-02	1,58E+01	1,79E+00

Tabla 5.43. Matriz de destino (ecomedia) para el escenario 8

Sustancia (kg/m ³)	Aire	Agua	Suelo	Sedimento
Compuestos de nitrógeno	3,26E-10	5,52E-09	7,85E-08	1,66E-09
Compuestos de azufre	8,44E-10	1,06E-09	3,76E-09	8,27E-10
COV's (Nafta)	5,56E-07	1,84E-05	3,27E-02	3,48E-04

La evaluación del destino, en los escenarios 6 a 8, muestra una tendencia similar entre ellos. La sustancia y el compartimento con una mayor concentración, son los compuestos orgánicos volátiles y el suelo, respectivamente.

Adicionalmente, la información de las tablas anteriores, permite hacer una primera valoración acerca de la sustancia y el compartimento de mayor interés. En este caso, las emisiones fugitivas de la Nafta, y su capacidad de depositarse en una mayor cantidad en el suelo, es el aspecto a destacar. Sin embargo, es un resultado de alguna manera esperado, de acuerdo con sus propiedades fisicoquímicas.

A continuación, las Figuras 5.46 a 5.49, muestran gráficamente la tendencia mostrada por las alternativas evaluadas en los escenarios 5 al 8.

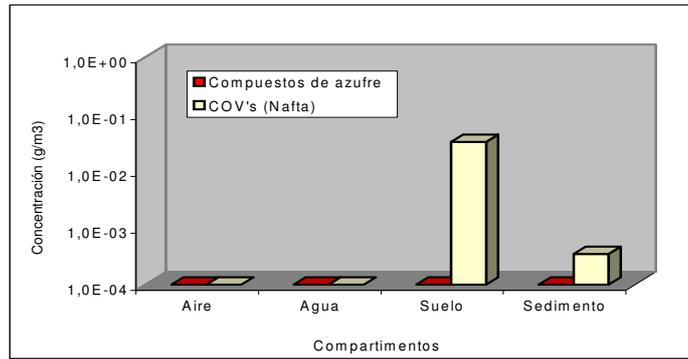


Figura 5.46. Destino de sustancias en el escenario 5

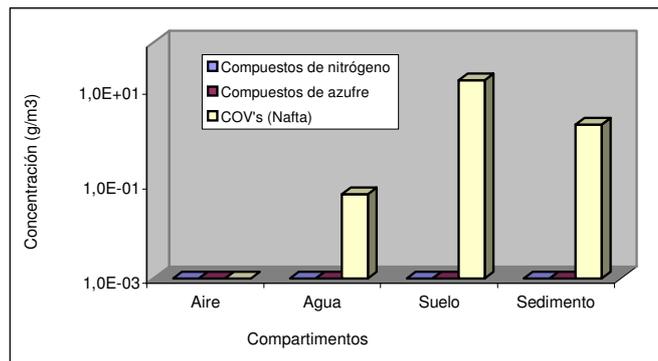


Figura 5.47. Destino de sustancias en el escenario 6

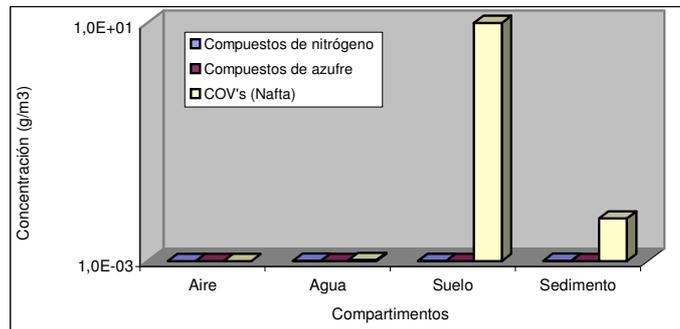


Figura 5.48. Destino de sustancias en el escenario 7

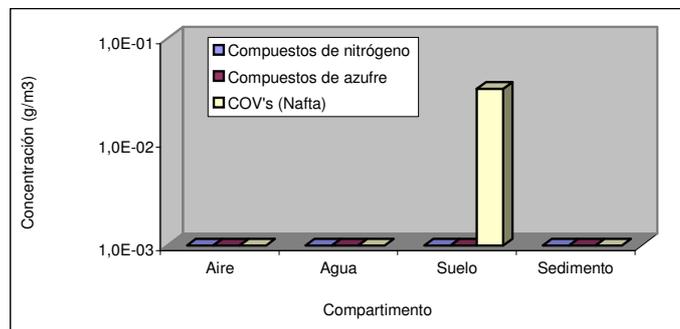


Figura 5.49. Destino de sustancias en el escenario 8

Finalmente y de acuerdo con las figuras, se puede resaltar que los escenarios 6 y 7, de los cuatro estudiados, son los que a su vez muestran las mayores concentraciones de dicha sustancia en el compartimento descrito.

5.3.6.4 Análisis de dominancia para los efectos a evaluar

Hasta ahora, se han determinado las cargas a evaluar y los compartimientos donde determinar el destino de dichas cargas, sin mencionar de una forma ordenada los criterios que se han tenido en cuenta. En este apartado se mostrará como un análisis de dominancia permitió determinar cuales son los efectos que debían ser evaluados, a partir de los datos de destino y de la exposición de las sustancias descargadas por el proceso.

Relación de cargas ambientales y posibles efectos

El primer criterio examinado en el análisis de dominancia, fue la relación de las cargas ambientales con los posibles efectos (riesgos o impactos reales). La Figura 5.50, muestra gráficamente la relación de las cargas –discriminadas como consumos o descargas- con el posible efecto. Las fases intermedias de la relación, determinan las diferentes categorías de impacto, los puntos intermedios (impactos o riesgos), y los puntos finales de la evaluación ambiental.

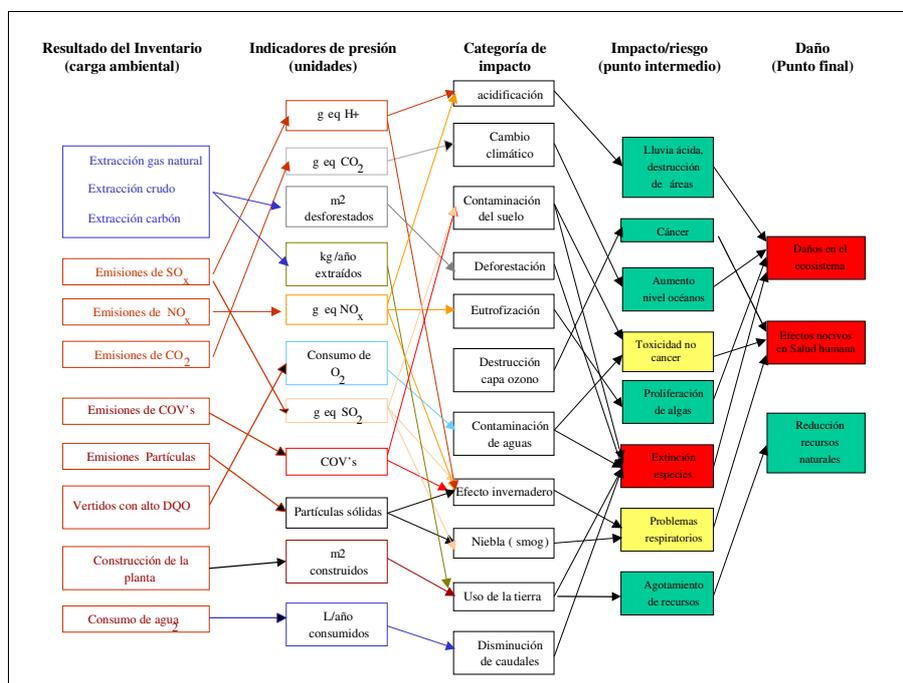


Figura 5.50. Relación entre las cargas y efectos.

De acuerdo con la Figura 5.50 y en términos cualitativos, las descargas a los diferentes compartimientos presentan una mayor relación con los posibles daños, que el consumo de recursos naturales. De la misma forma, los daños a los ecosistemas y a la salud humana, están

relacionados con una mayor cantidad de cargas ambientales y de puntos intermedios, que la reducción de recursos naturales, por lo que se hace necesario evaluar los efectos ambientales, provenientes de las cargas ambientales debidas a las descargas del proceso.

5.3.6.5 Estimación de la exposición

La exposición de la población a las sustancias emitidas por el proceso que han sido cuantificadas en los diferentes compartimentos del estudio (escenarios de exposición), se estimó a través de diferentes vías. Con la ayuda de modelos de evaluación del riesgo a la salud humana (Caltox y Euses), fue posible cuantificar la dosis media a través de las diferentes vías de exposición. El valor de las dosis medias calculadas y las vías utilizadas, se muestran gráficamente en la Figura 5.51.

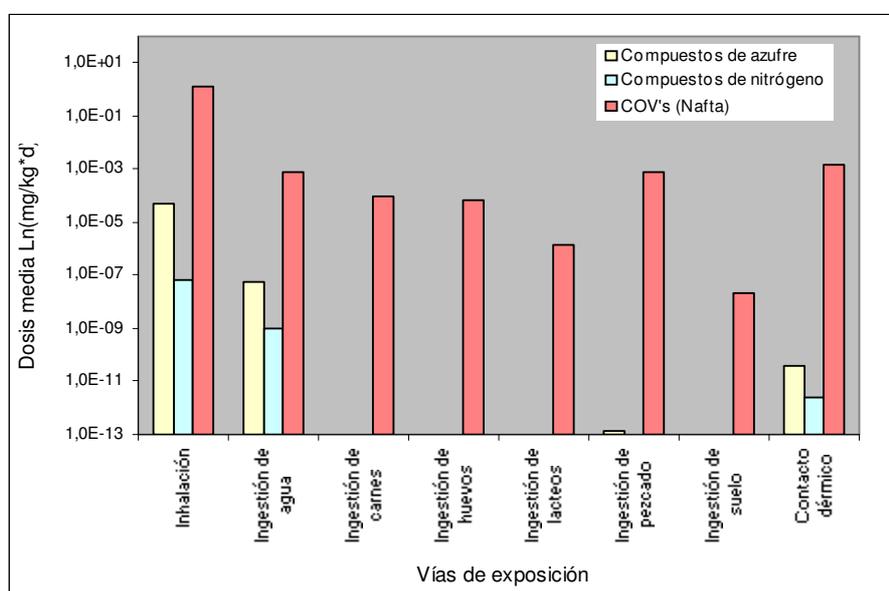


Figura 5.51 Dosis de las sustancias con una mayor presencia en los compartimentos

De acuerdo con la evaluación del destino y la exposición, la sustancia más importante en el análisis, es la Nafta proveniente de las emisiones fugitivas. Los sulfatos y nitratos, se encuentran también presentes, aunque en una menor cantidad, y con una menor frecuencia por vía de exposición.

Más adelante, en el apartado de discusión de resultados, se comentará en detalle, las implicaciones de estos resultados y las conclusiones que se pueden generar a partir de ellos.

5.3.7 Determinación del perfil de efectos

En este apartado se evalúan los efectos en términos de riesgos e impactos, así como las categorías, indicadores y las unidades en los que se miden dichos efectos.

5.3.7.1 Selección de categorías de efectos, indicadores de categorías y unidades

Las categorías, los indicadores (puntos intermedios y/o finales), y las unidades relacionadas con los efectos, dependen en gran medida del efecto a medir y de la población o área de protección sobre la que se mide.

Una vez definidas las categorías de impacto utilizadas, conviene determinar las unidades en las cuales se midieron los diferentes impactos. Esta determinación se llevó a cabo tras estudiar diferentes métodos de evaluación de impactos, y teniendo en cuenta aquellas que presentan una mayor aceptación en la comunidad internacional. La Tabla 5.44 presenta las categorías de impacto, sus unidades y las áreas de protección, propuestas en el desarrollo metodológico, con base en diversas clasificaciones [Setac-Unep, 2002; EPA, 2001; EEA, 2002].

Tabla 5.44. Clasificación de efectos, categorías de impacto y sus unidades

Tipo de efecto	Categoría de impacto	Unidad	Área afectada
Riesgo a la salud			
	Cáncer	Probabilidad de ocurrencia	Salud humana
	Toxicidad diferente a cáncer	Relación de peligro	Salud humana
Impactos potenciales			
	Toxicidad humana	g-eq. 1-4-dichlorobenzene	Salud humana
	Efecto invernadero	g eq. CO ₂	Salud humana
	Disminución de recursos naturales	kg/yr	Recursos Naturales
	Acidificación del aire	g eq. H ⁺	Ecosistemas
	Eutroficación del agua	g eq. PO ₄	Ecosistemas
Impactos específicos			
	Hospitalización	Casos	Salud humana
	Pérdida de vida	Años de vida pérdida (YOLL)	Salud humana
	Pérdida de cosechas	Kg de cal añadida	Recursos Naturales
	Acidificación de suelo	Km ² de suelo	Ecosistemas

En el caso de riesgos, se evaluó el riesgo a la salud humana de sufrir cáncer debido a la exposición a las sustancias cuyo destino ha sido estimado. Así mismo, para el caso de los impactos, se evaluaron los impactos potenciales y aquellos impactos que son posibles de cuantificar en un área determinada. En otras palabras, se evaluaron no sólo los impactos potenciales debidos a sustancias específicas -y sus equivalentes-, que tienen un gran potencial de causarlos, sino también, los impactos cuantificables después de seguir la trayectoria desde la emisión.

Con base en el desarrollo metodológico, las categorías de impacto utilizadas deben involucrar las tres áreas de protección definidas en los objetivos, es decir, salud humana, recursos naturales y ecosistemas. Las categorías de impacto elegidas para la evaluación de impactos potenciales y específicos son: toxicidad humana, acidificación del aire, eutroficación de aguas y reducción de recursos naturales.

En el caso de salud humana, se evaluó el riesgo carcinogénico y no carcinogénico debido a las sustancias evaluadas. Como impacto potencial se estimó la toxicidad humana y efecto invernadero. Finalmente, en cuanto a efectos específicos, se midieron los casos de hospitalización por enfermedad y pérdida de vida.

En el caso de ecosistemas no se evaluó el riesgo, debido a la carencia de datos básicos para definir las respuestas frente a los riesgos ambientales. Para el caso de impactos potenciales se midió la eutroficación y acidificación, y para los impactos específicos se evaluó la acidificación en suelos, a través de áreas con exceso de dióxido de azufre.

Por último, sobre los recursos naturales la evaluación de impactos potenciales se centró en la estimación de su disminución, mientras que para los efectos específicos se evaluó la pérdida de cosechas.

5.3.7.2 Cuantificación de efectos

En los siguientes apartados se presentan los principales riesgos e impactos evaluados en el caso de aplicación.

Riesgos

En este caso de aplicación, se evaluaron los riesgos a la salud humana debidos al aumento de la concentración no sólo de los óxidos de azufre y nitrógeno y sus derivados, sino también de los compuestos orgánicos volátiles. Después de analizar las características de las sustancias, se encontró que no existen riesgos cancerígenos

Por otra parte, los riesgos a la salud, no cancerígenos, se estimaron a través de relación de peligro (RP) para cada uno de las sustancias para las cuales se evaluó el destino. Una Relación de peligro mayor que uno ($RP > 1$), significa que existe probabilidad de que se produzca un efecto adverso hacia la salud. Por el contrario, Relaciones de Peligro menores que uno ($RP < 1$), que no existe riesgo. La Tabla 5.45, presenta la relación entre la concentración de las sustancias en estudio y relación de peligro estimado para cada una de ellas.

Tabla 5.45. Relación entre la concentración en el medio y el riesgo de una sustancia *

Sustancias	Concentración total	Valores de riesgo
Compuestos de nitrógeno	3,74E-02	3,20E-04
Compuestos de azufre	6,26E-04	2,70E-05
COV's (Nafta)	1,77E+01	3,80E+03

*Los resultados presentados en esta tabla, han sido obtenidos con la herramienta Caltox.

Los riesgos a la salud, estimados a partir de la relación de peligro generados por el aumento de la concentración de Naftas y óxidos de azufre y nitrógeno en el medio, se presenta en la Figura 5.52.

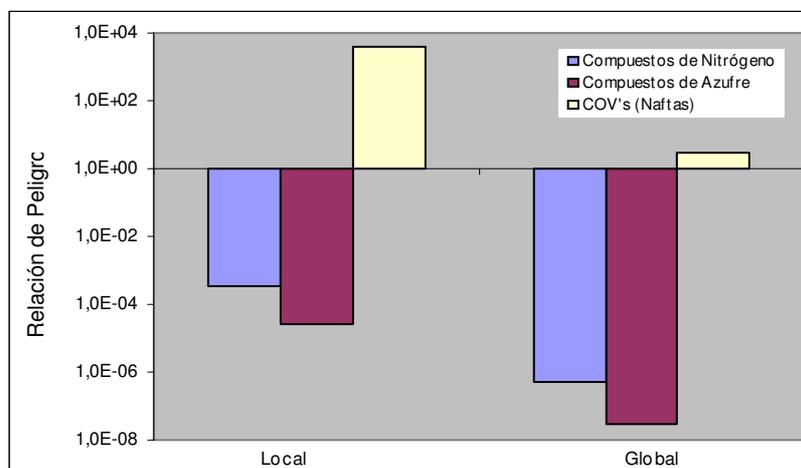


Figura 5.52. Estimación de la Relación de Peligro a la salud humana en entornos local y global

En la gráfica, se muestra la enorme diferencia de los valores para los compuestos de Azufre y Nitrógeno, respecto a las emisiones de Naftas. Mientras los primeros están hasta 1000 veces por debajo de una proporción de riesgo significativa, las emisiones de Naftas, pueden llegar a ser 1000 veces más probables de causar un efecto sobre la salud humana.

Por último, la elevada proporción de peligro, de las Naftas sobre la salud humana, hace indispensable, evaluar los impactos reales de estas sustancias sobre dicha área de protección.

Impactos potenciales

Como ya se comentó en el capítulo anterior, los impactos se pueden evaluar en dos direcciones: 1) potenciales, o capacidad de la sustancia de causar un efecto negativo, 2) específicos, que cuantifican el impacto que una sustancia causa en un área de protección establecida. En este caso de aplicación, se estimaron impactos en las dos vías descritas. Los impactos potenciales, se describen la Tabla 5.46 y las Figuras 5.53 y 5.54, donde se presentan los valores más significativos la evaluación de efectos para el proceso de separación de Isopentano.

De la misma forma que en la evaluación de los riesgos, los impactos potenciales se estimaron a partir de los valores de emisión de las cargas evaluadas en el inventario. En este sentido, y después de que los análisis de dominancia indicaron que las cargas ambientales más importantes son las Naftas (VOC's) y los compuesto de azufre y nitrógeno, los impactos se estimaron con base en estas sustancias.

Tabla 5.46. Impactos potenciales de los escenarios estudiados

Impacto	Sustancias	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6	Esc 7	Esc 8
Acidificación (g-eq H ⁺)	Comp S y N	--	--	--	--	2.93E+02	4.84E+01	3.37E+02	8.29E+01
Disminución de Recursos Naturales (kg/año)	Nafta,	3.21E+01	3.15E+01	3.41E+00	2.99E+00	--	1.06E-01	2.73E-01	2.73E-01
Eutroficación (g-eq PO ₄)	Comp de N	1.61E+00	1.61E+00	1.39E-01	1.39E-01	9.90E-01	2.70E+01	7.00E+01	6.91E+01
Tox Humana (g-eq DCB)	Nafta	--	--	--	--	1.50E+03	2.78E+02	1.80E+03	5.04E+02
E. invernadero directo (g-eq CO ₂)	CO ₂ y Comp N, Nafta	5,72E+03	5,60E+03	6,06E+02	5,32E+02	7,35E+03	7,58E+03	7,38E+02	8,94E+02

La información de la Tabla 5.46, se presenta gráficamente en las Figuras 5.53 y 5.54. Es necesario realizar una separación de los escenarios en dos grupos, debido a la diferencia cuantitativa, lo que dificulta su presentación gráfica.

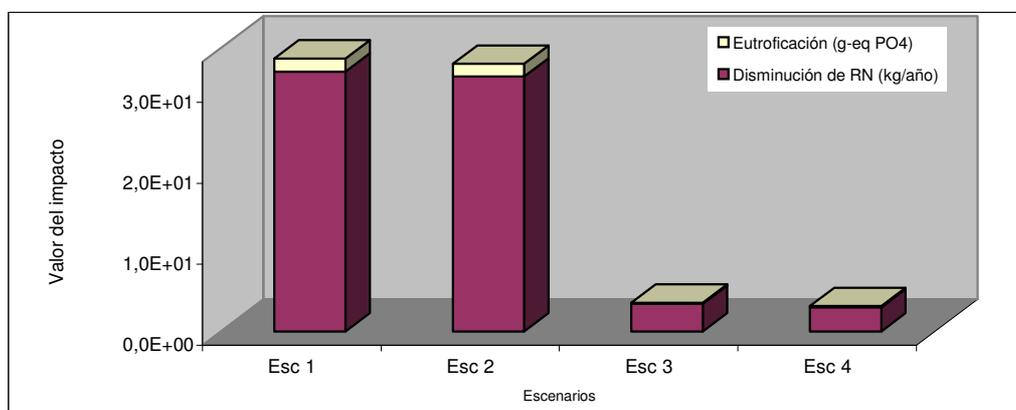


Figura 5.53. Evaluación de los impactos potenciales de los escenarios 1 a 4.

De acuerdo con los resultados mostrados en la Figura 5.52, los escenarios 1 a 4, presentan sólo dos de las cuatro categorías de impacto seleccionadas en el estudio. De igual forma, se puede apreciar claramente, una gran diferencia en dichas categorías en términos cuantitativos.

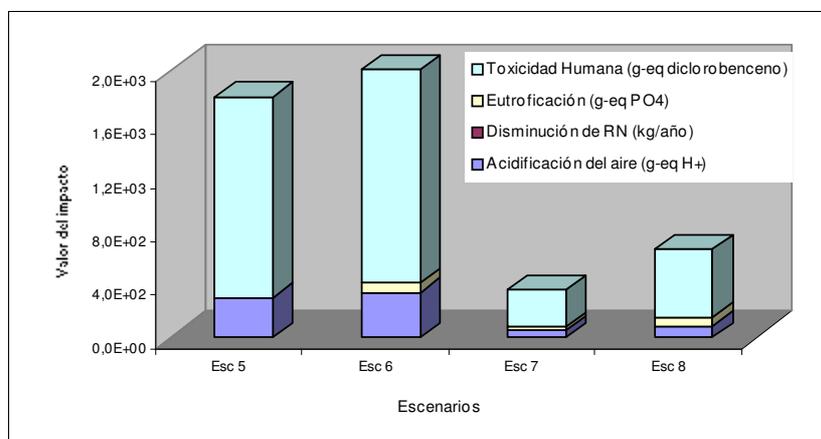


Figura 5.54. Evaluación de los impactos potenciales de los escenarios 5 a 8.

La Figura 5.54, muestra claramente la mayor incidencia en cuanto a una mayor participación de los escenarios 5 a 8 en las categorías de impacto definidas. Sin embargo, la disminución de recursos naturales, se muestra poco significativa.

Impactos específicos

La evaluación de impactos específicos se desarrolló a través del uso de una herramienta informática. El Modelo Ecosense®, fue la herramienta utilizada para estimar a partir de los datos de emisión, los impactos específicos para cada uno de los escenarios en estudio. Este modelo y sus características más importantes, están descritos en el anexo correspondiente a las herramientas utilizadas en el estudio (Anexo B).

Con base en los resultados obtenidos en la evaluación de los impactos específicos para diferentes categorías de impacto y funciones emisión-respuesta, los valores de los impactos estimados para las categorías de impacto relacionadas con las tres áreas de protección definidas en los objetivos y alcance, se describen en la Tabla 5.47 y gráficamente en la Figura 5.55.

Tabla 5.47 Impactos específicos por unidad de energía generada

Impacto (/TWh)	Sustancias	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6	Esc 7	Esc 8
Hospitalización (Casos)	Partículas	--	--	--	--	6.02E+00	7.70E-01	8.50E-01	9.20E-01
Pérdida de vida (Años)	Partículas	3.50E-01	3.50E-01	3.07E-02	3.07E-02	7.20E+00	1.00E+00	1.40E+00	1.40E+00
Neutralización de áreas (kg cal/)	Ácidos provenientes de SO ₂ y NO _x	--	--	--	--	6.21E+06	8.99E+05	1.26E+06	1.25E+06
Áreas dañadas (km ²)	Ácidos provenientes de SO ₂ y NO _x	--	--	--	--	1.60E+01	3.20E+00	4.80E+00	3.00E+00

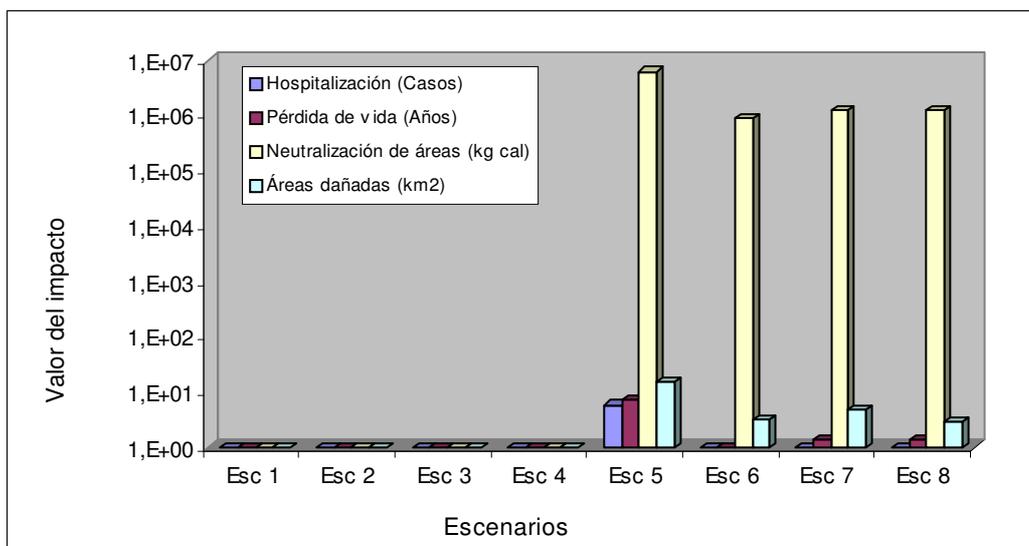


Figura 5.55. Impactos específicos de los escenarios de producción

Después de analizar la Figura 5.55, se puede asegurar, que al igual que en el caso de los riesgos e impactos potenciales, los escenarios que presentan un mayor impacto específico, son los del segundo grupo (5 a 8), de ellos vale la pena resaltar, que el escenario con una mayor contribución a los impactos específicos, es el escenario 5.

La neutralización de áreas, consecuencia de una elevada acidificación del suelo, es el impacto de mayor proporción en todos los escenarios evaluados. En segundo lugar, las áreas dañadas, que no pueden ser utilizadas mientras no se realicen tareas de remediación, muestran un valor relativamente constante en los cuatro escenarios donde se presenta este impacto.

Finalmente, los casos de hospitalización y la pérdida de vidas, son los impactos que muestran una menor presencia por escenario, al estar presentes sólo en los escenarios 5, 7 y 8.

5.3.8 Estimación de daños

La estimación de daños ambientales de acuerdo con la metodología desarrollada, se obtuvo a través de la evaluación de tres tipos específicos de daños: 1) monetarizables, 2) indicadores de daño global, y 3) factores de daño ecológico. Cada uno de estos tipos de daño, presentan características particulares, por lo que se hace necesario evaluarlos en forma independiente. Los siguientes apartados, describen los resultados en cada uno de los tipos de daños evaluados.

5.3.8.1 Daños monetarizables

A continuación se presentan los daños que corresponde a los impactos evaluados para las tres áreas de protección de interés en el estudio, y que pueden ser evaluados desde una perspectiva de cuantificación monetaria (costes tipo V). La Tabla 5.46 presenta los valores estimados para dos de las tres categorías de impacto (Salud humana y recursos naturales), ya que no fue posible estimar el coste ambiental de los impactos sobre los ecosistemas.

Los costes ambientales, se describen en términos de ECU (Environmental Cost Unit). Dicha unidad representa, el valor en Euros que es necesario pagar para resarcir o mejorar el área afectada. Generalmente, los daños se miden en miliECU's [Sonneman, 2002; Aróstegui et al, 1997].

Tabla 5.48. Daños ambientales en costes monetarios por unidad de energía producida.

Daños (mECU)	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6	Esc 7	Esc 8
Hospitalización	--	--	--	--	5.60E-02	7.10E-03	7.80E-03	8.50E-03
Pérdida de vida	1.30E-01	1.30E-01	1.10E-02	1.10E-02	2.60E+00	3.70E-01	5.20E-01	5.20E-01
Neutralización de áreas	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00	1.20E-01	1.80E-02	2.50E-02	2.50E-02
Total daños	1.30E-01	1.30E-01	1.10E-02	1.10E-02	2.78E+00	3.95E-01	5.53E-01	5.54E-01

Gráficamente, la información contenida en la tabla se puede observar en la Figura 5.56, donde se comparan, los costes individuales y totales de las categorías de impacto evaluadas en cada uno de los escenarios analizados.

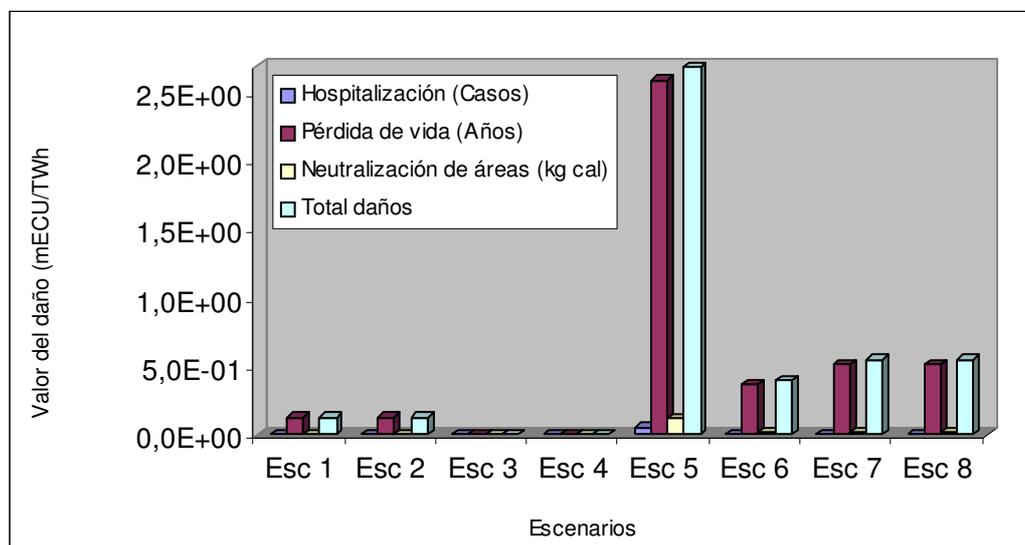


Figura 5.56 Estimación de los daños ambientales (costes monetarios)

Los costes ambientales estimados son mayores para los escenarios 5 al 8. Esto es razonable debido a la mayor contribución de emisiones -en las áreas de protección evaluadas-, por el uso de combustibles con una mayor carga ambiental.

Como era de esperarse, la alternativa de proceso donde se presenta una mayor proporción de daños es el escenario 5, y en él, la pérdida de vida, es el daño que presenta una mayor proporción. Los otros tres escenarios de este grupo (6, 7 y 8), a pesar de que presentan un aumento significativo con respecto a los escenarios 1 y 2, son bajos comparados con el escenario 5.

En términos de costes, el escenario que representaría un mayor coste es sin lugar a dudas el escenario 5. Los escenarios 3 y 4, representan la mejor opción en términos de costes ambientales, ya que de acuerdo con los resultados obtenidos, no se evidencian costes ni por hospitalización, pérdida de vida o remediación de áreas acidificadas.

Finalmente, vale la pena destacar, que aunque en la evaluación de impactos específicos se evaluaron las áreas dañadas (km^2), no fue posible determinar los costes necesarios para restablecer o regenerar dichas áreas, por la dificultad de valorar ecosistemas.

Posteriormente, en el apartado de discusión de los resultados, se volverá sobre estos resultados y su implicación en la toma de decisiones.

5.3.8.2 Indicadores de daño global

En el caso de los daños globales –que son generados al cuantificar los impactos globales-, no es posible realizar una cuantificación real de ellos, por lo que es necesario utilizar indicadores. En el caso estudiado, los daños considerado en esta categoría, son los relacionados con el efecto invernadero, producido por las emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) y la Nafta. Los indicadores más representativos de este efecto, son los mencionados a continuación:

- ✓ Aumento de la frecuencia de catástrofes climáticas con graves daños a las personas y los bienes materiales
- ✓ Derretimiento de los polos, afectando especialmente a poblaciones costeras y países insulares
- ✓ Erosión de tierras cultivables

Considerando la cuantificación de cargas ambientales desarrollada en la fase de inventario, es factible cuantificar el valor del impacto potencial debido a las emisiones de Dióxido de carbono. Esta cuantificación se presenta en la Tabla 5.49.

Tabla 5.49 Potencial de efecto invernadero en geq de CO₂ anual

Efecto	Escenarios							
Invernadero directo (g eq CO ₂)	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6	Esc 7	Esc 8
	5.72E+03	5.60E+03	6.06E+02	5.32E+02	7.35E+03	7.58E+03	7.38E+02	8.94E+02

Los valores presentados en la Tabla 5.49, corresponden a la contribución de dióxido de carbono emitido por el proceso, en sus diferentes escenarios. No se ha incluido, el aporte de otras sustancias tales como el N₂O y las trazas de hidrocarburos diferentes a la Nafta por que no han sido reportadas ni evaluadas en la fases de inventario y destino. La comparación del aporte al efecto invernadero por cada uno de los escenarios, puede observarse gráficamente en la Figura 5.57.

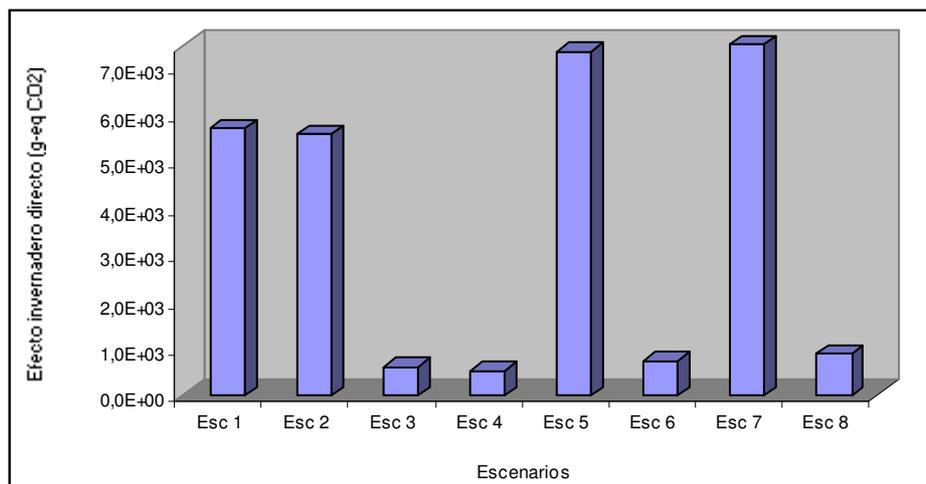


Figura 5.57. Comparación gráfica del Efecto invernadero como indicador potencial

Los resultados anteriores, muestran una importante diferencia entre los escenarios con ahorro de energía y aquellos que no presentan este ahorro. En este sentido, es fácilmente observable, que los escenarios 5 y 7, son los mayores contribuidores a este efecto seguidos por el escenario 1 y 2 respectivamente. Contrario a esto los escenarios 3, 4, 7 y 8, muestran una importante disminución, siendo los escenarios que menos aportan, el 4 y el 3 respectivamente.

5.3.8.3 Factores de daño ecológico

No se han determinado factores de daño ecológico para ninguna de las cargas ambientales identificadas por el inventario del proceso. Este hecho, probablemente se debe a la dificultad de valorar correctamente los daños relacionados con ecosistemas.

5.3.9 Toma de decisiones respecto a las alternativas evaluadas

Esta etapa requiere un análisis exhaustivo que permita determinar cual es la mejor alternativa en términos económicos, técnicos y ambientales. La toma de decisiones en esta etapa, se basa en la información tanto de la simulación del proceso, como en la determinación de las cargas ambientales.

5.3.9.1 Objetivos y alcances de la toma de decisiones en el caso de aplicación.

El objetivo principal para la toma de decisiones fue determinar cual o cuales de las alternativas evaluadas (en la generación de la energía requerida para la separación de Isopentano) eran las más adecuadas. El alcance se centró en la comparación de los aspectos técnicos, económicos y ambientales de los ocho (8) escenarios evaluados.

5.3.9.2 Análisis y comparación de los escenarios estudiados.

El análisis y la comparación de los escenarios estudiados, han sido establecidos bajo tres conceptos: 1) características técnicas, 2) aspecto económico –orientado este a costes ambientales-, y 3) incidencia ambiental en los cuatro niveles de evaluación desarrollados.

Análisis técnico.

Bajo este concepto los escenarios presentan características muy similares entre si, sólo en el caso de la generación de vapor por expansión o laminación, se evidencian algunas diferencia entre sus características técnicas. Sin embargo, y dado la orientación hacia la evaluación ambiental del caso de aplicación, no se contó con suficiente información para realizar una diferenciación entre los escenarios evaluados.

Análisis económico

Teniendo en cuenta los aspectos mencionados en el apartado de análisis técnico, el análisis económico de los escenarios estudiados basó en los costes ambientales generados por cada uno de ellos. En este sentido, la comparación se desarrolló sobre los costes relacionados con la incidencia ambiental, en sentido y con base en la metodología de evaluación del coste total, se evaluaron los costes tipo III, IV y V. Para estos últimos los daños ambientales han sido cuantificados en Unidades de Coste Ambiental (Environmental Cost Units).

Los costes tipo III están relacionados con contingencias asociadas al proceso, en este sentido y para los escenarios evaluados, dichas contingencias han sido evaluadas en términos de combustibles y recursos naturales utilizados.

A su vez, los costes tipo IV corresponden a aquellos no cuantificables ni transferibles a un aspecto específico. La Tabla 5.50 presenta de una forma cualitativa y a modo de resumen los costes tipos III y IV para los aspectos involucrados.

Tabla 5.50. Ejemplos de los costes tipo III y IV para los escenarios evaluados

Aspecto	Ubicación del problema	Causa	Concepto
Accidente industrial	Tanques de almacenamiento	Problemas de presión	Seguros
Accidente industrial	Líneas de operación	Acumulación de impurezas	Seguros
Contaminación del entorno	Descargas insuficientemente o no tratadas	Aumento en la concentración de sustancias en el entorno	Multas
Campañas de concienciación interna y externas	Buenas prácticas y buen uso de los recursos		Publicidad Charlas
Mejoras	Tratamiento de residuos		Estudios

La información relacionada con los costes tipo III y IV presentados en la Tabla 5.50, muestran la dificultad de dichos costes, para ser tomados como referente a la hora de la toma de decisiones. Dicha dificultad se basa en el hecho de que generalmente estos costes no son tomados como parte del proceso productivo en la planta, sino que se evalúan como costes de administración.

Con esto en mente, y a pesar de que la información presentada en esta tabla, es de carácter cualitativo, la información contenida en ella permite hacerse una idea de las diferentes clases de costes en los dos tipos estudiados.

Finalmente, un primer análisis de los costes presentados en la Tabla 5.50, no permite identificar cual (es) es(son) la(s) mejor(es) alternativa(s). Por lo que es necesario sustentar la elección de la alternativa en otros costes tales como los costes tipo V (Costes de ambientales).

Los costes tipo V o costes ambientales (daños ambientales) ya han sido evaluados en la etapa de estimación de daños en términos de hospitalización, pérdida de años de vida, neutralización de áreas –en el caso de acidificación-, y áreas dañadas (ver Tabla 5.48, y Figura 5.55).

5.3.9.3 Selección de la (s) alternativa (s)

Teniendo en cuenta que el ambiental es el aspecto de mayor cobertura, en el caso estudiado, la selección de la(s) alternativa(s) se basó en dicho aspecto. A continuación, se presentan las tablas comparativas en términos de inventario e impactos, para los ocho escenarios evaluados.

La comparación de alternativas con base en el inventario, se realizó tomando el mayor consumo por escenario con el cien por ciento de carga.

Tabla 5.51. Comparativa de inventario por escenario

Consumo	Esc 1	Esc 2	Esc 3	Esc 4	Esc 5	Esc 6	Esc 7	Esc 8	Puesto	Escenario
Gas Natural	100	98	11	9	0	0	0	0	1	Esc 4
Aire	100	98	11	9	94	94	8	8	2	Esc 3
Agua	97	97	8	8	97	100	12	11	3	Esc 7
Carbón	0	0	0	0	0	100	39	100	4	Esc 8
Fuel Oil	0	0	0	0	100	100	9	9	5	Esc 2
Fuel gas	0	0	0	0	100	100	9	9	6	Esc 1
Crudo	0	0	0	0	0	100	39	100	7	Esc 5
Total	297	293	30	27	391	594	115	237	8	Esc 6
Descargas										
CO2	75	74	8	7	97	100	10	12	1	Esc 4
H2O	100	98	11	9	58	58	5	5	2	Esc 3
SO2	0	0	0	0	90	100	13	22	3	Esc 7
NOx	0	0	0	0	0	100	39	100	4	Esc 2
COV	0	0	0	0	0	100	39	100	5	Esc 1
Mat Part	4	4	0	0	84	100	14	24	6	Esc 8
DQO	100	100	9	9	62	63	6	7	7	Esc 6
Sólidos	0	0	0	0	0	100	39	100	8	Esc 5
Total	279	276	28	25	390	721	165	369		

La comparación de escenarios por consumos y descargas, presenta varios aspectos que deben ser tenidos en cuenta, para una posterior discusión. Por una lado, no existe una correspondencia directa entre el consumo de recursos naturales y las descargas presentes en las alternativas evaluadas, es decir, un mayor consumo de recursos naturales y de materias primas, no conduce directamente a la identificación de la descarga con una mayor incidencia ambiental. Por otro lado, las características técnicas de los escenarios en comparación, influyen en forma directa con la relación entre consumos y descargas.

De acuerdo con la Tabla 5.51, los escenarios 4 y 3 son los que menos incidencia ambiental presentan, puesto que sus emisiones y descargas son las menores. Así mismo, el escenario 7 en los dos aspectos considerados ocupa el tercer lugar detrás de los escenarios 3 y 4.

Los demás escenarios varían su clasificación, dependiendo de sí se evalúa su consumo o descarga. Por ejemplo, el escenario 8 que en términos de consumo, ocupa la cuarta posición, pasa a la sexta posición (por detrás de los escenarios 1 y 2), cuando se evalúa descarga. Igualmente, los escenarios 1 y 2 están por detrás del escenario 8 en términos de consumo. Finalmente, los escenarios 5 y 6 intercambian posiciones en su clasificación para los dos aspectos evaluados. Lo anterior evidencia, que no existe la misma tendencia consumo-descarga en las alternativas representadas por los ocho escenarios.

Los impactos ambientales de los escenarios evaluados, fueron comparados teniendo en cuenta cinco categorías, que involucran las tres áreas de protección definidas en los objetivos y alcances de este caso de aplicación. La tabla 5.52, presenta la comparación de los escenarios en estas categorías.

La comparación se realizó teniendo en cuenta cuatro niveles de incidencia en las categorías de impacto evaluadas. Las categorías intentan incluir las tres áreas de protección involucradas en el estudio (salud humana, recursos naturales y ecosistemas), los niveles de incidencia, son nulo, bajo medio y alto

Tabla 5.52. Comparativa de los escenarios por categoría de impacto

Consumo de R.N.	Acidificación.	Eutrofización.	Toxicidad Humana	Efecto invernadero
5	1	3	3	4
6	2	4	4	3
3	3	5	1	6
4	4	1	2	8
7	6	2	6	2
8	8	6	8	1
2	5	8	5	5
1	7	7	7	7

A partir de la comparación de la realizada en con la información de la Tabla 5.52, se presenta la clasificación de los escenarios, a partir de los datos de impacto (ver Tabla 5.53)

Tabla 5.53. Clasificación de escenarios por incidencia ambiental

Escenario	Consumo de R.N.	Acidif.	Eutrofización.	Tox Humana	Efecto invernadero
1	Alta	Nula	Baja	Nula	Alta
2	Alta	Nula	Baja	Nula	Alta
3	Baja	Nula	Baja	Nula	Baja
4	Baja	Nula	Baja	Nula	Baja
5	Baja	Alta	Baja	Alta	Alta
6	Baja	Alta	Alta	Alta	Alta
7	Baja	Bajo	Media	Baja	Baja
8	Baja	Bajo	Alta	Baja	Baja

De acuerdo con las Tablas 5.52 y 5.53, son los escenarios 3 y 4 los que representan las mejores alternativas del proceso de separación de Isopentano. Es factible decir, que este hecho se debe no sólo a la utilización de una sola clase de combustible, sino también a las sustancias que son emitidas por la etapa de generación de la energía requerida.

Por otra parte, los escenarios 7 y 8, representan las alternativas en segundo orden de preferencia, esto se debe al hecho de la utilización de una menor cantidad de combustibles, por causa del ahorro energético, y por la consiguiente disminución en las descargas.

De acuerdo con el criterio empleado (incidencia ambiental), la clasificación, presenta a los escenarios 5 y 6, como las alternativas menos aconsejables, puesto que su incidencia es significativa en la mayoría de las categorías evaluadas. Por ejemplo, en el caso del escenario 5, la acidificación, la toxicidad humana y el efecto invernadero, pueden verse significativamente afectados, contrario a lo que sucede con el consumo de recursos y la eutrofización, que presentan una incidencia baja.

Los escenarios 1 y 2, presentan una situación particular, ya que a pesar de que presentan una incidencia ambiental significativa, para dos de las categorías evaluadas (Consumo de recursos naturales y efecto invernadero), en las otras categorías, su incidencia es baja o insignificante.

5.3.10 Discusión de resultados

5.3.10.1 Discusión de los resultados del inventario.

Una vez realizado el inventario de entradas y salidas para cada uno de los escenarios elegidos, vale la pena analizar la información obtenida, de manera que describa claramente cual es la diferencia entre las cargas ambientales de cada uno de ellos de manera que se pueda elegir el que presente un mejor desempeño ambiental.

En términos del consumo de recursos naturales y materias primas, los ocho escenarios presentan valores parecidos en el consumo de agua y de aire, esto se debe probablemente a que se han tomado valores parecidos en las eficiencias de reacción y equipos en la generación de los modelos para cada escenario.

Las diferencias significativas en el consumo de recursos naturales, se centran en el combustible, puesto que para los escenarios del 1 al 4, se evalúa el uso de Gas Natural como combustible único, y para los escenarios del 5 al 8, se utilizan diversos tipos de combustibles.

Finalmente, en términos de la comparación llevada a cabo en la Tabla 5.51, es necesario resaltar la posibilidad de utilizar criterios diferentes a la masa, tales como la energía fósil equivalente, para cada uno de los combustibles utilizados en los escenarios de evaluación.

5.3.10.2 Discusión evaluación del destino

Por medio del uso de modelos de transporte y transformación, es posible estimar el destino y la concentración de sustancias en diferentes compartimientos, sin embargo, estos resultados deben completarse con un estudio riguroso (pruebas de laboratorio, bioensayos, etcétera) para continuar con los próximos pasos de una evaluación de riesgo.

Los modelos usados aplican información diferente y variable (coeficientes de distribución, fugacidad, entre otras), no obstante, su caracterización ayuda a entender cuales son las variables más importantes en la definición de los mecanismos de transporte y transformación.

Por otra parte, las sustancias estudiadas muestran tendencias diferentes en la predicción de su destino, este aspecto confirma el hecho que cada mecanismo de transporte, está relacionado de manera diferente con una sustancia y entorno.

5.3.10.3 Discusión general de la metodología

La conexión de los resultados de una evaluación del ciclo de vida de un proceso industrial con los daños estimados, permite que los efectos generados puedan ser evaluados en diferentes niveles de detalle. Involucrando no sólo efectos globales, como son los generados por las emisiones de dióxido del carbono - CO₂ - en la combustión de combustible fósiles, sino que también es posible observar la variabilidad tal como se presentó en las Tablas 5.43 y 5.45.

Por otro lado, la introducción de indicadores de salud humana hace posible desarrollar la evaluación ambiental en un entorno local. Según los resultados presentados en la Tabla 5.43, es posible ver que el proceso de co-generación produce impactos en pérdida de años de vida (Year Of Life Lost) en mayor proporción, en los escenarios que utilizan carbón como combustible.

La introducción de indicadores de daño en el alcance de la evaluación ambiental abre una perspectiva en su aplicación en el análisis de procesos. Aún cuando el nivel de subjetividad en los resultados obtenidos podría aumentar por la adición de una nueva y compleja etapa como es la estimación de los daños, el desarrollo metodológico obtenido, es una herramienta de apoyo en la toma de decisiones para las industrias, independientemente de su capacidad productiva. Para lograr definitivamente esta condición, es necesario introducir en la metodología, una estructura que facilite la valoración económica que permita cuantificar los daños en términos de costes.

Finalmente y con base en los resultados obtenidos, las alternativas susceptibles de ser elegidas para desarrollar el proceso, son los escenarios 3 , 4, 7 y 8.

REFERENCIAS

- Aróstegui M., Leal J., Lechón Y., Linares P., Sáez R., Varela M. ExternE National implementation. Spain. Final report. European Commission (1997)
- Belevi H. Factors Determining the Element Behavior in Municipal Solid Waste Incinerators. 1. Field Studies. Environ. Sci. Technol.. 34,2501-2506. (2000)
- Fernández M. Behavior of Heavy Metals in the combustion Gases of Urban Waste Incinerators. Environ. Sci. Technol. 26 (5), 1040 – 1047. (1992)
- Herrera I., Kulay L., Castells F. Environmental Damage Assessment Applied to Process Analysis. A Decision Support Alternative. Proceedings of the First Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society. Vol I pp 13-18. (2002).
- Herrera I., Schuhmacher M., Castells F. Integration of process modelling and environmental assessment to process design. Proceedings of the First Biennial Meeting of the International Environmental Modelling and Software Society. Vol I pp 13-18. (2002)
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (SGERM-IDAE). Manuales de Energías Renovables/ Incineración de Residuos Sólidos Urbanos. España. (1992)
- Jiménez M. "El coste del Equipo productivo: Amortización y Gastos Generales de Fabricación", [en línea] 5campus.com, Contabilidad de Costes <<http://www.5campus.com/leccion/costprod>> (2003)
- Kremer M. Waste Treatment in Product Specific Life Cycle Inventories. An Approach of Material-Related Modelling. Part I: Incineration. LCA Methodology. LCA 3 (1) 47 – 55 (1998)
- Turton R., Bailie R., Whiting W., Shaeiwitz J. Analysis Synthesis, and Design of Chemical Processes. Prentice Hall. (1998)
- Ulrich G. A Guide to Chemical Engineering Process Design and Economics. John Wiley & Sons, Inc. New York, (1984)
- Verhulst, D. Thermodynamic Behavior of Metal Chlorides and Sulfates under the conditions of Incineration Furnaces. Environ. Sci. Technol. 30 (1), 50 – 56. (1996)

6 CONCLUSIONES, LECCIONES APRENDIDAS Y TRABAJO FUTURO

En el apartado actual se cubren tres aspectos fundamentales; inicialmente se presentan las principales conclusiones del trabajo de investigación, la segunda parte intenta mostrar las lecciones aprendidas durante el desarrollo de la metodología y su aplicación, y finalmente, se hace una breve descripción de las principales líneas de investigación que podrían ser desarrolladas como trabajo futuro.

6.1 CONCLUSIONES

Las conclusiones del trabajo desarrollado se orientan en tres direcciones, 1) la importancia de la transferencia de información, y los mecanismos utilizados para las diferentes herramientas involucradas, 2) la utilidad de los diferentes niveles de evaluación ambiental, y 3) la mejora en el análisis de procesos a través de la aplicación de la metodología desarrollada.

6.1.1 Transferencia de información y herramientas utilizadas.

Se ha desarrollado un protocolo de transferencia de información desde el simulador de procesos hasta las herramientas de diagnóstico ambiental. La integración de herramientas permitió utilizar los resultados de cada una de ellas de una manera cíclica. Es decir, una vez fijadas las condiciones de diseño y operación, del proceso, obtenemos con el simulador la información necesaria para realizar el análisis ambiental. Así mismo, los resultados obtenidos en dicho análisis, se utilizan (después de su evaluación) como información de entrada en una nueva

simulación, y así proponer posibles mejoras durante el diseño tales como nuevos equipos, cambios en la composición, y/o nuevas condiciones de operación.

6.1.2 Análisis de procesos desde una perspectiva ambiental

La integración del análisis de procesos y de la evaluación ambiental desarrollada, representa un aporte significativo en las tareas de toma de decisiones en el diseño de procesos.

A través de la aplicación de la metodología propuesta a los sistemas estudiados, se comprobó que puede llegar a ser una herramienta de apoyo eficaz a quienes toman las decisiones en el diseño y evaluación de procesos, puesto que permite evaluar la incidencia ambiental inherente a los procesos industriales, y prevenir sus efectos.

Los casos donde fue aplicada la metodología, corresponden a sistemas de producción que van desde simples etapas hasta procesos productivos completos. Esto permitió demostrar la factibilidad de aplicación en sistemas más complejos, basados en la relativa facilidad de modificar los códigos de programación de la transferencia.

6.1.3 Casos de aplicación

Es necesario desarrollar un modelo de la planta de incineración que se ajuste a las condiciones reales, de manera que las cargas ambientales correspondientes a metales pesados, sean aquellas originadas por el proceso, y evitar así, el uso de coeficientes de transferencia en las corrientes.

En los procesos de separación estudiados en el segundo caso de aplicación, -donde el objetivo general, además de la mejora en la transferencia, fue desarrollar aspectos involucrados con la evaluación técnica-, se realizó una comparación de alternativas desde el punto de vista técnico y ambiental.

El proceso de separación analizado en el tercer caso de aplicación, es la validación final del desarrollo metodológico obtenido. Con los resultados obtenidos en él, se puede comprobar la utilidad de la comparación de los diferentes niveles de evaluación ambiental, cuando los aspectos técnicos y económicos no permiten tomar elaborar listas comparativas por la similitud de las etapas evaluadas.

6.2 LECCIONES APRENDIDAS

La investigación en integración de análisis ambiental y de procesos, involucrando la evaluación de efectos es un campo en auge. Diferentes esfuerzos en el ámbito Europeo e internacional se han mostrado, de manera que conceptos tales como el Desarrollo Sostenible o la Ecoeficiencia, dejen de ser sólo buenas intenciones y pasen a la aplicación en los sectores industriales.

En el caso de la Unión de Europa, se ha consolidado recientemente el proyecto OMNIITOX , que es un enfoque de integración entre la Evaluación de Riesgo y de Impactos en el Ciclo de Vida de las actividades industriales, donde existe una gran posibilidad de acción.

En el caso internacional, iniciativas tales como la de SETAC y UNEP, que proponen una armonización de las prácticas de evaluación no sólo del análisis de los ciclos de vida de los productos o procesos industriales, sino también la inclusión de los costes de tales ciclos, como base para la comparación de alternativas.

En este marco, el trabajo de investigación desarrollado, propone una metodología útil como punto de partida para alcanzar la valoración de la incidencia ambiental de los procesos industriales, de una manera práctica y con rigurosidad científica, a través del perfil ambiental de un proceso.

Por otra parte, es necesario continuar con esta línea de investigación, para explorar, hasta donde puede ser satisfactoriamente aplicada la metodología con un razonable esfuerzo en las áreas de protección relacionadas con la salud humana y con los ecosistemas.

6.3 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN FUTURAS

6.3.1 Automatización de la metodología.

Es necesario, avanzar en técnicas de automatización que disminuyan el esfuerzo necesario para integrar toda la información generada tanto en el análisis de procesos, como en la evaluación ambiental. En este sentido, una línea de investigación natural, es la automatización de la fase de transferencia, de manera que el valor de las cargas ambientales se incluyan en el simulador.

De acuerdo con lo anterior, en el grupo de investigación “Análisis y Gestión Ambiental” del departamento de ingeniería química de la Universitat Rovira i Virgili, existe una área de investigación cuyo objetivo es desarrollar una herramienta informática basada en la metodología desarrollada y que involucra aspectos de optimización de los procesos industriales, aprovechando las extensiones de las herramientas de simulación, las cuales permiten una gran flexibilidad en la inclusión de variables.

6.3.2 Integración con herramientas de retrofit de procesos

Una segunda línea de investigación propuesta es la integración de la metodología con el retrofit de procesos, que es una metodología de análisis y evaluación de posibles cambios a un proceso existente, para mejorarlo con respecto a algún aspecto (Costes, Medio ambiente, seguridad, etc). El retrofit de procesos es una tarea larga y compleja, por consiguiente una herramienta para apoyar el retrofit integrado con el análisis medioambiental que usa un Perfil Medioambiental (EP) podría ser de gran ayuda en el desarrollo de alternativas mejores de procesos basado en decisiones técnicas y medioambientales.

Cómo línea de trabajo futura, se propone una estructura para el retrofit y el análisis ambiental de procesos basada en la metodología desarrollada y una Herramienta de Abstracción de Jerarquías AHA, de sus siglas en Inglés (Automatic Hierarchical Abstraction tool). El objetivo, es generar alternativas del proceso que permiten el uso óptimo de recursos y minimicen las descargas ambientales.

6.3.3 Aplicación de la metodología en otros estudios.

Es necesario desarrollar casos de estudio en otros sectores industriales, en los que se haya desarrollado análisis de ciclo de vida. La metodología desarrollada se ha aplicado durante el desarrollo de una tesis doctoral que comparó dos sistemas de producción de Fertilizantes.

El estudio desarrolló la comparación medioambiental de dos vías de producción de fertilizantes: la vía húmeda y la vía térmica. Se llama vía húmeda, a la ruta por la cual los fertilizantes de fosfatos son producidos a través de la digestión de rocas de fosfatos por ácidos inorgánicos. Para representarla, se ha seleccionado “*Single Triple Phosphate*” (TSP), un fertilizante que en su procesamiento genera gran cantidad de *phosphogypsum*, subproducto cuya baja aceptabilidad en el mercado lo convierte en un residuo industrial. Por la vía térmica se produce “*Fused Magnesium Calcium Phosphate*” (FMP). El proceso consiste en la fusión de una mezcla de roca fosfórica y *serpentite*, un mineral con un elevado contenido de magnesio, calcio y óxido de silicio. Aunque el FMP sea reconocidamente eficiente en términos del suministro de fósforo a suelos que presenten tal carencia, el consumo de energía eléctrica para realizar dicha fusión es elevado. La comparación de las dos rutas de producción se hizo a través un modelo conceptual basado en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y que comprende las siguientes etapas: Simulación de los procesos de producción de TSP y de FMP; elaboración de los Inventarios de Ciclo de Vida por el método de ecovectores; creación de Eco-Matrices de impactos y Evaluación de los daños ambientales generados a lo largo de cada sistema. Dada la diversidad de tecnologías utilizada en el sector de fertilizantes de fosfatos, fue necesario establecer algunas suposiciones que permitiesen reflejar condiciones reales de proceso tanto para el caso del TSP, como para el FMP.

6.3.4 Evaluación del riesgo en entornos genéricos y específicos.

Para la estimación del riesgo que una sustancia representa para el entorno, es necesario la evaluación del destino y exposición en los diferentes compartimentos hacia donde se puede transportar dicha sustancia.

En el caso de los ríos, debido a la fluctuación de los caudales no sólo del mismo río, sino también de las descargas de las plantas de tratamiento de aguas residuales, las concentraciones de las sustancias pueden variar significativamente.

En este marco, una línea de investigación es la continuación de la comparación de metodologías de evaluación del destino y riesgo, a través de herramientas que permitan valorar las concentraciones de sustancias contaminantes en entornos genéricos (tipo EUSES) y específicos (GREAT-ER).

Los resultados obtenidos hasta ahora (Petzet et al, 2003) muestran valores cercanos en predicción de la concentración en ríos de las sustancias descargadas por plantas de tratamientos en zonas cercanas a su nacimiento.

Esto, probablemente pueda ser explicado por el hecho de que en estas condiciones, la concentración de las sustancias es aún baja. Sin embargo, fuera de las zonas cercanas al nacimiento, los valores de la concentración son completamente diferentes, por lo que es necesario, desarrollar una nueva metodología que permita aplicar a modelos de entornos genéricos, aspectos de variabilidad espacial, de manera que puedan ser considerados tales aspectos.

