Facultad de Ingeniería
Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente

Trabajo de Diploma

Título: *Análisis exergoeconómico de la Unidad 4 de la Central Termoeléctrica (CTE) ``Carlos Manuel de Céspedes´´.*

Autor: *Wigberto García Urquiza.*

Tutores: *Dr. Mario A. Álvarez Guerra Plasencia.*
Ing. Marcos M. Consuegra Urquiza.

Junio 2014
"Año 56 de la Revolución."

UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS.

Declaración de autoría.

Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez” como parte de la culminación de los estudios de la carrera de Ingeniería en Mecánica, autorizado a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la universidad.

Firma del autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según el acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Responsable de
Información Científico-
Técnica.

Vice Decano.
Nombre y Apellidos. Firma

Firma del tutor.

Sistema de Documentación y Proyecto.
Nombre y Apellidos. Firma

Pensamiento.

La primacía de los tontos es insuperable y está garantizada para todas las épocas. El terror de esa tiranía se mitiga por su ineficiencia y sus consecuencias.

Albert Einstein

Dedicatoria.

A mis padres, mis abuelos, mi novia a y toda mi familia.

A todos mis amigos y compañeros de estudio.

Agradecimientos.

A mis padres, mis abuelos, mis tías y familia: *por haberme brindado las fuerzas para seguir adelante.*

A mi novia: *por todo el amor, cariño y apoyo que me ha dado, por mantenerse a mi lado y ser mi ángel.*

A mis amigos y compañeros: *por mantenernos unidos todos estos años y habernos ayudado mutuamente a lograr nuestros objetivos.*

A mis tutores y profesores: *por el tiempo dedicado y por todo el conocimiento que me han entregado.*

A todos los que de una forma u otra aportaron en el desarrollo de este trabajo……

Resumen.

El análisis termo y exergoeconómico es una potente herramienta que permite mejorar y optimizar el diseño de los sistemas de las centrales termoeléctricas asignándole costos a los flujos que toman parte en el proceso de generación de energía eléctrica, permite además la toma de decisiones con respecto a los mantenimientos y el reemplazo de componentes del sistema. Por ello este tipo de análisis está imponiéndose en los últimos años en el diseño y auditoría de las instalaciones industriales.

Este trabajo tiene como objetivo central realizar un análisis termo y exergoeconómico a la de la Unidad 4 de la CTE `` Carlos M. de Céspedes´´. El trabajo incluye primeramente una amplia caracterización de los principales aspectos y conceptos necesarios para realizar un análisis termoeconómico, además se define el esquema simplificado de la Unidad 4 y los flujos o corrientes que conectan los principales equipos entre sí. En un segundo momento se plantea una metodología para determinar los costes exergéticos, termo y exergoeconómicos, se plantean y resuelven los balances tanto energéticos como exergéticos y se determinan las exergías destruidas. Finalmente, se muestran los resultados obtenidos de los costes exergéticos, termoeconómicos fijos y variables y termo y exergoeconómicos unitarios, observando que los mayores costes corresponden a los flujos de vapor vivo y la salida del cilindro de alta hacia el recalentamiento intermedio.

Palabras claves:

- termodinámica
- termoeconomía
- exergía
- centrales térmicas

Índice.

Introducción. 1
Capítulo I: Marco Teórico 5
1.1 Introducción al capítulo. 5
1.2 Introducción a la termoeconomía. 5
1.3 Teoría de costes exergéticos. 6
1.3.1 Nivel de agregación. 8
1.3.2 Ambiente de referencia. 8
1.3.3 Estructura física y productiva. 9
1.3.3.1 Estructura Física. 9
1.3.3.2 Estructura Productiva 9
1.3.4 Definición de recursos, productos, subproductos, residuos y pérdidas en un sistema energético. 10
1.3.5 Balances energéticos y exergéticos. 14
1.3.5.1 Balances termodinámicos. 14
1.3.5.2 Balance de materia. 15
1.3.5.3 Balance energético. 15
1.3.5.4 Balance exergético. 15
1.3.6 Rendimiento exergético. 16
1.3.7 Costos exergéticos en un sistema energético. 18
1.3.7.1 Costo Exergético Unitario (Eficiencia y Costes). 19
1.3.7.2 Consumo Exergético. 21
1.3.7.3 Desarrollo de las ecuaciones de costos exergéticos. 21
1.3.8 Coste y Valor de los Recursos. 22
1.3.9 Exergía y economía de recursos naturales. 23
1.3.10 Ventajas del análisis exergético sobre el análisis energético. 24
1.4 Análisis termoeconómico. 25
1.4.1 Costes termoeconómicos. 27
1.5 Optimización. 30
Conclusiones parciales. 33
Capítulo II: Metodología para la asignación de costes exergo y termoeconómicos de la Unidad 4 de la CTE de Cienfuegos. 34
2.1. Introducción al capítulo. 34

2.2 Aplicación de la teoría de sistemas (Teoría de los costos exergéticos) al análisis exergético. 34
2.2.1 Descripción del bloque energético. 34
2.3 Equipos fundamentales de la unidad 4 de la ETE ``Carlos M. de Céspedes´´. 35
2.4 Formación de la matriz de incidencia(A) y los balances termodinámicos. .. 36
2.5 El coste exergético. 45
2.5.1 Conformación de la matriz adicional ($\boldsymbol{\alpha}$) y los vectores $\boldsymbol{\omega}$ y $\boldsymbol{\Omega}$ para el cálculo de los costos exergéticos y los costos exergéticos unitarios. 45
2.6 El coste termoeconómico:..... 53
2.6.1 Balance de coste termoeconómico. 53
Conclusiones Parciales. 61
Capítulo 3: Análisis de los resultados. 62
3.1 Costes exergéticos. 62
3.2 Costes termoeconómicos. 65
3.2.1 Costes termo y exergoeconómicos. 65
3.2.2 Costos termo y exergoeconómicos variables. 70
Conclusiones parciales. 75
Conclusiones generales. 76
Recomendaciones. 78
Referencias 79
Anexos. 81

Introducción.

El aumento de los costos de los recursos energéticos (asociado al agotamiento de los mismos), los problemas de contaminación y el calentamiento global han promovido el interés por el uso eficiente de la energía a nivel mundial y el desarrollo de acciones para la reducción de las pérdidas energéticas que permitirán evitar el agotamiento de recursos energéticos no renovables y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (CO2), entre otros.

Para lograr esto se han desarrollado en los últimos años técnicas de optimización y de uso eficiente de la energía, estas iniciativas propician la introducción cada vez más acelerada de técnicas de análisis, control, mejoramiento e inversión que lleven a instalar o a explotar tecnologías cada vez más eficientes, mediante la integración de diferentes ramas de la ingeniería. (Oktay Z., 2009)

Al igual que muchos países del mundo, Cuba está muy interesada en el desarrollo de esas acciones y a pesar de los escasos recursos económicos con que cuenta para generalizar el uso de energías limpias y de equipamientos eficientes, manifiesta una clara prioridad política hacia la reducción de la dependencia de los hidrocarburos y la investigación científica asociada al uso racional y eficiente de la energía y las técnicas de análisis de la eficiencia energética.

Los índices tradicionales de eficacia energética de los procesos suelen manejar como equivalentes todas las formas de energía sin tener en cuenta sus calidades respectivas. Una manera más racional de proceder ha de buscarse en el empleo de las diversas exergías, porque así se toman en cuenta las verdaderas capacidades de producir efecto útil. Se llega de este modo a expresiones más realistas de la eficacia energética de los procesos, mediante la aplicación, no solo del primer principio de la Termodinámica, sino también del segundo, para establecer el patrón de la eficacia máxima posible, al que se refieren los procesos analizados.

Una de las ramas de la ingeniería que se enfoca a estudiar, analizar y mejorar estas técnicas es la termoeconomía, que cumple un papel muy importante en cuanto a identificar el origen de las pérdidas de energía y cuantificarlas mediante la asignación de costos exergéticos y termoeconómicos.

La fusión de la Economía y la Termodinámica ha dado lugar a una nueva disciplina: la Termoeconomía. Los primeros trabajos indicando esta necesidad fueron desarrollados en la Escuela de Ingeniería del MIT, por M. Tribus y R. B. Evans, en la década de los años 1960 (Gago, 2010). Sin embargo, no es hasta finales de los años 1980 que diferentes investigadores demuestran a escala industrial la validez de esta integración, siendo relevantes los trabajos de G. Tsatsaronis, M. Winhold y C. G. Strojanoff, en el análisis y optimización con estas técnicas del diseño de una planta termoeléctrica de ciclo combinado. (Lozano M. A., 2009) (Tribus N. y Evans R.B, 1962) (Valero A., 1998)

Históricamente, las primeras propuestas de asignación de costos a los productos de una instalación, a partir de criterios físicos fueron hechas por Keenan (1932), que calculó el costo del vapor y del trabajo producidos en una planta de cogeneración en base a su exergía, y por Benedict quien en 1949 determinó los costos imputables a las irreversibilidades de una planta de separación de aire y los utilizó como criterio para obtener el diseño óptimo.

De esta forma, una aplicación importante de la termoeconomía es la contabilidad de costos exergéticos mediante la “teoría de costos exergéticos”, la cual permite evaluar el impacto de los recursos en cada equipo de un sistema y determinar las irreversibilidades que se generan en sus procesos. (Torres C. V. A., 2001) (Valero A., 1998)

Mediante la teoría de costos exergéticos se evalúan los costos exergéticos y termoeconómicos de cada flujo de los equipos principales de un sistema, para conocer el costo real tanto de los recursos como de los productos que interactúan en los mismos. En este análisis, se emplea como base el análisis exergético, que

se encarga de evaluar los procesos energéticos mediante la utilización de la conservación de la masa y la energía junto con la segunda ley de la termodinámica.

En los últimos años en el Centro de Estudio de Energía y Medio Ambiente (CEEMA) de la Universidad de Cienfuegos se han llevado a cabo investigaciones junto a la Empresa Termoeléctrica de Cienfuegos (ETE) con el objetivo de establecer indicadores energéticos y exergéticos utilizados a nivel mundial en las plantas térmicas y que no se ponen en práctica en la ETE Cienfuegos. Aunque se ha avanzado en el tema todavía la ETE carece de indicadores termoeconómicos y exergoeconómicos que evalúen su desempeño.

Problema.

La CTE Carlos Manuel de Céspedes utiliza solamente indicadores de tipo energéticos basados en la primera Ley de la Termodinámica para la evaluación de su funcionamiento. Estos no permiten determinar con precisión el desempeño individual de los principales equipos ni determinar el costo exergo y termoeconómico de los flujos.

Hipótesis.

Aplicando la metodología del coste exergético y termoeconómico al esquema térmico de la Unidad 4 de la CTE Carlos Manuel de Céspedes podría evaluarse de forma más efectiva el rendimiento de los diferentes equipos y sistemas, e identificar y encontrar alternativas de ahorro de energía.

Objetivo general.

Evaluar mediante la teoría del coste exergético y termoeconómico el desempeño energético de los principales equipos y sistemas de la Unidad 4 de la CTE Carlos Manuel de Céspedes.

Objetivos específicos.

1. Realizar una búsqueda bibliográfica acerca del estado del arte de la teoría del coste exergético y termoeconómico y sus aplicaciones en la evaluación de esquemas térmicos de plantas térmicas de potencia.
2. Desarrollar metodología de cálculo y expresiones particulares para determinar los costes exergéticos y termoeconómicos de los principales equipos y sistemas de la Unidad 4 de la CTE Carlos Manuel de Céspedes cada flujo.
3. Aplicar la metodología desarrollada y evaluar los costes exergéticos y termoeconómicos de los principales equipos y sistemas de la Unidad 4.

Capítulo I: Marco Teórico

1.1 Introducción al capítulo.

En este primer capítulo se realizará una detallada introducción a la termoeconomía donde se expondrán los principales conceptos y consideraciones a tener en cuenta para realizar un estudio profundo de los costes exergéticos, exergo y termoeconómicos de una central termoeléctrica.

1.2 Introducción a la termoeconomía.

La Termoeconomía, mediante una aplicación integrada y rigurosa de la economía y la termodinámica, proporciona una herramienta muy potente y rigurosa para el análisis, la evaluación y la optimización de sistemas industriales. Todo ingeniero ha de ser capaz de analizar y evaluar los equipos e instalaciones que encuentre en su campo de actividad, con el fin, entre otros, de optimizar los costes.

También permite lograr unos resultados que no se habrían obtenido con los métodos de análisis termodinámico y económico tradicionales. La diferencia fundamental radica en el uso del Segundo Principio de la Termodinámica y la noción de exergía. Se toma la exergía como base racional para asignación de costes económicos a los recursos y productos que intervienen en los procesos industriales y para la valoración económica de las imperfecciones termodinámicas de dichos procesos. Todo esto constituye una aportación sustancial al análisis, evaluación y optimización de sistemas.

Cuando con un sistema dado se obtiene un solo producto, su coste de producción será sencillamente la suma de todos los costes originados, y se calcula mediante un balance de costes. Pero si tuviera más de un producto, se necesitarían tantas ecuaciones adicionales como productos que excedan de uno. La exergía proporciona un criterio riguroso para la formulación de dichas ecuaciones y la consiguiente determinación de los costes de producción individuales.

En general, la termoeconomía tiene los siguientes fines:

- Calcular los costes de los productos intermedios y finales de los procesos.
- Analizar el proceso de formación y el flujo de los costes en los procesos.
- Valorar los costes de las destrucciones y pérdidas de exergía.
- Optimizar el funcionamiento de cada componente de un sistema y el de éste en su conjunto.
- Optimizar el coste de los productos de un sistema.

Por ejemplo, las comparaciones de costes de la destrucción de exergía en los equipos con sus respectivos costes de inversión permiten juzgar si el ahorro exergético aportado por una cierta mejora de eficiencia justifica la mayor inversión que probablemente se requiera. Estos cálculos son sumamente útiles en la toma de decisiones de mejora. Cuando se trata de un sistema complejo, el uso de aproximaciones sucesivas, guiadas por la termoeconomía, constituye probablemente el mejor recurso práctico de optimización existente en la actualidad.

Además se aplica a una extraordinaria variedad de sistemas, tales como los que pueden encontrarse en la industria petrolera, química o metalúrgica, generación de energía eléctrica, climatización, etc. Su utilización se extiende tanto al diseño de nuevas plantas como al análisis de instalaciones existentes - para diagnosticar y valorar las deficiencias- y la evaluación de mejoras, ampliaciones o modificaciones.

1.3 Teoría de costes exergéticos.

El concepto de exergía es el parámetro que se utiliza en la termoeconomía, ya que la exergía, a diferencia de la energía, toma en cuenta tanto la cantidad de energía disponible como su calidad. Es ahí donde cumple su papel principal en la teoría de costo exergético, en el que determina la cantidad de exergía necesaria para producir

un flujo. (Torres C. V. A., 2001)

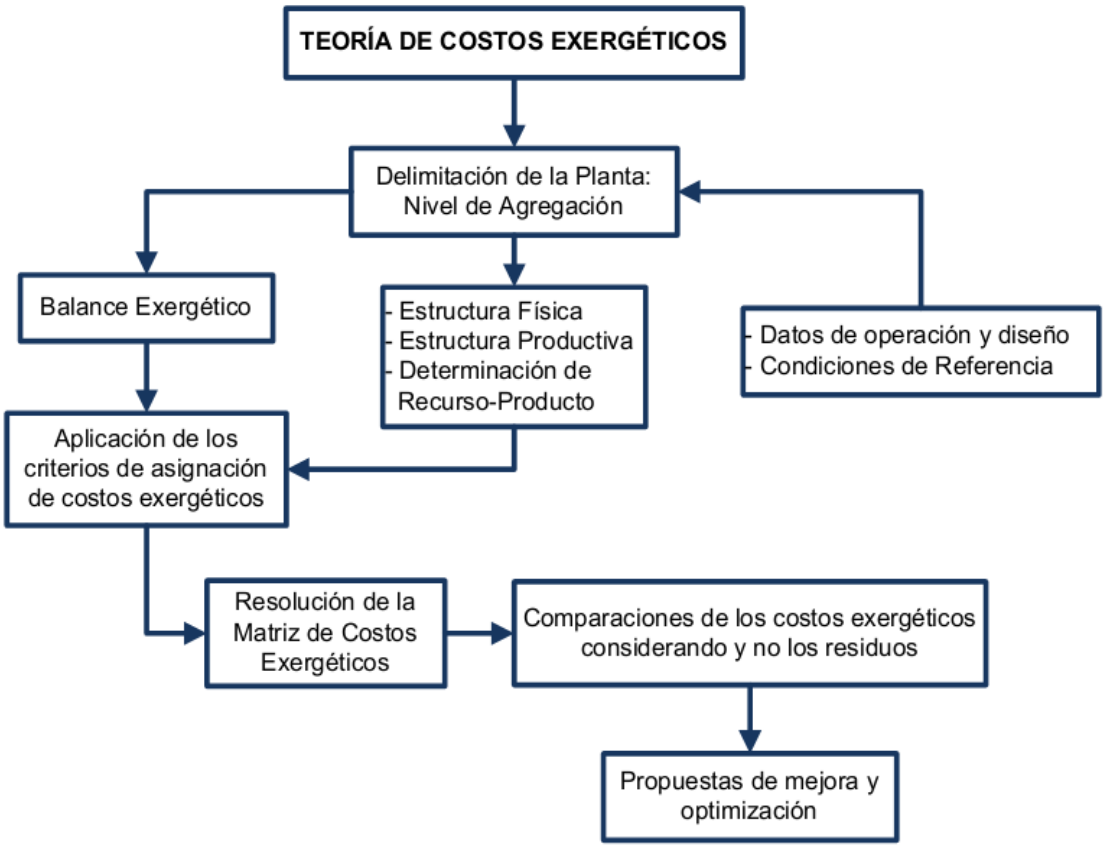


Fig. 1.1 Diagrama de la Teoría de los costes exergéticos.

Después que se analizan y evalúan termodinámicamente las ineficiencias (pérdidas de exergía y destrucción de exergía) en un volumen de control, es necesario conocer también el costo que implican estas ineficiencias para mejorar rendimiento de los equipos mediante la reducción de los costos exergéticos de los productos finales de los mismos.

La asignación de costos exergéticos se obtiene por medio de la teoría de costos exergéticos, la cual evalúa los costos exergéticos para cada flujo en los equipos de un sistema, para conocer el costo real tanto de los recursos como de los productos que interactúan en cada equipo o sistema global.

Para aplicar esta herramienta de la termoeconomía, se requiere del análisis exergético como base, el cual evalúa los procesos energéticos mediante la utilización de la conservación de la masa y la energía junto con la segunda ley de la termodinámica, para el diseño, análisis y mejoramiento del rendimiento de los equipos y sistemas energéticos. (Benítez A. J.) (Torres C., 1991.)

Con el objetivo de buscar el mejor entendimiento de la teoría de costos exergéticos, se describen a continuación una serie de conceptos importantes utilizados en el análisis de costos exergéticos.

1.3.1 Nivel de agregación.

En la evaluación de un sistema energético, es muy importante delimitar el grado o profundidad de dicha evaluación. Es por eso que se hace necesario definir el nivel de agregación del sistema a evaluar, que se define por la agrupación de los equipos que lo componen, de tal forma que el conjunto de estos grupos de equipos representen el sistema analizado.

Los diferentes niveles de agregación dependerán del criterio del evaluador, y se seleccionará aquel que represente de manera adecuada el sistema analizado. Se debe tener presente que al ir disminuyendo el nivel de agregación se elevará el número de flujos internos de los equipos, haciendo que se hagan más complejos los cálculos, o no se tengan todos los datos necesarios. Sin embargo, cuando el análisis se hace más detallado, las posibilidades de determinar las irreversibilidades del sistema son mayores. (Gago, 2010)

1.3.2 Ambiente de referencia.

Para realizar el análisis exergético, se requiere establecer el ambiente de referencia a partir del cual se realizan los respectivos cálculos. Para el caso de sistemas de generación de potencia se acostumbra tomar el ambiente de referencia como: presión de 1.013 bar y temperatura de 25 °C.

1.3.3 Estructura física y productiva.

Todo sistema energético está formado por n equipos o componentes relacionados entre sí, y se relaciona con el entorno a través de m interacciones (masa, energía, dinero, entre otros) que conforman o determinan su estructura. Esta estructura se encuentra divida en dos tipos: estructura física y estructura productiva, las cuales se describen a continuación: (Torres C. V. A., 2001) (Uche, 2000)

1.3.3.1 Estructura Física.

La estructura física incluye únicamente los equipos y los flujos, de manera que describe adecuadamente el sistema energético en cuanto a la ubicación de los equipos y los diversos flujos que circulan por ellos.

Con una misma estructura física pueden ser posibles varias productivas o económicas distintas, que conducirán a resultados diferentes. Por otra parte, la evaluación de la eficiencia o rendimiento de un equipo se basará en criterios de carácter económico y no sólo en su perfección termodinámica. (Gago, 2010)

1.3.3.2 Estructura Productiva

Cuando se tiene la estructura física del sistema a evaluar, se distribuyen los diferentes flujos en función a sus propósitos dentro de cada equipo (recurso-producto-residuo). Basados en la estructura productiva del sistema en estudio, se obtienen las relaciones recurso-producto que dan como resultado el modelo de costos exergéticos. Esta estructura productiva está en función de las consideraciones que se adopten sobre el propósito y finalidad de los flujos del sistema, clasificando las corrientes como recursos, productos o residuos.

De acuerdo con la estructura económica o productiva del sistema, las corrientes entrantes o salientes en cada uno de los equipos que lo componen se pueden

clasificar en recursos, productos y residuos o pérdidas. El producto P de un equipo representa el efecto útil deseado que proporciona de acuerdo con su finalidad. El recurso R representa lo que se consume para generar el producto. Tanto el uno como el otro pueden incluir más de una corriente entrante o saliente –indistintamente– en el equipo. Un equipo puede tener flujos salientes al ambiente, que tengan el carácter de residuos o pérdidas (con o sin flujo de materia), esto es sin efecto útil alguno (salidas inútiles); su conjunto se conoce como residuo del equipo (Gago, 2010).

1.3.4 Definición de recursos, productos, subproductos, residuos y pérdidas en un sistema energético.

Empezaremos por abordar la representación de un sistema cualquiera en función de sus recursos, productos y residuos (representación “R/P/Residuos”). Así se identificarán los recursos necesarios para generar cada producto y se dispondrá de una base rigurosa para la medición de rendimientos. Esta misma base servirá para establecer el concepto de coste exergético de una corriente, el cual vendrá medido por la exergía requerida para producirla. El punto de vista será económico, pero se manejarán exergías en lugar de importes monetarios. (Torres C., 1991.) (Serra L., 1994.)

La teoría de costos exergéticos involucra la definición de recurso-producto de un proceso de producción de un sistema energético, donde el flujo de exergía obtenida en el proceso en un equipo es llamado “producto”, y el flujo de exergía necesario para producirlo, se le llama “recurso” (en la literatura en inglés lo llaman “fuel” y en español en ocasiones se conoce con este mismo nombre). Esta definición se aplica a todos los flujos que entran y salen de cada uno de los equipos que componen el sistema energético.

Sin embargo, no siempre los productos obtenidos en cada equipo son funcionales, es decir, existen flujos que son desechados al ambiente sin ninguna utilidad. En este caso reciben el nombre de residuos o pérdidas.

Pérdidas: Flujos que no tienen ninguna utilidad y son eliminados sin producir prejuicios, o necesitar más recursos externos, incluyendo inversiones o equipamiento.

Residuos: Flujos que no tienen ninguna utilidad, pero que su existencia produciría perjuicios en la instalación o en el entorno, y por lo tanto es necesario un consumo adicional de recursos energéticos y económicos para que dichos flujos sean eliminados y/o convertidos en flujos de pérdidas, donde tiene un coste exergético. Este coste puede formarse en el propio equipo en el que se produce el flujo, pero también a lo largo de una cadena de flujos y equipos del proceso de producción que generan el residuo. Por ejemplo, en el caso de los gases de combustión, los gases se producen en la cámara de combustión y afectan a todo el proceso de intercambio de calor: sobrecalentador, precalentadores de aire, economizador…

Por lo tanto, en la asignación de costos en un sistema energético, debe involucrar también la localización de los residuos, es decir, donde fueron producidos. Estos flujos no solo involucran los costos de su posterior tratamiento para la disminución de su impacto ecológico sino que también incluyen los costos de su formación. Por eso es que dentro del análisis exergético, uno de los objetivos primordiales es la disminución de los residuos, o su aprovechamiento en otros procesos energéticos.

Subproductos: Flujos adicionales obtenidos, que a veces son inútiles desde un punto de vista de su posterior utilización en otras partes del proceso, y siempre tienen un coste no competitivo, ya que de otra forma serían objeto principal del proceso. A pesar de todo en determinadas ocasiones pueden ser reutilizados produciendo beneficios, que repercutan en el coste del producto final. Ejemplos de este tipo de flujos los tenemos el calor disipado en el condensador de un ciclo de vapor que puede ser utilizado para calefacción, o las cenizas de la combustión para la fabricación de cemento. En tal caso se genera un coste de residuo menor que 0, equivalente a la cantidad de combustible ahorrado.

Cuando se tiene la estructura física y la estructura productiva del sistema a analizar, y clasificados los flujos que entran y salen en cada componente, como recurso,

producto, residuo o pérdida, el balance de costos para cada componente puede ser expresado por la ecuación (1.1):

$$\boldsymbol{P = R + I_{total}} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.1)}$$

La ecuación (1.1) indica que el costo del producto (P) de un equipo es igual al costo de los recursos (R) utilizados para producirlo, más el costo de las irreversibilidades totales (internas y externas) (ITotal) que ha generado el proceso.

A consecuencia de estas definiciones, todo equipo, cualquiera que sea su complejidad, podrá representarse de la forma sintética dibujada en la figura 1.2. R, P y Residuos se expresan en términos de flujos exergéticos.

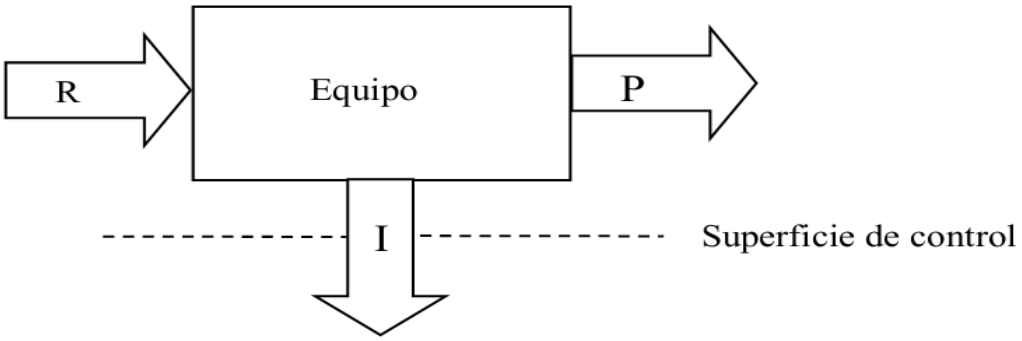


Fig. 1.2 Representación de R/P/I (García J., 2009)

La representación R/P/I como ya se ha explicado anteriormente requiere la previa identificación de los recursos, productos y residuos, mediante unos juicios de valor económicos, sin limitarse a la mera estructura física del sistema.

En la figura 1.3 se ejemplifica a través de algunos de los principales equipos de una central termoeléctrica la identificación de los recursos, los productos y las irreversibilidades o residuos expresados por supuesto en términos de flujos exergéticos.

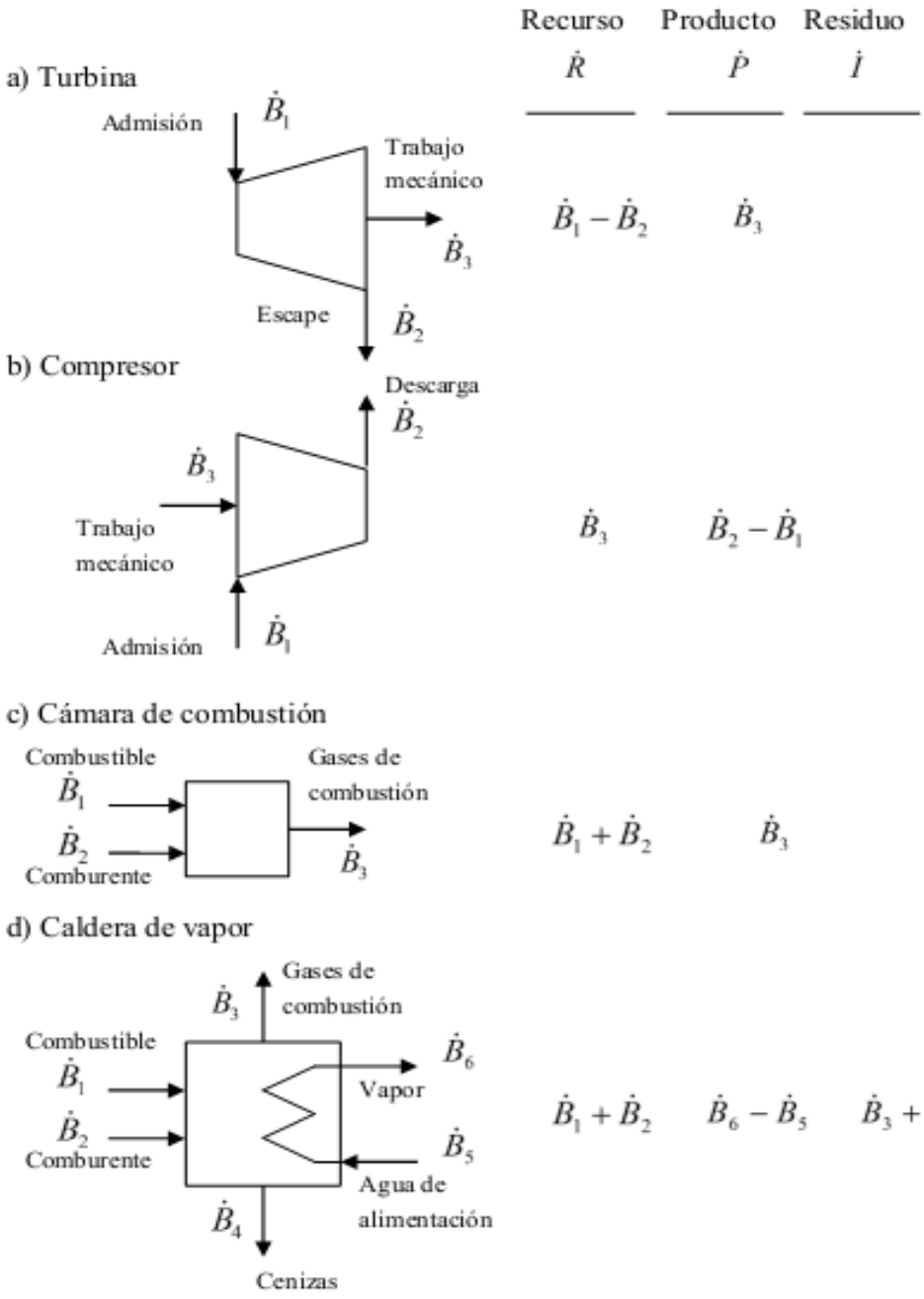


Fig. 1.3 Identificación de recursos y productos. (García J., 2009)

En la figura (**1.4**) y en ejemplos precedentes se aprecia que el recurso y el producto de un equipo pueden incluir tanto corrientes entrantes como salientes indistintamente.

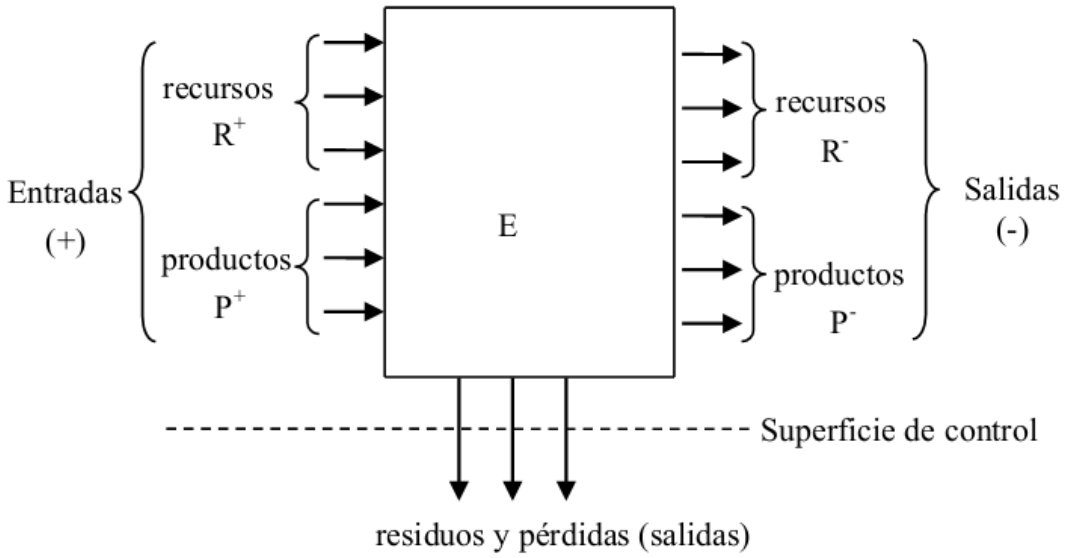


Fig. 1.4 Representación de entradas, salidas y pérdidas o residuos. (García J., 2009)

1.3.5 Balances energéticos y exergéticos.

Para poder asignar costos exergéticos a flujos es necesario también realizar los balances termodinámicos del sistema o central termoeléctrica que se analizará. (Valero, 1996)

1.3.5.1 Balances termodinámicos.

En el caso general de un sistema abierto en régimen permanente, en el que se producen procesos cualesquiera, físicos o químicos (no nucleares) hay varios flujos de materias entrantes y salientes, intercambio de calor con manantiales caloríficos a diversas temperaturas y producción de trabajo útil. En un intervalo de tiempo $\boldsymbol{dt}$, entra en el sistema la masa $\boldsymbol{dm_e}$ por la entrada genérica e, sale la masa $\boldsymbol{dm_s}$ por la salida genérica s, entra el calor $\boldsymbol{dQ}$ a la temperatura genérica T y se realiza el trabajo útil $\boldsymbol{dW_u}$. Despreciamos la energía cinética y potencial de las corrientes entrantes y salientes (Valero, 1996).

1.3.5.2 Balance de materia.

Como el sistema se encuentra en régimen permanente, la cantidad de materia entrante ha de ser igual a la saliente.

$$\sum \boldsymbol{dm_e} = \sum \boldsymbol{dm_s} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.2)}$$

1.3.5.3 Balance energético.

Se escribe inmediatamente por aplicación del primer principio:

$$\sum \boldsymbol{h_e dm_e} + \sum \boldsymbol{dQ} = \sum \boldsymbol{h_s dm_s} + \boldsymbol{dW_u} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.3)}$$

En donde $\boldsymbol{h_e}$ y $\boldsymbol{h_s}$ representan respectivamente las entalpías específicas de las entradas y salidas de materia genéricas.

Ahora, por aplicación del Segundo Principio, el **balance entrópico.**

$$\sum \boldsymbol{s_e dm_e} + \sum \frac{\boldsymbol{dQ}}{\boldsymbol{T}} + \boldsymbol{dS_G} = \sum \boldsymbol{s_s dm_s} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.4)}$$

En donde $\boldsymbol{s_e}$y $\boldsymbol{s_s}$son las entropías específicas genéricas entrantes y salientes y $\boldsymbol{dS_G}$representa la entropía generada o creada en el sistema en el intervalo de tiempo$\boldsymbol{dt}$**.**

1.3.5.4 Balance exergético.

$$\sum \boldsymbol{b_e dm_e} + \sum \boldsymbol{db_Q} - \boldsymbol{T_0 dS_g} = \sum \boldsymbol{b_s dm_s} + \boldsymbol{dW_u} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.5)}$$

En este balance se aprecia que la exergía destruida $\boldsymbol{dB_d}$es igual a $\boldsymbol{T_0 dS_g}$**,** que es la expresión del Teorema de Gouy Stodola en un sistema abierto. En consecuencia el balance exergético se puede escribir también de la siguiente forma:

$$\sum \boldsymbol{b_e dm_e} + \sum \boldsymbol{db_Q} = \sum \boldsymbol{b_s dm_s} + \boldsymbol{dW_u} + \boldsymbol{dB_d} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.6)}$$

En la práctica, los balances se suelen referir al flujo de la unidad de masa o de una cierta cantidad de materia por el sistema, a la producción de un cierto trabajo útil o a la unidad de tiempo.

1.3.6 Rendimiento exergético.

La utilización del balance exergético es un recurso valiosísimo en el análisis de la eficacia energética de instalaciones o de procesos industriales. Se realizan balances para instalaciones completas, para partes o subconjuntos, o para elementos unitarios en el proceso. Así se detectan los puntos en los que se destruye más exergía, debido a las irreversibilidades más importantes del proceso, y con ellos las principales oportunidades de mejora.

Los índices tradicionales de eficacia energética de los procesos suelen manejar como equivalentes todas las formas de energía sin tener en cuenta sus calidades respectivas. Una manera más racional de proceder ha de buscarse en el empleo de las diversas exergías, porque así se toman en cuenta las verdaderas capacidades de producir efecto útil. Se llega de este modo a expresiones más realistas de la eficacia energética de los procesos, mediante la aplicación, no solo del primer principio, sino también del segundo, para establecer el patrón de la eficacia máxima posible, al que se refieren los procesos analizados. (Valero, 1996)

Salvo en procesos puramente disipativos, cuyo rendimiento es evidentemente nulo, los flujos exergéticos pueden clasificarse en una de las dos clases siguientes (Valero, 1996):

- Salidas, productos o efectos útiles deseados. $(\boldsymbol{B}_{prod})$.
- Entradas o recursos necesarios. $(\boldsymbol{B}_{rec})$.

Los flujos exergéticos pueden producirse de diversas formas:

- Como trabajo útil $\boldsymbol{W}_{\boldsymbol{u}}$ producido o consumido.
- Como exergía calorífica $\boldsymbol{b}_{\boldsymbol{Q}}$ absorbida o cedida.
- Como exergía $\boldsymbol{b}_{\boldsymbol{e}}$y $\boldsymbol{b}_{\boldsymbol{s}}$transportada por materia entrante o saliente.

Una vez agrupados todos los flujos exergéticos, el balance exergético se convierte en:

$$\sum \boldsymbol{B}_{rec} = \sum \boldsymbol{B}_{prod} + \boldsymbol{B_d} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.7)}$$

Se define el rendimiento exergético o racional mediante la expresión:

$$\boldsymbol{\zeta} = \frac{\sum \boldsymbol{B}_{prod}}{\sum \boldsymbol{B}_{rec}} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.8)}$$

A consecuencia del Segundo Principio, $\boldsymbol{B_d \geq 0}$, ha de ser $\sum \boldsymbol{B}_{rec} \geq \sum \boldsymbol{B}_{prod}$ y

$\boldsymbol{\zeta \leq 1.}$

Otra expresión de $\boldsymbol{\zeta}$, en la que aparece explícitamente la exergía destruida o perdida.

$$\boldsymbol{\zeta} = \boldsymbol{1} - \frac{\boldsymbol{B_d}}{\sum \boldsymbol{B}_{rec}} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.9)}$$

Como aplicaremos este método al análisis de una central termoeléctrica el balance exergético será:

$$\boldsymbol{B_{ox} + B_{comb} = B_h + W_u + B_d} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.10)}$$

En este balance no aparece un término correspondiente al calor $\boldsymbol{Q_0}$, cedido al ambiente, porque su exergía es nula. Corrientemente puede suponerse $\boldsymbol{B_h = 0}$, como si los humos llegasen a mezclarse perfectamente con la atmósfera dentro de los límites del sistema. Entonces:

$$\boldsymbol{B_{ox} + B_{comb} = W_u + B_d} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.11)}$$

El rendimiento exergético verifica:

$$\boldsymbol{\zeta} = \frac{\boldsymbol{W_u}}{\boldsymbol{B_{ox} + B_{comb}}} = \boldsymbol{1} - \frac{\boldsymbol{B_d}}{\boldsymbol{B_{ox} + B_{comb}}} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.12)}$$

Cuando el oxidante es aire atmosférico $\boldsymbol{B_{ox} = 0}$

$$\zeta = \frac{\boldsymbol{W_u}}{\boldsymbol{B_{comb}}} = \mathbf{1} - \frac{\boldsymbol{B_d}}{\boldsymbol{B_{comb}}} \qquad \boldsymbol{Ec.}\,(\mathbf{1.13})$$

Los flujos exergéticos pueden también valorarse mediante el cambio experimentado por la exergía de corrientes de materia que atraviesen el sistema sin perder su integridad, tal como en los intercambiadores de calor. En tales casos la expresión **1.8** toma la siguiente forma:

$$\zeta = \frac{\sum \Delta \boldsymbol{B}(\boldsymbol{corrientes\ que\ ganan\ energía})}{-\sum \Delta \boldsymbol{B}(\boldsymbol{corrientes\ que\ ceden\ energía})} \qquad \boldsymbol{Ec.}\,(\mathbf{1.14})$$

Este rendimiento suele denominarse extractivo, mientras que el **1.8** se llama global.

El análisis exergético posee, evidentemente, una serie de cualidades que lo acreditan como un recurso racional y potente para el estudio de sistemas energéticos (Valero, 1996), (Torres C. V. A., 2001):

- Mide rigurosamente la perfección termodinámica de los procesos.
- Tiene una validez totalmente general y es aplicable a cualquier proceso.
- Proporciona una base racional para el análisis de sistemas complejos, tales como sistemas de cogeneración de energía eléctrica y vapor, o de producción de diversas sustancias.
- En un sistema complejo, $\boldsymbol{B_d}$ es la suma de las exergías perdidas en los diversos subsistemas o componentes que lo constituyen.

1.3.7 Costos exergéticos en un sistema energético.

La asignación de costos exergéticos en un sistema energético, se realiza cuando ya se ha definido tanto el nivel de agregación, su estructura física, su estructura productiva y los valores de sus flujos de exergías. Teniendo esta información se tienen los elementos necesarios para la obtención de los costos exergéticos de

todos y cada uno de los flujos de materia y/o energía significativos. (Lozano M. A., 2009) (Torres C. V. A., 2001)

El costo exergético está estrechamente relacionado con la eficiencia exergética de un proceso o equipo. El costo exergético es el inverso de la eficiencia exergética de un proceso o equipo. Este costo indica la cantidad de exergía requerida en un proceso para obtener una unidad de producto. Este valor es mayor o igual a uno, siendo igual a uno únicamente cuando se tiene un proceso reversible tanto interna como externamente. (Valero, 1996)

1.3.7.1 Costo Exergético Unitario (Eficiencia y Costes).

Este costo indica la cantidad de exergía requerida (recurso) para producir una unidad de exergía (producto). Estos costos van en aumento conforme más complejo y/o ineficiente se vuelven los procesos de producción de un determinado flujo de un sistema energético (Valero, 1996), (Gago, 2010).

El coste de producir algo, en un sentido general, es la cantidad de recursos necesarios para obtenerlo. Según esto la eficiencia y el coste tienen la misma base conceptual. La eficiencia suele expresarse libremente en una gran variedad de unidades. Tanto el producto como los recursos empleados se miden en las unidades convenientes en cada proceso. Por el contrario el coste tiende a expresarse en unidades monetarias (Valero, 1996), (Gago, 2010).

Pero se puede aproximar ambos conceptos suficientemente. Si se analizan en un proceso simple y medimos los recursos y el producto en términos de exergía, la eficiencia exergética, $\boldsymbol{\zeta}$, es la inversa del consumo exergético de recursos, $\boldsymbol{k}$, y esto es justamente su coste exergético, que denotamos por $\boldsymbol{k}^*$ (Valero A., 1998)**,** (Gago, 2010)**.**

$$\frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{\zeta}} = \boldsymbol{k} = \frac{\boldsymbol{R}(\boldsymbol{unidades\ de\ exergía})}{\boldsymbol{P}(\boldsymbol{unidades\ de\ exergía})} = \boldsymbol{k}^* \qquad \boldsymbol{Ec.}(\mathbf{1.15})$$

Sin embargo, todos los procesos están encadenados, el recurso que se utiliza en un proceso, ha sido producto de algún otro proceso que a su vez ha consumido recursos que son productos de productos anteriores.

Una vez definidos los límites de un proceso y sus componentes, y cada uno de estos con una función predefinida que define su objetivo de producción, los recursos empleados y por tanto su eficiencia, es posible definir el coste exergético de un flujo en el proceso como la cantidad de recursos exergéticos que entran al sistema, necesarios para producir dicho flujo.

Supongamos, a modo de ejemplo, un proceso/sistema formado por dos componentes 1 y 2, con eficiencias definidas y unidos de forma secuencial, como la figura **1.5.**

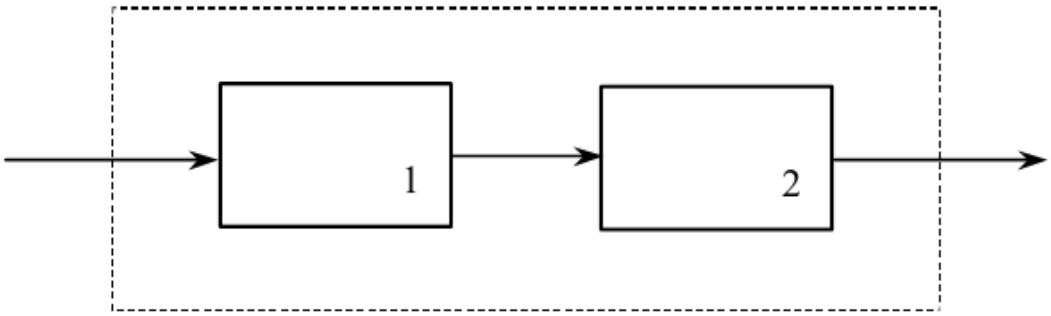


Fig. 1.5 Sistema secuencial. (García J., 2009)

Para producir P_2 , el producto del sistema, es necesario consumir R_2 recursos locales, así el consumo exergético unitario de la componente 2 es: $\boldsymbol{k_2 = R_2 / P_2}$; $\boldsymbol{R_2}$ pero es a su vez producto del equipo 1, $\boldsymbol{R_2 = P_1}$ Y para producir $\boldsymbol{P_1}$ han sido necesarios $\boldsymbol{R_1}$ recursos locales, que son también los recursos totales que llegan al sistema. Por tanto el coste exergético unitario del producto del sistema es: $\boldsymbol{R_1/P_2}$, estas relaciones pueden expresarse en términos de costes exergéticos unitarios (Torres C. V. A., 2001):

$$\boldsymbol{k^*_{R,1} = 1k^*_{P,1} = k_1}$$

$$\boldsymbol{k^*_{R,2} = k_1 k^*_{P,2} = k_1 k_2} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.16)}$$

Siempre el coste exergético unitario es mayor que la unidad, y este va creciendo conforme la estructura de producción de un determinado flujo es más compleja y/o ineficiente. En términos de costes exergéticos tendríamos:

$$\boldsymbol{R_1^* = R_1 P_1^* = R_1 = P_1 + I_1}$$

$$\boldsymbol{R_2^* = P_1^* = R_2 + I_1 P_1^* = R_2^* = P_2 + I_1 + I_2} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.17)}$$

Como puede verse en estas relaciones el coste exergético de un producto es igual a su exergía más la suma de las irreversibilidades acumuladas a lo largo del proceso.

1.3.7.2 Consumo Exergético.

El consumo exergético es la cantidad de exergía contenida en el producto, más las irreversibilidades totales generadas durante el proceso de su producción, que corresponde al recurso exergético suministrado (Serra L., 1994.).

1.3.7.3 Desarrollo de las ecuaciones de costos exergéticos.

La teoría de costos exergéticos requiere de ciertos criterios o “proposiciones recurso-producto” para establecer las ecuaciones que definen las interacciones de los flujos exergéticos en el sistema energético en su estructura productiva. Estos criterios están basados en el costo exergético unitario de cada flujo, como se mencionan a continuación (Valero A., 1998):

1. Debido a la ausencia de asignaciones externas, el costo unitario de los recursos de entrada al sistema será igual a la unidad (su costo exergético es igual a su exergía).

2. El costo del producto o productos de un componente debe ser igual a la suma de los costos exergéticos de los flujos de entrada. Cuando se desconocen los valores de costos exergéticos de las corrientes de pérdidas, éstas se desprecian.

3. Todos los flujos que provienen del entorno y entran al sistema tienen un costo exergético unitario igual a la unidad. Por ejemplo, el aire de entrada a un compresor.

4. En los equipos con una entrada (recurso) y dos o más salidas (producto), los costos de sus productos tendrán el mismo costo exergético unitario, ya que llevaron el mismo proceso de formación.

5. El costo de los residuos es agregado al proceso o equipo donde fue producido, y no donde es finalmente expulsado hacia el medio ambiente. Pero cuando éstos no se quieren tomar en cuenta en el análisis de costos exergéticos, tienen valor cero.

1.3.8 Coste y Valor de los Recursos.

El límite de los sistemas, pueden ser ampliado, piénsese por ejemplo en el caso del combustible que llega a la caldera, que ha requerido anteriormente costes de extracción, clasificación, lavado, transporte, etc.,… entonces el valor del coste exergético no es un número absoluto, sino que depende de los límites del sistema y de las ineficiencias de los subsistemas que lo componen (Valero A., 1998).

Sólo existe, y nos es fácil de determinar, un coste exergético absoluto y este es el coste exergético natural. Para ello hay que contabilizar para un determinado flujo que pertenece a un sistema bien determinado, desde que se extrae de la Naturaleza hasta que está a nuestra disposición, todas las energías utilizables que se han puesto en juego (Valero A., 1998).

Todas, incluye cualquier energía auxiliar, eléctrica, humana, animal, solar,… además de definir el momento temporal en que se hace el análisis.

El precio de cualquier producto funcional, como poco, debe reflejar su coste. La teoría económica clásica nos dirá que el precio se halla sumando el coste al beneficio que se desea, o se puede, obtener (Valero A., 1998).

¿Cuál es el coste de producir algo? Hemos visto que para determinar el coste es necesario definir los límites del sistema. Todos los flujos que entren al sistema tendrán que tener previamente definido su coste. Pero ¿cuál es el coste de los flujos que entran a nuestro sistema? Estos serán productos de algún otro sistema anterior, cuyo precio será teóricamente su coste más el beneficio. En algún momento de la

cadena nos toparemos con los recursos naturales. Y ¿cuál es el coste de producir estos recursos naturales? (Valero A., 1998)

Si no sabemos los costes reales, los costes exergéticos naturales de un determinado flujo, es obvio que estamos asentados sobre unas bases económicas falsas, en las que el precio de los bienes se fija por el intercambio, el interés particular, la oportunidad, etc.… El precio viene marcado por el valor subjetivo de las cosas y no por su coste. El valor se forma en el intercambio, el coste es el resultado de contabilizar los recursos empleados. La teoría económica actual acepta esto como un hecho de partida. Por ello, estamos consumiendo productos con un precio muy por debajo de su coste natural, y tarde o temprano lo pagaremos con escasez, el Segundo Principio es irrevocable. Por tanto deberemos dirigir también nuestros esfuerzos en el desarrollo de metodologías para el cálculo de costes naturales de los productos funcionales (Valero A., 1998).

1.3.9 Exergía y economía de recursos naturales.

En la producción de energía, materias primas y todo tipo de bienes se consumen recursos naturales no renovables. En general, no existe un incentivo económico para la conservación de tales recursos, ya que los procesos óptimos económicamente no siempre son los de menor consumo de recursos.

La exergía puede proporcionar una medida del valor ecológico de los recursos naturales. En efecto dicho vapor se haría nulo en el estado muerto, estado de equilibrio completo, que puede ser considerado como de agotamiento final de los recursos. Por tanto, el coste ecológico podría representarse lógicamente mediante el contenido exergético de los recursos consumidos.

Además, habría que tomar en consideración el efecto perjudicial de los procesos de producción sobre el ambiente. De nuevo la termodinámica aporta una medida plausible, ya que, cuanto mayor es la exergía de los residuos, mayor es la perturbación que producen en el equilibrio ambiental. En consecuencia, la exergía de los residuos debería incluirse en el coste ecológico de los procesos.

La termodinámica y, en particular, el análisis exergético pueden constituir, pues una valiosa aportación, a la economía de los recursos naturales y la conservación del ambiente.

1.3.10 Ventajas del análisis exergético sobre el análisis energético.

El análisis energético y/o entálpico (aplicación del principio de la conservación de la energía) se utiliza frecuentemente en procesos cíclicos (centrales térmicas, por ejemplo). A pesar de la amplia información que éste proporciona, resulta insuficiente para el cálculo económico de los distintos equipos que conforman la instalación.

En efecto, si hacemos un balance de energía (Primer Principio) a un precalentador de agua de una central térmica, por ejemplo, poca o ninguna información se obtiene: la cantidad de energía entrante es igual a la saliente, supuesto adiabático el proceso.

Sin embargo debido a las irreversibilidades internas, la energía saliente es de más baja calidad (Segundo Principio). Calculando pues la exergía que entra y la exergía que sale conoceremos la que se ha destruido en el proceso.

Lo único que vale de una energía entonces es su exergía, que será la única a la que pueda asignársele precio: su anergía no vale nada por ejemplo, la cantidad de calor que se intercambia en el condensador es enorme, pero vale poco pues su contenido exergético es despreciable. El análisis exergético va a permitir, en primer lugar optimizar el diseño de los distintos equipos (por ejemplo, el diámetro de las tuberías) en segundo lugar analizar el coste exergético de los equipos una vez este la instalación en funcionamiento, lo que es fundamental en la toma de decisiones. A veces con pequeñas modificaciones pueden conseguirse ahorros exergéticos y/o económicos importantes. En tercer lugar permite evaluar el deterioro de los equipos en cuanto al costo de la exergía que se destruyen en los mismos y en cuarto lugar

el término de eficiencia exergética es una manera alterna de medir la utilización adecuada de los recursos exergéticos.

A pesar de sus manifiestas ventajas, el análisis exergético en procesos industriales es aún poco frecuente. No es fácil introducir en la práctica conceptos y metodologías nuevas, con una diferencia de fondo importante con relación al análisis puramente energético. Sin embargo, en el orden práctico no hay tanta diferencia, ya que el cálculo de la exergía es simple; sólo es cuestión de habituarse a trabajar en términos de exergía, en lugar y/o además de en términos de entalpia. (Gonzáles, 2013)

1.4 Análisis termoeconómico.

Para el desarrollo del Análisis Termoeconómico habrá que recurrir también a la aplicación de conceptos y juicios de valor económicos. En primer lugar, además de la estructura física del sistema, necesitaremos conocer su estructura económica o productiva. Habrá que saber si una corriente tiene el carácter de un recurso consumido por un equipo o de un producto generado por éste. También habrá que identificar aquellas salidas de un sistema que no tengan valor económico alguno o incluso sean perjudiciales, que se clasificarán como residuos. Es importante reconocer que, si bien la estructura física de un sistema es única, su estructura económica dependerá del uso o aplicación a que se destine. (Lozano M. A., 2009) (Kim D.J., 2010)

El análisis termoeconómico incluye las siguientes metodologías:

- Diagnóstico, valoración de impacto en el recurso por malfunciones.
- Optimización de componentes individuales y globales de un sistema térmico.
- Contabilidad y asignación de costos.

Dentro del diagnóstico, se habla de la comparación del estado real de un equipo o sistema con respecto a un estado de referencia, que corresponde al comportamiento ideal del sistema en las mismas condiciones ambientales o de frontera, que incluye algunos parámetros termodinámicos (temperatura, presión,

humedad, calidad de combustible, etc.), con el fin de determinar la presencia de anomalías, su ubicación y posibles causas que provocan aumentos en los consumos de los recursos (combustible). Estas anomalías también son llamadas malfunciones, las cuales existen cuando los costos de operación aumentan comparados a las condiciones de diseño, es decir, cuando existe una desviación en la eficiencia del equipo o sistema evaluado.

Por esta razón, se hace necesario conocer tanto las condiciones de referencia como las condiciones actuales de dicho equipo o sistema para poder realizar el diagnóstico termoeconómico. Este estado de referencia es aquel en el cual el equipo o sistema opera sin ninguna anomalía.

La optimización dentro de la termoeconomía, tiene que ver con la búsqueda del equilibrio entre las pérdidas de eficiencia por degradación y los costos que implican la aplicación de medidas de mejoramiento de las condiciones ya sea de un equipo o del sistema en total. Sin embargo, esta optimización termoeconómica es más compleja a diferencia de la optimización termodinámica, ya que no solo involucra parámetros termodinámicos, sino también monetarios (costos del recurso, instalación, mantenimiento, entre otros).

En cuanto a la contabilidad y asignación de costos, existen diferentes parámetros a través de que se les puede asignar un valor ya sea monetario o energético a cada uno de los flujos que circulan por un sistema térmico, incluyendo sus productos finales.

Uno de estos parámetros es el llamado costo termoeconómico que toma en cuenta el valor de los siguientes factores: insumos utilizados, costo de operación, administración, mantenimiento y recuperación de la inversión. Luego de conocer el valor monetario de cada flujo de los equipos o sistema evaluado, se está en condiciones de tomar decisiones con respecto al diseño, mantenimiento y operación de los equipos o del sistema con un mejor criterio económico para mejorar su desempeño energético, ya que es muy importante que haya una compensación entre las ineficiencias y los costos de capital que se invertirán en la mejora del

rendimiento de los equipos y procesos energéticos. (Gago, 2010)

1.4.1 Costes termoeconómicos.

Hasta este momento se ha visto que todo flujo transporta una exergía $\boldsymbol{B}$ y tiene un coste exergético $\boldsymbol{B}^*$, expresables ambos en unidades de potencia. A cada flujo se le puede asignar también un coste termoeconómico $\boldsymbol{\Pi}$**,** que se define como el coste económico de su producción, expresado en unidades monetarias por unidad de tiempo.

Puesto que el coste exergético $\boldsymbol{B}^*$ mide la exergía consumida para producir un flujo dado, es fácil establecer una relación entre el coste termoeconómico $\boldsymbol{\Pi}$ y el coste termoeconómico unitario $\boldsymbol{c}^*$, o coste económico por unidad de exergía consumida en la producción del flujo:

$$\boldsymbol{\Pi} = \boldsymbol{c}^* \boldsymbol{B}^* \qquad \boldsymbol{Ec.}\,(\mathbf{1.18})$$

El coste termoeconómico unitario se expresa en unidades monetarias por unidad de energía.

En una instalación que utilice un recurso o combustible único, estas ideas tienen una significación muy clara. El coste exergético unitario $\boldsymbol{\varkappa}^*$(adimensional) mide el consumo unitario de combustible (kJ de exergía de combustible/kJ de exergía del flujo) y el coste termoeconómico unitario $\boldsymbol{c}^*$ representa el coste unitario del combustible (unidades monetarias/kJ). La expresión 1.18 determina el coste de combustible (unidades monetarias/seg) requerido para la producción de un flujo considerado.

La termodinámica proporciona, por tanto una herramienta rigurosa e inequívoca para establecer la conexión entre exergía y economía, al margen de cualquier convenio contable.

Se define además un coste exergoeconómico unitario $\boldsymbol{c}$, que es el coste económico por unidad de exergía de un flujo:

$$\boldsymbol{\Pi} = \boldsymbol{c}\,\boldsymbol{B} \qquad \boldsymbol{Ec.}\,(\mathbf{1.19})$$

Entonces se infiere que:

$$\boldsymbol{c\,B = \Pi = c^{*}B^{*} = c^{*}(\varkappa^{*}\,B)} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.20)}$$

Y

$$\boldsymbol{c = \varkappa^{*}c^{*}} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.21)}$$

Estas expreciones relacionan los tres costes. Las expresiones **1.18** y **1.19** nos proporcionan dos caminos equivalentes para llegar a $\boldsymbol{\Pi}$, bien por la exergía necesaria para la producción del flujo en cuestión, bien por la exergía del propio flujo. (Valero, 1996)

Para determinar el coste de un producto es preciso realizar un balance económico del proceso seguido para su obtención. Un proceso dado puede dar origen a varios productos distintos, en forma de flujos de materia, así como energía eléctrica o vapor.

El coste total de los productos ha de ser igual a la suma de los costes de las materias primas o recursos consumidos, más los costes del personal, estructura y capital. En la figura **1.6** se esquematiza el flujo de los costes, de modo que todos los costes generados por el proceso son recogidos en los productos.

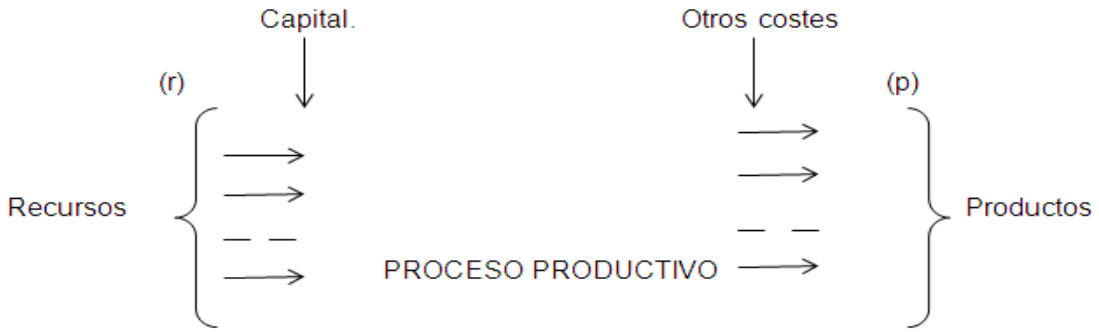


Fig. 1.6 Flujo de costes.

Si representamos por $\boldsymbol{Z_{ri}}$ el coste total del recurso genérico i , por $\boldsymbol{Z_{pj}}$ el del producto genérico j y por $\boldsymbol{Z_{c}}$el del capital y otros costes fijos, se verificará el siguiente balance:

$$\sum \boldsymbol{Z_{pj}} = \sum \boldsymbol{Z_{ri}} + \boldsymbol{Z_c} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.22)}$$

Podemos expresar **1.22** en función de los costes unitarios medios $\boldsymbol{c_{ri}}$ y $\boldsymbol{c}_{pj}$ y de las cantidades $\boldsymbol{n_{ri}}$ consumidas de cada recurso y $\boldsymbol{n}_{pj}$ producidas de cada producto.

$$\sum \boldsymbol{n_{pj}c_{pj}} = \sum \boldsymbol{n_{ri}c_{ri}} + \boldsymbol{Z_c} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.23)}$$

Cuando solo hay un producto, la expresión anterior permite determinar su coste unitario $\boldsymbol{c_p}$

$$\boldsymbol{c_p} = \frac{\sum \boldsymbol{n_{ri}c_{ri}} + \boldsymbol{Z_c}}{\boldsymbol{n_p}} \qquad \boldsymbol{Ec.(1.24)}$$

Cuando hay más de 1 producto el balance 1.23 es insuficiente para determinar sus costes unitarios y son precisas ecuaciones adicionales. Estas se formulan de acuerdo con la política de costes de la empresa que explote el proceso y dependerá de su estructura, circunstancias y objetivos. Los criterios de costes termoeconómicos dependerán de si un producto es principal o secundario (subproducto), si se produce para consumo interno o para su venta, o si se debe valorar a precio de mercado, etc. (Valero, 1996)

Las magnitudes termodinámicas de un proceso son absolutamente objetivas. Las económicas, en cambio, tienen un carácter subjetivo y pueden depender de los criterios que aplique la empresa. Esto no significa en modo alguno que las formulaciones económicas tengan menos rigor que las termodinámicas, sino que el tratamiento económico riguroso suele requerir la aplicación de criterios que dependen de la situación concreta analizada.

Uno de los objetivos del análisis termoeconómico es la determinación de los costes $\boldsymbol{c_{pj}}$ mediante una combinación adecuada de los recursos de la termodinámica y la economía. Así se llega al establecimiento de una contabilidad termoeconómica rigurosa.

Otro objetivo es la optimización de los costes. Las mejoras termodinámicas del proceso, con la ayuda del análisis exergético, tienen la finalidad de reducir el consumo de recursos $\boldsymbol{n_{ri}}$ para una producción $\boldsymbol{n_p}$ dada. Las mejoras encarecen y complican las instalaciones, aumentando $\boldsymbol{Z_c}$. El análisis termoeconómico investiga el compromiso óptimo entre la reducción de $\sum \boldsymbol{n_{ri}c_{ri}}$y el aumento de $\boldsymbol{Z_c}$, que conduzca a un mínimo de $\boldsymbol{c_p}$. (Valero, 1996)

1.5 Optimización.

La optimización termoeconómica tiene el objeto de minimizar el coste termoeconómico total de los productos del sistema, actuando sobre la configuración de éste y sobre los valores de sus variables de funcionamiento (temperaturas, presiones, composiciones,...), con sujeción a las restricciones impuestas por los recursos materiales y financieros disponibles, la reglamentación aplicable y las condiciones de gobernabilidad, seguridad, fiabilidad, mantenibilidad, etc... , que haya de satisfacer el sistema. (García J., 2009)

La optimización puede ser un proceso complicado. En primer lugar hay que distinguir las dos clases siguientes:

- Optimización estructural, que actúa sobre la configuración del sistema, tanto la clase y cantidad de equipos empleados como las interconexiones mutuas (el diagrama de flujo).
- Optimización paramétrica, que mantiene invariable la configuración y ajusta convenientemente las variables (temperaturas, presiones, composiciones,...) del proceso.

El sistema óptimo será el que minimice el coste total de los productos. Su búsqueda se realizará mediante el empleo combinado de las dos vías. No existen caminos inequívocos para la optimización estructural. El sentido común, la experiencia y la inventiva del ingeniero son fundamentales. Por lo general, se desarrollan diversas configuraciones alternativas, se fijan unos valores preliminares, que satisfagan las

condiciones impuestas, y se analizan, para realizar una primera evaluación. Estos primeros resultados posiblemente permitan realizar una preselección, eliminando los peores diseños. A continuación se lleva a cabo una optimización paramétrica de los diseños preseleccionados, lo cual permitirá identificar probablemente el óptimo u óptimos finales.

En este sentido, la termoeconomía aporta una herramienta de análisis y optimización cómoda y potente, tanto para el proyecto de nuevos sistemas como para el estudio de mejoras o la optimización de la gestión de instalaciones existentes.

Hay que advertir que, a poco complicado que sea un sistema, es frecuente que no exista una versión óptima global única e indiscutible. Según la creatividad del equipo humano de ingeniería, puede llegarse a varias soluciones igualmente satisfactorias en la práctica. Los algoritmos matemáticos y las aplicaciones informáticas aportan una ayuda decisiva, pero no se pueden manejar de una forma maquinal y con una confianza ciega en los resultados. Nada puede suplir en este terreno a la experiencia e inventiva de un buen ingeniero.

En el estudio de posibles mejoras en los sistemas, el Segundo Principio señala siempre la orientación termodinámica correcta. Pero no debe perseguirse ciegamente la eliminación de irreversibilidades, sino la optimización de costes. No es raro que una cierta reducción de la destrucción de exergía en un equipo requiera una inversión que contrarreste con creces el ahorro de recursos conseguido. Otras veces, por el contrario, pueden existir irreversibilidades que podrían reducirse sin incurrir en aumentos apreciables de los costes fijos. En ese sentido, el factor exergoeconómico puede aportar una ayuda muy valiosa. Se trata en todo caso de lograr una mejora económica en el proceso. Unas veces se reduce el coste de recursos (costes variables), otras el de los equipos (costes fijos) y, a veces, ambos.

Una línea de actuación muy importante es la integración energética de sistemas, cuyo objeto es lograr que los intercambios de materia y energía se produzcan en condiciones óptimas desde los puntos de vista termodinámico y económico.

Conclusiones parciales.

- El análisis exergético posee una serie de ventajas que lo acreditan como un método racional y potente para el estudio de sistemas energéticos. Entre ellas pueden destacarse: Mide rigurosamente la perfección termodinámica de los procesos, tiene una validez totalmente general y es aplicable a cualquier proceso, proporciona una base racional para el análisis de sistemas complejos, tales como sistemas de cogeneración de energía eléctrica y vapor, o de producción de diversas sustancias.
- El análisis termoeconómico tiene como uno de sus objetivos principales la determinación de los costes c_{pj} mediante una combinación adecuada de los recursos de la termodinámica y la economía. Así la termoeconomía aporta una herramienta de análisis y optimización cómoda y potente, tanto para el proyecto de nuevos sistemas como para el estudio de mejoras o la optimización de la gestión de instalaciones existentes.
- Como indicadores fundamentales de estos análisis se definen el costo exergético (indica la cantidad de exergía requerida en un proceso para obtener una unidad de producto) y el costo termoeconómico (coste económico de la producción, expresado en unidades monetarias por unidad de tiempo). Tambien resulta muy util el coste termoeconómico unitario (coste económico por unidad de exergía consumida en la producción del producto o corriente).

- A pesar de sus manifiestas ventajas, los análisis de procesos industriales basados en la Segunda Ley (exergéticos y termoeconómicos) son aún poco frecuentes. No es fácil introducir en la práctica conceptos y metodologías nuevas, con una diferencia de fondo importante con relación al análisis puramente energético. Se requiere por tanto el esfuerzo conjunto de las instituciones de investigación científica y los departamentos técnicos de las empresas industriales para su generalización.

Capítulo II: Metodología para la asignación de costes exergo y termoeconómicos de la Unidad 4 de la CTE de Cienfuegos.

2.1. Introducción al capítulo.

En este capítulo se define la metodología para el análisis exergoeconómico y termoeconómico de la Unidad 4 de la CTE Carlos M. de Céspedes de Cienfuegos, se desarrolla además toda una serie de expresiones y operaciones matriciales necesarias para determinar los costes de los flujos que intervienen en el esquema de la Unidad 4.

2.2 Aplicación de la teoría de sistemas (Teoría de los costos exergéticos) al análisis exergético.

Es frecuente tener que aplicar el análisis exergético a sistemas complicados en los que la formulación puede ser muy voluminosa y cuyo tratamiento es incómodo y expuesto a errores operativos. Sin embargo, si se hace uso de los medios que proporciona la teoría del costo exergético y termoeconómico se simplifica el tratamiento y se automatiza fácilmente su resolución.

Todo sistema termodinámico es un conjunto de elementos o subsistemas que intercambian materia y energía entre ellos y con el ambiente. En este estudio el sistema a analizar es la Unidad 4 de la CTE ``Carlos M. de Céspedes´´. A continuación se realiza una descripción general del mismo.

2.2.1 Descripción del bloque energético.

El sistema a analizar es la Unidad 4 de la CTE ``Carlos M. de Céspedes´´. A continuación se realiza una descripción general del mismo.

El bloque energético de 158 MW consta de un generador de vapor acuotubular y una instalación de turbina de condensación de un solo eje con parámetros subcríticos del vapor y recalentamiento intermedio del calor de una etapa. Como combustible se usa petróleo combustible pesado BV (Gonzáles, 2013).
La turbina tiene tres cilindros. El vapor entra a 12.45 MPa y 538 ^{o}C llega a la parte del cilindro de alta presión (CAP) que incluye la etapa reguladora y seis etapas de presión, después de lo cual a 3 MPa y 353 ^{o}C se envía al recalentamiento intermedio. Después del recalentamiento intermedio el vapor, a 2.74 MPa y 544 ^{o}C, se suministra, a través de las válvulas reguladoras, al cilindro de presión media (CPM) con siete etapas de presión. Del CPM se envía al cilindro de baja presión de dos flujos, que tiene cinco etapas en cada flujo. La presión final del vapor en la turbina a la entrada del condensador $\boldsymbol{p_{COND} = 0.095\ MPa.}$ (Gonzáles, 2013)
La turbina tiene 7 tomas regenerativas de vapor: 2, del CAP; 3, del CPM y 2, CBP.

El condensado de la turbina se calienta en tres calentadores de baja presión (CBP). Después del desaireador el agua se bombea mediante la bomba de alimentación, a través de tres calentadores de alta presión (CAP). Los drenajes de los CAP se evacuan en cascada al desaireador. Los drenajes del CBP 3 y el CPB 2 descargan también en cascada al CBP 1, y luego, por medio de la bomba de drenaje, se suministran a la línea de condensado principal. (Gonzáles, 2013)

En el Anexo 1 se presenta esquemáticamente la Unidad 4 de la CTE Carlos M. de Céspedes, representando los principales equipos y los flujos que los conectan entre sí.

2.3 Equipos fundamentales de la unidad 4 de la ETE ``Carlos M. de Céspedes´´.

- Caldera
- Turbina de vapor.

La turbina de vapor a su vez se divide en el cilindro de alta presión, de media y de baja presión. CAP, CPM y CBP respectivamente.

- Calentadores de alta presión (CAP 5, CAP 6 y CAP 7).
- Calentadores de baja presión (CBP 1, CBP 2 y CBP 3).
- Desaireador (DAA).
- Condensador (C).
- Bomba de agua de alimentar (BAA).
- Bomba de drenaje (BD).
- Bomba de condensado (BC).

2.4 Formación de la matriz de incidencia(A) y los balances termodinámicos.

De manera general, se define como equipo básico todo aquel elemento que tiene como máximo un solo intercambio de calor, un solo intercambio de trabajo, una sola variación de nivel, o acumulación de materia y un número indeterminado de flujos másicos. Se pueden escribir los siguientes balances:

De masa:

$$m_e = m_s + \Delta m \qquad Ec.(2.1)$$

Donde

$m_e \; y \; m_s$, son las masas del fluido entrante y saliente respectivamente.

Δm, variación de flujo.

De energía:

$$m_e h_e + Q = m_s h_s + \Delta m h + W \qquad Ec.(2.2)$$

Donde

$h_e \; y \; h_s$ Son las entalpías de entrada y de salida de los flujos.

$Q \; y \; W$ Son el calor entrante o saliente al equipo y el trabajo que entrega o recibe el equipo respectivamente.

De exergía:

$$m_e b_e + \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q = m_s b_s + \Delta m b + W + B_d \qquad Ec.(2.3)$$

Donde.

$b_e \; y \; b_s$ Son las exergías de los flujos entrantes y salientes respectivamente.

B_d Exergía destruida.

Un sistema termodinámico cualquiera se puede simbolizar mediante gráficos en que se representen los diversos equipos que lo constituyen y sus intercambios de materia y energía entre sí y con el ambiente.

Los gráficos de masa y energía se pueden representar mediante matrices de incidencia, en las que cada fila corresponde a un equipo o elemento del sistema y cada columna a un flujo de masa o de energía. El elemento genérico (i, j) de la matriz será $+1$ si el flujo j entra en el equipo i, -1 si el flujo j sale del equipo i y 0 si el flujo j no está conectado con el equipo i. El ambiente se representa mediante un elemento ficticio 0, que es el complementario del sistema. Con estos convenios resulta la matriz de incidencia de los flujos de masa que detalla el Anexo 2**.**

En general, si el sistema está formado por n equipos básicos, p de los cuales tienen dos corrientes fluidas que no se mezclan, conectados por m flujos, la matriz básica de incidencia másica A_M tendrá una dimensión $(n + p)\; x \; (m + n)$, suponiendo que

ninguno de los n equipos tienen fugas o cambios de nivel. En el anexo 2, las fugas o variaciones de nivel se recogen en las 15 últimas columnas.

Se introduce ahora el vector columna M, de dimensión $(m + n)$, cada uno de cuyos elementos tiene alguno de los siguientes valores:

M
- m_i para flujos másicos entre equipos (i= 1,……,m)
- Δm_i para fugas o cambios de nivel (i= 1,……, n)

En el caso específico de la CTE, la dimensión de M es $35 + 15$. El conjunto de los balances de masa según la ecuación 2.1 viene representado por la siguiente expresión matricial:

$$A_M \; x \; M = 0 \qquad Ec.(2.4)$$

Resulta ser así un sistema de $(n + p)$ ecuaciones lineales independientes. En este caso serán las $35 + 1$ de la tabla 2.1

Tabla 2.1 Balances de masa.

	Balances de masa.
Caldera	m1 + m2 - m3 - m4 + m7 - m8 + m26 = 0
CAP	m4 - m5 - m6 - m35 = 0
CPM	m8 - m9 - m10 - m11 - m12 + m35 = 0
CBP	m12 - m13 - m14 = 0
CAP 7	m5 + m25 - m26 - m33 = 0
CAP 6	m24 - m32 + m33 + m34 = 0
CAP 5	m9 + m23 - m24 - m31 + m32 = 0
DAA	m10 + m21 - m22 + m31 = 0
CBP 3	m11 + m20 - m21 - m30 = 0
CBP 2	m13 + m19 - m20 - m29 + m30 = 0
CBP 1	m14 + m17 - m18 - m27 = 0

Condensador	m15 - m16 = 0
Bomba AA	m22 - m23 = 0
Bomba D	m27 - m28 = 0
Bomba C	m16 - m17 = 0

En el anexo 3 se representa la matriz de incidencia de energía. La matriz base de incidencia energética A tendrá la dimensión $n\ x\ (m + 3n)$, en la hipótesis de que en cada uno de los n equipos básicos haya fuga o cambio de nivel, intercambio de calor e intercambio de trabajo.

Se define ahora el vector columna H, de dimensión $(m + 3n)$, cuyos elementos pueden tener alguno de los siguientes valores:

H
- $m_i h_i$ para flujos másicos entre equipos. (i = 1, ……, m)
- $\Delta\ (mh)_i$ para fugas o cambios de nivel
- Q_i para intercambios de calor
- W_i para intercambios de trabajo.

(i=1,……., n)

En el caso analizado, la dimensión de H es de 35+3x15=80. El conjunto de los balances de energía según la ecuación 2.2 vendrá representado por:

$$A\ x\ H = 0 \qquad Ec.(2.5)$$

Que conduce a un sistema de n ecuaciones lineales independientes, tantas como equipos básicos que corresponden a la base de la matriz. En el caso estudiado resultan las 15 primeras ecuaciones de la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Balances de energía.

	Balance de energía.
Caldera	m1h1 + m2h2 – m3h3 – m4h4 + m7h7 – m8h8 + m26h26 + Q1 = 0
CAP	m4h4 – m5h5 – m6h6 – m35h35 – W2 = 0
CPM	m8h8 – m9h9 – m10h10 – m11h11 – m12h12 + m35h35 – W3 = 0
CBP	m12h12 – m13h13 – m14h14 – w4 = 0
CAP 7	m5h5 + m25h25 – m26h26 – m33h33 = 0
CAP 6	m24h24 – m32h32 + m33h33 + m34h34 = 0
CAP 5	m9h9 + m23h23 – m24h24 – m31h31 + m32h32 = 0
DAA	m10h10 + m21h21 – m22h22 + m31h31 = 0
CBP 3	m11h11 + m20h20 – m21h21 – m30h30 = 0
CBP 2	m13h13 + m19h19 – m20h20 – m29h29 + m30h30 = 0
CBP 1	m14h14 + m17h17 – m18h18 – m27h27 = 0
Condensador	m15h15 – m16h16 –Q12 = 0
Bomba AA	m22h22 – m23h23 + W13 = 0
Bomba D	m27h27 – m28h28 + W14 = 0
Bomba C	m16h16 – m17h17 + W15 = 0

En un sistema en el que no se producen reacciones químicas, las funciones termodinámicas específicas quedan determinadas por dos variables como la presión y la temperatura. Conocidas dichas variables, se pueden determinar la entalpía específica h y la entropía específica s. una vez fijado el estado ambiental, es inmediato el cálculo de la exergía específica de un flujo o corriente con la conocida relación:

$$b = h\ - h_0\ - T_0(s - s_0) \qquad Ec.(2.6)$$

Por lo tanto, las mismas mediciones que se requieren para determinar las entalpías necesarias para los balances energéticos clásicos son suficientes para determinar también las exergías que se manejan en los balances exergéticos.

En consecuencia, sin recurrir a más datos de partida, podemos construir el vector columna B de dimensión $(m + 3n)$, cuyos elementos pueden tener algunos de los siguientes valores:

B
- $m_i b_i$ para flujos de materia. (i = 1,……, m)
- $\Delta (mb)_i$ para fugas o cambios de nivel
- $Q_i (1-\frac{T_o}{T_i})$ para intercambios de calor (i=1,……., n)
- W_i para intercambios de trabajo.

Evidentemente en el caso estudiado, la dimensión de B es 35+3x15=80. El conjunto de balances de exergía según la ecuación 2.3, estará representado por:

$$A\ x\ B = B_d \qquad Ec.(2.7)$$

Donde $\boldsymbol{B_d}$es el vector columna, de dimensión n, de las exergías destruidas en cada equipo básico, o vector de diagnóstico de la instalación de turbina de la CTE Carlos M. de Céspedes. La expresión matricial 2.7 corresponde a un sistema de n ecuaciones lineales independientes. En el análisis realizado corresponde a las 15 ecuaciones de la tabla 2.3

Tabla 2.3. Balances de exergía.

	Balance de exergía
Caldera	m1b1 + m2b2 - m3b3 - m4b4 + m7b7 - m8b8 + m26b26 + Q1(1-T0/T1) = Bd1
CAP	m4b4 - m5b5 - m6b6 - m35b35 - W2 = Bd2
CPM	m8b8 - m9b9 - m10b10 - m11b11 - m12b12 + m35b35 - W3 = Bd3
CBP	m12b12 - m13b13 - m14b14 - w4 = Bd4
CAP 7	m5b5 + m25b25 - m26b26 - m33b33 = Bd5
CAP 6	m24b24 - m32b32 + m33b33 + m34b34 = Bd6
CAP 5	m9b9 + m23b23 - m24b24 - m31b31 + m32b32 = Bd7
DAA	m10b10 + m21b21 - m22b22 + m31b31 = Bd8
CBP 3	m11b11 + m20b20 - m21b21 - m30b30 = Bd9
CBP 2	m13b13 + m19b19 - m20b20 - m29b29 + m30b30 = Bd10
CBP 1	m14b14 + m17b17 - m18b18 - m27b27 = Bd11
Condensador	m15b15 - m16b16 -Q12(1-T0/T12) = Bd12
Bomba AA	m22b22 - m23b23 + W13 = Bd13
Bomba D	m27b27 - m28b28 + W14 = Bd14
Bomba C	m16b16 - m17b17 + W15 = Bd15

Cada elemento $\boldsymbol{B_{d,i}}$del vector de diagnóstico $\boldsymbol{B_d}$ representa la exergía destruida en el equipo básico. La $\sum_i \boldsymbol{B_{d,i}}$ representa la exergía total destruida en la instalación o planta completa, o también el ahorro termodinámico total posible. La comparación de cada $\boldsymbol{B_{d,i}}$con el total proporciona una idea del peso relativo de cada equipo en la destrucción de exergía o irreversibilidad total de la planta.

Tabla 2.4 Exergías y flujos másicos.

Flujo	B(kJ/kG)	m(kG/s)	B(kW)
1	39004.4	10.1	393 944,44
2	0	82	0.00
3	130.74	71.76	9381.90
4	1459.09	147.14	214690.50
5	1209.58	8.1	9797.60
6	1095.75	135.26	148211.15
7	1062.94	119.06	126553.64
8	1331.84	122.37	162977.26
9	1191.61	4.48	5338.41
10	994.04	6.72	6679.95
11	793.48	5.16	4094.36
12	793.48	108.32	85949.75
13	566.13	5.59	3164.67
14	380.09	4.92	1870.04
15	68.07	97.81	6657.93
16	0.27	97.81	26.41
17	2.73	100.41	274.12
18	19.92	100.41	2000.17
19	20.79	122.42	2545.11
20	42.27	122.42	5174.69
21	68.21	122.42	8350.27
22	115.42	150.73	17397.26
23	135.39	150.73	20407.33
24	165.33	147.49	24384.52
25	216.89	147.49	31989.11
26	267.44	147.49	39444.73
27	20.66	22.01	454.73
28	23.02	22.01	506.67
29	21.92	10.75	235.64
30	72.91	5.16	376.22
31	130.69	21.01	2745.80
32	163.47	16.53	2702.16
33	218.33	8.1	1768.47
34	1091.09	8.43	9197.89
35	1209.58	2.4	2902.99

Tabla 2.5. Exergía destruida por cada uno de los equipos.

Equipos	Exergía destruida (kW)	%
Caldera	68652	66.39591
CAP	6057.67	5.858598
CPM	4776.46	4.619492
CBP	11841.59	11.45244
CAP 7	539.69	0.521954
CAP 6	657.2	0.635603
CAP 5	574.09	0.555224
DAA	916.1	0.885994
CBP 3	519.62	0.502544
CBP 2	657.86	0.636241
CBP 1	219.12	0.211919
Condensador	6631.39	6.413464
Bomba AA	1065.19	1.030185
Bomba D	35.23	0.034072
Bomba C	254.73	0.246359
TOTAL	103397.94	100

Es posible profundizar tanto como se quiera en el detalle del análisis, llegando hasta cada elemento de la instalación. Ahora bien, se pueden agrupar varios elementos sencillos dando lugar a un nuevo equipo, con un mayor nivel de agregación. Esta agregación de elementos se traduce en una matriz de incidencia más simple, en la que se sustituyen las filas de los elementos agregados por una sola fila, suma de las primeras la cual corresponderá al nuevo equipo.

Cuanto más se detalle el análisis, más bajo será el nivel de agregación, tanto mayores serán las posibilidades de una diagnóstico profundo y de predecir las mejoras que se obtendrían mediante modificaciones en la instalación. Estas modificaciones se reflejarían sobre la matriz de incidencia, pero conservando toda la estructura formal del análisis. El modelo, por supuesto, se amplía y las operaciones son más laboriosas. En cada caso se actuará con el detalle estrictamente necesario, requerido por los objetivos que se persigan con el análisis.

Específicamente en el análisis de la Termoeléctrica de Cienfuegos no se realizó ningún nivel de agregación para lograr una mayor profundidad en el estudio de los costes exergo y termoeconómicos.

2.5 El coste exergético.

2.5.1 Conformación de la matriz adicional (α) y los vectores ω y Ω para el cálculo de los costos exergéticos y los costos exergéticos unitarios.

En este punto ya quedó establecida la matriz de incidencia de masa, de energía y de exergía, con sus respectivos balances termodinámicos.

Ahora la matriz de incidencia será rectangular, de dimensión $\boldsymbol{n\,x\,m}$**.** En el caso específico de la CTE de Cienfuegos la dimensión será de $\mathbf{15\ x\ 35}$.

El balance de coste exergético da lugar a n ecuaciones. Como $\boldsymbol{m} > n$, se precisan $\boldsymbol{m} - \boldsymbol{n}$ ecuaciones o condiciones naturales. Específicamente en el esquema de la CTE de Cienfuegos se necesitarán un total de 20 ecuaciones adicionales, con la intención de que la matriz de incidencia sea de cuadrada ($\mathbf{35\ x\ 35}$)**,** el sistema tenga solución y se pueden determinar los costes exergéticos.

Estas ecuaciones obedecen a los siguientes factores:

a) Entradas: Se les asigna un coste exergético igual a su exergía, pues, en los límites del sistema analizado no se ha consumido exergía alguna para producirlas. La expresión de la siguiente condición para una entrada genérica i es:

$$B_i^* = B_i \qquad Ec.(2.8)$$

Donde $\boldsymbol{B_i}$es el flujo exergético de entrada (dato) y $\boldsymbol{B_i^*}$ es el costo exergético del flujo.

b) Ramificaciones internas: Si un equipo tiene varias salidas, conectadas a otros equipos del sistema, se les asigna el mismo coste exergético unitario $\boldsymbol{\varkappa^*}$. En otras palabras, los costes exergéticos $\boldsymbol{B_i^*}$de las salidas son proporcionalesb a sus respectivas exergías $\boldsymbol{B_i}$:

$$\frac{B_i^*}{B_i} = \frac{B_j^*}{B_j} = \ ... = \ \varkappa^* \qquad Ec.(2.9)$$

La idea de coste exergético unitario es muy útil en el análisis termodinámico de sistemas, pues mide la exergía puesta en juego para producir cada flujo. Por ejemplo, en la integración energética de procesos ayuda a sustituir entradas de equipos por otras de menos coste exergético unitario.

O también, para cada bifurcación.

$$\frac{B_i^*}{B_i} - \frac{B_j^*}{B_j} = 0 \qquad Ec.(2.10)$$

c) Ramificaciones externas: Si las salidas de un equipo son salidas del sistema, son posibles varios casos:

c.1 Varios productos principales.

c.2 Subproductos: La obtención de uno o varios productos prncipales implica la generación de uno o varios sobproductos.

c.3 Residuos: La obtención de uno o varios productos principales ocasiona la producción de uno o varios residuos, sin utilidad alguna.

d) Subproductos: Se les asigna un coste exergético que tendría su obtención directa mediante el mejor proceso utilizable(del menor coste exergético).

La planta termoeléctrica Carlos M. de Céspedes tiene un solo producto principal y además no se obtiene ningún subproducto del proceso general, por lo que no se tendrá en cuenta en el momento de la conformación de la matriz adicional.

e) Residuos: En principio se les asigna un coste exergético nulo. Muchas veces es necesario consumir exergía para eliminar un residuo(mediante una bomba, un ventilador, una cinta transportadora, una planta de tratamiento, etc.). Como el residuo es un flujo saliente del sistema principal, se les asigna un coste exergético negativo.

Para el caso de estudio el ventilador de tiro forzado para la eliminación del residuo consume una exergía de 1100 kW.

Finalmente definimos la matriz adicional $\boldsymbol{\alpha}$ de dimensión $(\mathbf{35}-\mathbf{15})\ \boldsymbol{x}\ \mathbf{35}$ cuyas filas tendrán todos sus elementos nulos, salvo los siguientes:

- Entradas: Valor $+1$ en la columna del flujo que corresponda.
- Residuos: Valor -1 en la columna del flujo que corresponda.
- Bifurcaciones: Valor $^{+\mathbf{1}}/_{\boldsymbol{B_i}}$ en la columna i y $^{-\mathbf{1}}/_{\boldsymbol{B_j}}$ en la j.

Se define además, un vector columna $\boldsymbol{\omega}$ de dimensión $(\mathbf{35}-\mathbf{15})\ \boldsymbol{x}\ \mathbf{1}$ cuyos elementos tienen los siguientes valores:

- Entradas: $\boldsymbol{B_i}$
- Residuos: $-\boldsymbol{\omega_r}$
- Bifurcaciones: $\mathbf{0}$

Al multiplicar la matriz $\boldsymbol{\alpha}$ por el vector $\boldsymbol{B}^*$ e igualar al $\boldsymbol{\omega}$ resultarán evidentemente las $\boldsymbol{m}-\boldsymbol{n}$ (20) ecuaciones adicionales que, junto con las 15 del balance exergético permiten determinar los 35 costes exergéticos de cada uno de los flujos del sistema analizado.

Podemos combinar las matrices **A** y $\boldsymbol{\alpha}$ en una única matriz $\boldsymbol{\mathcal{A}}$**,** cuya dimensión es de $\mathbf{35}\ \boldsymbol{x}\ \mathbf{35}$ y definir un vector columna $\boldsymbol{\Omega}$**,** de dimensión $\mathbf{35}\ \boldsymbol{x}\ \mathbf{1}$**,** cuyos $\mathbf{15}$ primeros elementos sean nulos y los $(\mathbf{35}\ -\mathbf{15})$ restantes sean los de $\boldsymbol{\omega}$**:**

$$\mathcal{A} \equiv \begin{bmatrix} A \\ \alpha \end{bmatrix} \quad ; \Omega \equiv \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \end{bmatrix} \qquad Ec.(2.11)$$

De esta manera podemos escribir el balance de coste exergético de la siguiente forma:

$$\mathcal{A}\ x\ B^* = \Omega \qquad Ec.(2.12)$$

La matriz $\boldsymbol{\mathcal{A}}$**,** de dimensión $\mathbf{35}\ \boldsymbol{x}\ \mathbf{35}$**,** resultado de ampliar la matriz de incidencia **A** con la $\boldsymbol{\alpha}$**,** se denomina matriz de costes y el vector $\boldsymbol{\Omega}$**,** de dimensión $\mathbf{35}\ \boldsymbol{x}\ \mathbf{1}$, vector de costes complementarios.

El balance de coste exergético nos proporciona n = 15 ecuaciones. Como tenemos que determinar m = 35 costes exergéticos, necesitamos 20 condiciones complementarias. Son éstas las siguientes:

Exergía de las entradas:

$$B_1^* = B_1$$

$$B_2^* = B_2$$

Coste exergético del residuo:

$$B_3^* = -1100\ kW$$

Bifurcaciones:

$$\frac{B_6^*}{B_6} - \frac{B_7^*}{B_7} = 0$$

$$\frac{B_5^*}{B_5} - \frac{B_{35}^*}{B_{35}} = 0$$

$$\frac{B_{26}^*}{B_{26}} - \frac{B_4^*}{B_4} = 0$$

$$\frac{B_8^*}{B_8} - \frac{B_{10}^*}{B_{10}} = 0$$

$$\frac{B_9^*}{B_9} - \frac{B_{24}^*}{B_{24}} = 0$$

$$\frac{B_{11}^*}{B_{11}} - \frac{B_{30}^*}{B_{30}} = 0$$

$$\frac{B_{12}^*}{B_{12}} - \frac{B_{15}^*}{B_{15}} = 0$$

$$\frac{B_{13}^*}{B_{13}} - \frac{B_{20}^*}{B_{20}} = 0$$

$$\frac{B_{14}^*}{B_{14}} - \frac{B_{27}^*}{B_{27}} = 0$$

$$\frac{B_{18}^*}{B_{18}} - \frac{B_{28}^*}{B_{28}} = 0$$

$$\frac{B_{16}^*}{B_{16}} - \frac{B_{17}^*}{B_{17}} = 0$$

$$\frac{B_{19}^*}{B_{19}} - \frac{B_{29}^*}{B_{29}} = 0$$

$$\frac{B_{21}^*}{B_{21}} - \frac{B_{22}^*}{B_{22}} = 0$$

$$\frac{B_{23}^*}{B_{23}} - \frac{B_{31}^*}{B_{31}} = 0$$

$$\frac{B_{25}^*}{B_{25}} - \frac{B_{26}^*}{B_{26}} = 0$$

$$\frac{B_{25}^*}{B_{25}} - \frac{B_{33}^*}{B_{33}} = 0$$

$$\frac{B_{24}^*}{B_{24}} - \frac{B_{32}^*}{B_{32}} = 0$$

Ahora se puede construir el vector $\boldsymbol{\omega}$ de dimensión $\mathbf{20\ x\ 1,}$ y la matriz $\boldsymbol{\alpha}$ de dimensión $\mathbf{20\ x\ 35}$. El vector es:

$$\boldsymbol{\omega} \equiv \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \omega_r \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad Ec.(2.13)$$

Si:

$B_1^* = \ Poder\ calórico * Flujo\ másico.$

$B_1^* = 393\,944.44\ kW$ pues el costo exergético de la entrada del combustible coincide con su exergía.

$B_2^* = 0$ pues la exergía y el costo exergético del aire que se suministra en la caldera es 0.

Y $\omega_r = -1100$

Entonces el vector $\boldsymbol{\omega}$ queda de la siguiente manera:

$$\omega \equiv \begin{bmatrix} 393944.44 \\ 0 \\ -1100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad Ec.(2.14)$$

La matriz $\boldsymbol{\alpha}$ se representa en el Anexo 4. El producto $\boldsymbol{\alpha\, x\, B^*}$conduce precisamente a las ecuaciones adicionales.

Al combinar las matrices **A** y $\boldsymbol{\alpha}$ se obtiene la matriz cuadrada $\boldsymbol{\mathcal{A}}$ (Anexo 5) de dimensión $\mathbf{35\, x\, 35.}$ El vector $\boldsymbol{\Omega}$, de dimensión $\mathbf{35\, x\, 1,}$ tendrá sus 15 primeros elementos nulos y los 20 restantes del $\boldsymbol{\omega}$**.**

Vector $\boldsymbol{\Omega}$

$$\Omega \equiv \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 393944.44 \\ 0 \\ -1100 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \qquad Ec.(2.15)$$

Para obtener los costes exergéticos de cada uno de los flujos basta con resolver la ecuación: $\mathcal{A}\ x\ B^{*}\ \Omega$.

Entonces el coste exergético unitario de cada flujo se obtiene de la división entre el coste exergético y su exergía.

2.6 El coste termoeconómico:

2.6.1 Balance de coste termoeconómico.

Un balance económico elemental indica que el coste total de las salidas ha de ser igual al coste total de las entradas más los costes fijos de amortización, personal, mantenimiento y operación referidos a la unidad de tiempo, que representaremos por $\boldsymbol{Z}$ y designaremos en lo sucesivo como coste fijo: (Valero, 1996)

$$\sum_i \Pi_{ei} + Z = \sum_j \Pi_{sj} \qquad Ec.(2.16)$$

O también

$$\sum_i \Pi_{ei} - \sum_j \Pi_{sj} + Z = 0 \qquad Ec.(2.17)$$

Y matricialmente:

$$A\ x\ \Pi\ + Z = 0 \qquad Ec.(2.18)$$

En donde la matriz fila $\boldsymbol{A}$ ya se definió en epígrafes anteriores y $\boldsymbol{\Pi}$ es un vector columna llamado vector de costes termoeconómicos, análogo al $\boldsymbol{B}^*$de costes exergéticos.

Esta formulación se extiende fácilmente a un sistema formado por n equipos conectados por m flujos, de modo que la expresión matricial 2.18 del balance económco mantiene su forma, pero ahora la matriz de incidencia **A** es una matriz rectangular de dimensón $\mathbf{15\ x\ 35}$**,** el vector de costes termoeconómicos $\boldsymbol{\Pi}$ un vector columna de dimensión $\mathbf{35\ x\ 1}$ y $\boldsymbol{Z}$ un vector columna de dimensión $\mathbf{15\ x\ 1}$, llamado vector de costes fijos. Este balance proporciona 15 ecuaciones. Para determinar los 35 costes termoeconómicos se precisan igualmente 20 ecuaciones adicionales,

formuladas de una manera enteramente análoga a la desarroollada en el epígrafe 2.5.1.

a) Entradas: para una entrada genérica i:

$$\Pi_i = c_i^* B_i^* = c_i B_i \qquad Ec.(2.19)$$

Como $\boldsymbol{B_i^* = B_i}$, es $\boldsymbol{\varkappa_i^* = 1}$ y $\boldsymbol{c_i^* = c_i}$.

b) Ramificaciones internas: Si un equipo tiene varias salidas, conectadas a otros elementos del sistema, se les asigna el mismo coste exergoeconómico unitario c. También se les asigna el mismo coste exergético unitario $\boldsymbol{\varkappa^*}$, sus costes termoeconómicos unitarios serán asimismo iguales:

$$\frac{\Pi_i}{B_i} = \frac{\Pi_j}{B_j} = \cdots = c = \varkappa^* c^* \qquad Ec.(2.20)$$

O también para cada bifurcación.

$$\frac{\Pi_i}{B_i} - \frac{\Pi_j}{B_j} = 0 \qquad Ec.(2.21)$$

c) Varios productos principales.

d) Subproductos: A la exergía $\boldsymbol{B_{si}^* = \omega_{si}}$mínima necesaria para su obtención directa, se le multiplica por el coste unitario $\boldsymbol{c_{si}^*}$del recurso que se requeriría para ello:

Como ya se ha explicado enteriormente la CTE de Cienfuegos tiene un solo producto principal y no tiene ningún subproducto.

e) Residuos: Usualmente $\boldsymbol{\Pi_{ri} = 0}$. Si existiera algún uso alternativo que permita una recuperación de exergía, el valor económico del residuo sería:

$$\Pi_{ri} = c_{ri}^{*}\omega_{ri} \qquad Ec.(2.22)$$

Donde $\boldsymbol{c_{ri}^{*}}$ es el coste unitario de la exergía requerida para la recuperación y $\boldsymbol{\omega_{ri}}$la exergía neta recuperable con la mejor tecnología que se disponga. Cuando sea preciso consumir una exergía $\boldsymbol{\omega_{ri}}$para la eliminación del residuo, resultará un valor negativo:

$$\Pi_{ri} = -c_{ri}^{*}\omega_{ri} \qquad Ec.(2.23)$$

En donde $\boldsymbol{c_{ri}^{*}}$es el coste unitario de la exergía necesaria para obtener la $\boldsymbol{\omega_{ri}}$ requerida para la eliminación del residuo.

En el caso de estudio no existe ningún uso alternativo que permita la recuperación de exergía del residuo.

Las condiciones anterirores se pueden condensar de forma matricial siguiendo los pasos descritos en epígrafes anteriores. Se obtiene entonces:

$$\alpha\ x\ \Pi = \chi \qquad Ec.(2.24)$$

Donde la matriz adicional $\boldsymbol{\alpha}$ de dimensión $\boldsymbol{(35-15)x\ 35,}$ $\boldsymbol{\Pi}$ es el vector de costes termoeconómicos, de dimensión $\boldsymbol{m\ x\ 1}$, y $\boldsymbol{\chi}$ es un vector columna, análogo al $\boldsymbol{\omega}$**,** de dimensión $\boldsymbol{(m-n)x\ 1}$, cuyos elementos pueden tomar los siguientes valores:

- Entradas: $\boldsymbol{c_i^{*}B_i^{*} = c_iB_i}$
- Residuos**:0**
- Bifurcaciones: **0**

La expresión matricial 2.24 representa las 20 ecuaciones adicionales necesarias para determinar los 35 costes termoeconómicos. Si combinamos las ecuaciones 2.18 y 2.24.

$$A\ x\ \Pi\ + Z = 0$$

$\alpha \; x \; \Pi - \chi = \; 0$

Y podemos escribir:

$$\left[\frac{A}{\alpha}\right] \; x \; \Pi \; + \left[\frac{Z}{-\chi}\right] = 0 \qquad Ec.(2.25)$$

O también:

$$\mathcal{A} \; x \; \Pi \; + \mathcal{Z} = 0 \qquad Ec.(2.26)$$

Donde $\boldsymbol{\mathcal{A}}$ es la matriz de costes de dimensión $\boldsymbol{35 \; x \; 35}$, $\boldsymbol{\mathcal{Z}}$ es un vector columna de dimensión $\boldsymbol{m \; x \; 1}$, llamado vector de estructura de costes, resultado de la unión del $\boldsymbol{Z}$**,** de costes fijos, y el $\boldsymbol{\chi}$, de costes unitarios.

Para la conformación del vector de costes fijos o vector $\boldsymbol{Z}$ tendrá que verse primeramente el costo de los equipos por año, obtenido de la suma de la depreciación, mantenimiento y operación de los equipos, recogidos en la siguiente tabla:

Tabla 2.6: Vector de costes fijos. (Ripoll, 2014)

Datos económicos:			
7920 h/año : 28512000 seg/año			
		Vector **Z**	
Equipo	$/año	¢/seg	%
Caldera	635821.071	2.23001217	46.2229352
CAP	107108.547	0.37566129	7.78657964
CPM	107108.547	0.37566129	7.78657964
CBP	107108.547	0.37566129	7.78657964
CAP 7	14504.5675	0.0508718	1.05445339
CAP 6	14504.5675	0.0508718	1.05445339
CAP 5	3227.07	0.01131829	0.23460161
DAA	7801.1925	0.02736108	0.56713128
CBP 3	17097.3585	0.05996548	1.24294417
CBP 2	17097.3585	0.05996548	1.24294417
CBP 1	17097.3585	0.05996548	1.24294417
Condensador	286218.305	1.00385208	20.8075051
Bomba AA	26127.977	0.09163853	1.89945229
Bomba D	14626.401	0.05129911	1.06331044
Bomba C	104.3485	0.00036598	0.00758593
Totales	1375553.22	4.82447115	100

La unidad del vector de costes fijos será en ¢/seg.

Entonces el vector columna $\boldsymbol{\chi}$ quedará conformado a partir de los siguientes datos.

Tabla 2.7: Costes termoeconómico. (Ripoll, 2014)

Aire(2)	c_2^*	0
Combustible(1)	c_1^*	18.5 pesos/GJ
Coste termoeconómico del combustible	Π	728.79 ¢/seg

Como los valores del costo termoeconómico de las bifurcaciones es 0 entonces:

$$\chi \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{728.79} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

Uniendo ambos vectores para conformar el vector $\mathcal{Z}$, se tiene que:

$$\mathcal{Z} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{2.23001217} \\ \mathbf{0.37566129} \\ \mathbf{0.37566129} \\ \mathbf{0.37566129} \\ \mathbf{0.508718} \\ \mathbf{0.508718} \\ \mathbf{0.01131829} \\ \mathbf{0.02736108} \\ \mathbf{0.05996548} \\ \mathbf{0.05996548} \\ \mathbf{0.05996548} \\ \mathbf{1.00385208} \\ \mathbf{0.09163853} \\ \mathbf{0.05129911} \\ \mathbf{0.00036598} \\ \mathbf{728.79} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

Después de ser obtenidos los costos termoeconómicos de los flujos resulta fácil calcular los costos termoeconómicos unitarios y los costos exergoeconómicos unitarios, el primero resulta de la división entre el costo termoeconómico y su respectivo costo exergético; y el segundo de la división del propio costo termoeconómico y su respectiva exergía.

Existe una forma muy simple de separar los costes variables(o de combustibles) de los fijos. Basta para ello anular los costes fijos en $\mathcal{Z}$.

$$\mathcal{Z}^{\circ} = \begin{bmatrix} 0 \\ \hline -\chi \end{bmatrix} \qquad Ec.(2.27)$$

Vector $\mathcal{Z}^{\circ}$:

$$\mathcal{Z}^{\circ} \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{728.79} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

Al sustituir $\mathcal{Z}$ por $\mathcal{Z}^{\circ}$ en la ecuación del balance 2.26 se obtiene el vector $\boldsymbol{\Pi}^{\circ}$ de costes termoeconómicos variables, que suele ser extraordinariamente útil en el análisis de sistemas.

Igualmente es necesario calcular también los costos termoeconómicos unitarios variables y los costos exergoeconómicos unitarios variables, resultado el primero de dividir el costo termoeconómico variable y su respectivo costo exergético y el segundo se obtiene de la división del propio costo termoeconómico variable y su respectiva exergía.

Conclusiones Parciales.

- Para el análisis exergo y termoeconómico de la Unidad 4 de la CTE Carlos M. de Céspedes de Cienfuegos se simplifica el esquema termodinámico representando 15 equipos principales y 35 corrientes o flujos que los conectan entre sí.

- Para la solución del problema planteado se opta por el procedimiento matricial. A partir de los respectivos balances termodinámicos se obtienen las matrices de incidencia de masa, energía y exergía, todas de dimensión $\mathbf{15\ x\ 35}$.

- El balance de coste exergético da lugar a 15 ecuaciones. Como $35 > 15$, se precisan 20 ecuaciones o condiciones adicionales con la intención de que la matriz de incidencia sea de cuadrada ($\mathbf{35\ x\ 35}$) y el sistema tenga solución. Las ecuaciones adicionales se obtienen a partir de la teoria de asignación de costes exergéticos.

- A partir del procedimiento descrito es posible determinar los costos termo y exergoeconómicos unitarios (variables y fijos) de gran significación para el análisis de sistemas térmicos complejos como el del objeto de estudio de esta investigación.

Capítulo 3: Análisis de los resultados.

3.1 Costes exergéticos.

Siguiendo la metodología descrita en el epígrafe 2.5 obtenemos los costos exergéticos y los costos exergéticos unitarios recogidos en la siguiente tabla 3.1:

Tabla 3.1: Costes exergéticos.

Flujos	Exergía (kW)	Coste exergético(kW)	Coste exergético unitario(adimensional)
1	393944.44	393944.44	1.00
2	0.00	0.00	0.00
3	9381.90	1100.00	0.12
4	214690.50	39449003.53	183.75
5	9797.60	1694910.83	172.99
6	148211.15	37251896.90	251.34
7	126553.64	31808424.33	251.34
8	162977.26	4054169.84	24.88
9	5338.41	121856.85	22.83
10	6679.95	166168.25	24.88
11	4094.36	214335.13	52.35
12	85949.75	0.00	0.00
13	3164.67	7500.83	2.37
14	1870.04	7500.83	4.01
15	6657.93	0.00	0.00
16	26.41	0.00	0.00
17	274.12	0.00	0.00
18	2000.17	7200.27	3.60
19	2545.11	16453.73	6.46
20	5174.69	12264.95	2.37
21	8350.27	206905.60	24.78
22	17397.26	431074.75	24.78
23	20407.33	431074.75	21.12
24	24384.52	556611.32	22.83
25	31989.11	5877942.17	183.75
26	39444.73	7247899.19	183.75
27	454.73	1823.93	4.01
28	506.67	1823.93	3.60
29	235.64	1523.37	6.46
30	376.22	19694.48	52.35
31	2745.80	58000.90	21.12
32	2702.16	61680.62	22.83
33	1768.47	324953.81	183.75
34	9197.89	819884.51	89.14
35	2902.99	502195.80	172.99

La figura 3.1 muestra los resultados anteriores en forma gráfica.

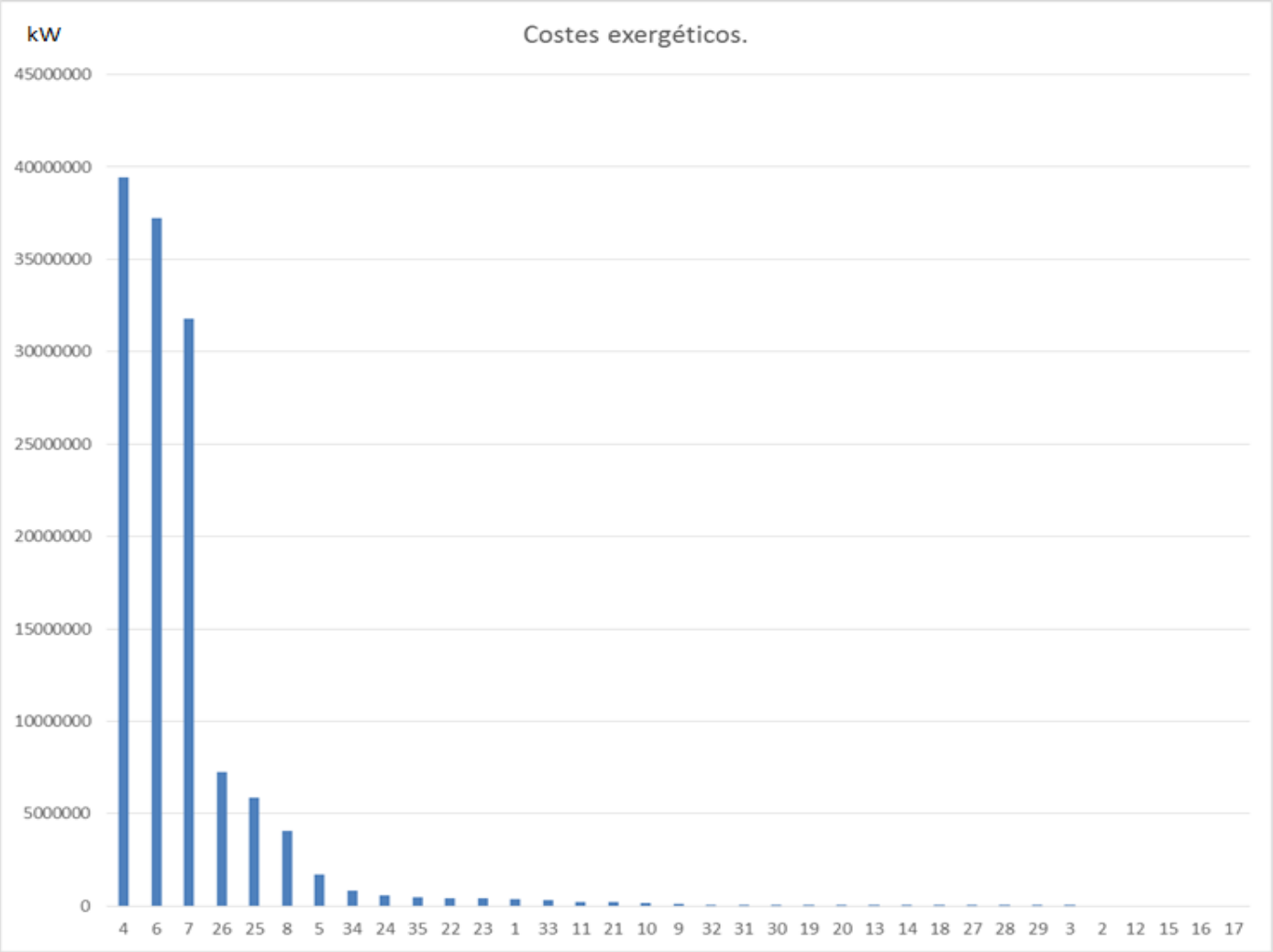


Fig. 3.1 Costes exergéticos.

Como se observa en el gráfico de costes exergéticos, los flujos que presentan mayor costo son los número 4, 6 y 7, con marcada diferencia sobre el resto (entre 30000000 y 40000000 kW). Estas corrientes corresponden al flujo de vapor vivo y al vapor a la salida del cilindro de alta presión hacia el recalentamiento. En segundo lugar se observa otro grupo de corrientes (26, 25 y 8) con un coste relativamente elevado mientras el resto de los flujos mantienen un coste exergético muy bajo respecto a los anteriores.

Este comportamiento se explica a partir del hecho de que a las corrientes 4,6, y 7 corresponden los valores de presión, temperatura y flujo másico más elevados.

De acuerdo con estos resultados resulta muy importante prestar atención a la estabilidad y control de estos parámetros en la operación diaria de la planta. Esto coincide con la práctica actual de evaluación de los sobreconsumos de combustible asociado al deterioro de parámetros operacionales como la temperatura y presión de esos flujos, calculados sobre la base del análisis energético (1ra Ley).

3.2 Costes termoeconómicos.

3.2.1 Costes termo y exergoeconómicos.

Tabla 3.2 Costes termoeconómicos.

Flujo	Coste termoeconómico(centavos/seg)	Coste termoeconómico unitario (pesos/GJ)	Coste exergoeconómico unitario (pesos/GJ)
1	728.79	18.49	18.49
2	0	0	0
3	0	0	0
4	72922.43	18.32	3396.63
5	3133.16	18.39	3197.86
6	68860.61	18.33	4646.17
7	58798.21	18.38	4646.11
8	7501.36	18.39	460.26
9	225.35	18.38	422.14
10	307.38	18.39	460.16
11	382.54	17.72	934.37
12	12.98	0	1.50
13	21.65	28.65	68.29
14	10.02	13.30	53.65
15	1.02	0	1.55
16	3.90E-05	0	0.015
17	0.000404999	0	0.015
18	9.83	13.58	49.16
19	23.56	14.23	92.51
20	35.34	28.67	68.29
21	382.69	18.39	458.29
22	797.31	18.39	458.29
23	797.26	18.39	390.65
24	1029.37	18.38	422.14
25	10865.52	18.38	3396.63
26	13397.92	18.38	3396.63
27	2.43	13.30	53.65
28	2.49	13.58	49.16
29	2.17	14.23	92.51
30	35.15	17.74	934.37
31	107.26	18.37	390.65
32	114.06	18.39	422.14
33	600.68	18.38	3396.65
34	1515.938102	18.38668529	1648.137036

35	928.336473	18.38260239	3197.860941

La figura 3.2 muestra los resultados del coste termoeconómico en forma gráfica.

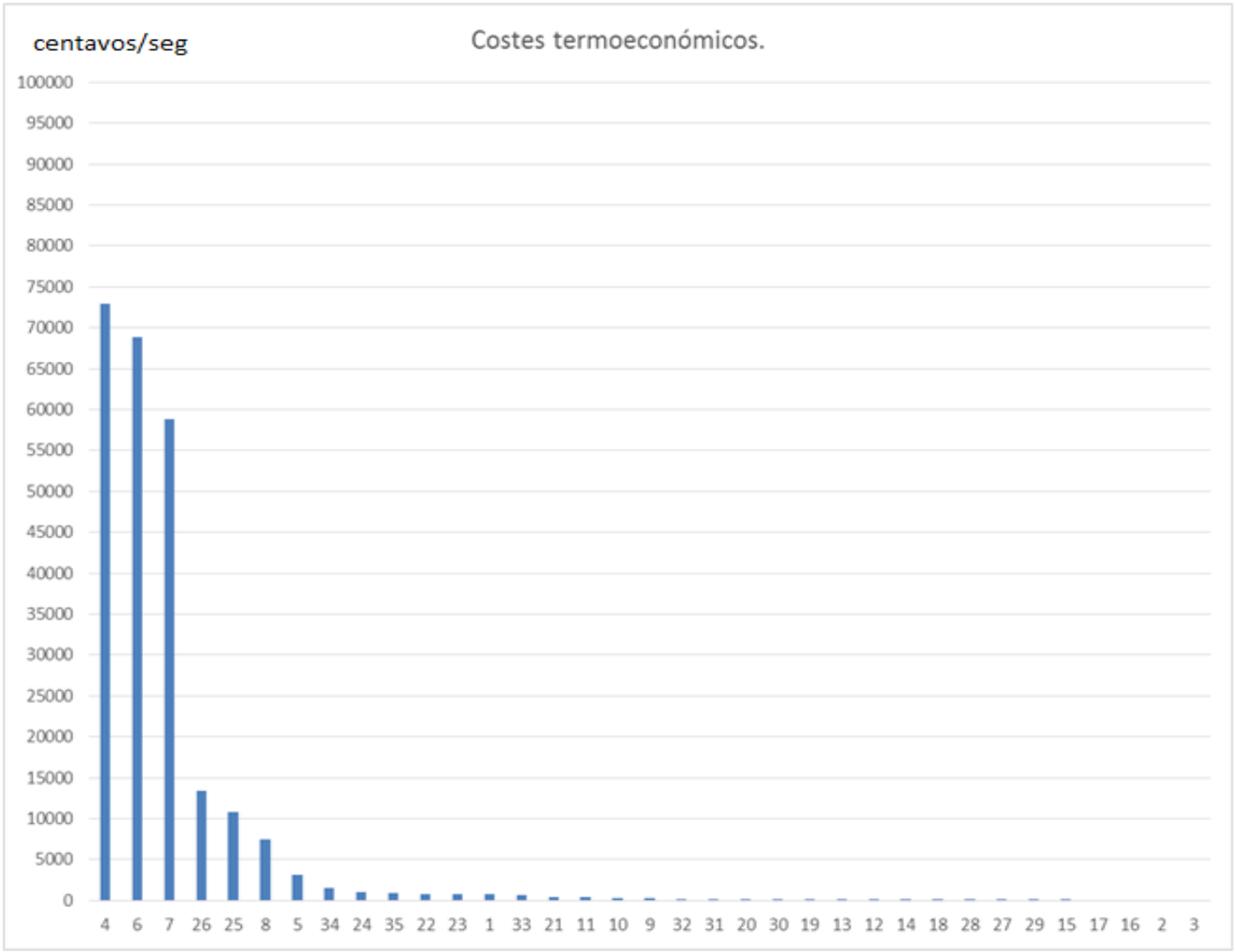


Fig. 3.2 Costes termoeconómicos

Como se observa en el gráfico las corrientes que presentan mayores costes termoeconómicos son las de vapor vivo y la salida del cilindro de alta hacia el recalentamiento (4, 6, 7 respectivamente). Se destacan además los flujos 26, 25, 8 (entre 7500 y 14 000 c/s) sobre el resto del grupo, que oscilan entre 1 y 1500 centavos por segundo.

Existe total coincidencia con los resultados del costo exergético, lo que se explica a partir del hecho de que los equipos con mayor coste de inversión, operación y mantenimiento son precisamente el generador de vapor y la turbina con sus agregados.

La figura 3.3 muestra los resultados del coste termoeconómico unitario en forma gráfica.

Fig. 3.3 Costes termoeconómicos unitarios.

En este caso los flujos 20 y 13 son los que presentan mayor costo termoeconómico por unidad de costo exergético, con valores que alcanzan prácticamente los 30 pesos por GJ. Estos resultados se explican a partir de que esas corrientes poseen un bajo

coste exergético al corresponder a las etapas de baja presión del ciclo regenerativo del agua de alimentar.

Existe un segundo grupo (1, 8, 10, 22, 21, 23, 24, 32, 9, 34, 35, 5, 33, 4, 25, 26, 6, 7, 30.) que tiene un coste que ronda entre los 18 y 19 pesos por GJ, superior a los 14 o 15 pesos que tienen los flujos 19, 29, 28, 18, 27, 14. Por último los flujos 2, 3, 12, 15, 16 y 17 mantienen su coste termoeconómico unitario en 0.

.

El costo exergoeconómico unitarios se obtiene al referir el coste termoeconómico a los flujos de exergía de cada corriente. La figura 3.4 muestra estos resultados en forma gráfica.

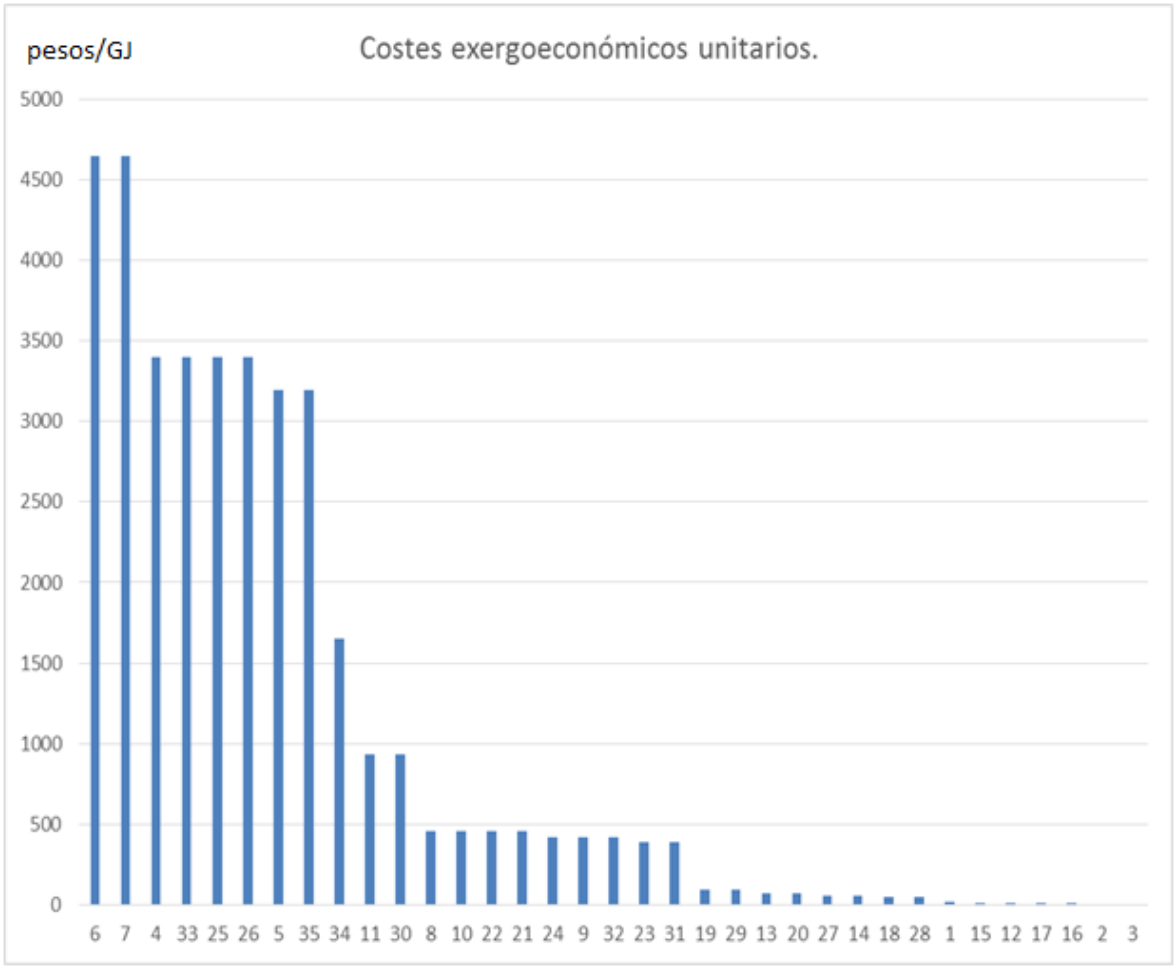


Fig. 3.4 Costes exergoeconómicos unitarios.

Como muestra la figura 3.4 los flujos 6 y 7 presentan los costes exergoeconómicos más elevados, con valores que sobrepasan los 4500 pesos/GJ. En un segundo lugar están los flujos 33, 25, 26, 5, 35 con costes que oscilan entre los 3000 y 3500 pesos/GJ. Los valores más pequeños se encuentran en los flujos 9, 29, 13, 20, 27, 14, 18, 28, 1, 15, 12, 17, 16 2 y 3 que se encuentran entre 0 y 92 pesos/GJ. Estos resultados están condicionados por el valor del flujo exergético de cada corriente.

Independientemente de las diferencias en los costos exergoeconómicos unitarios obtenidos, se corrobora que los flujos asociados con los valores de costos mayores son los de mayor incidencia y por tanto los que deben ser objeto de análisis y control más minucioso.

3.2.2 Costos termo y exergoeconómicos variables.

En este apartado se evalúa la influencia del costo del combustible en los costos termo y exergoeconómicos calculados anteriormente. La Tabla 3.3 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 3.3 Costes termoeconómicos variables.

Flujo	Coste termoeconómico variable (centavos/seg)	Coste termoeconómico variable unitario (pesos/GJ)	Coste exergoeconómico variable unitario (pesos/GJ)
1	728.79	18.47	18.47
2	0	0	0
3	0	0	0
4	73184.28	18.45	3408.86
5	3144.33	18.45	3209.21
6	69108.25	18.45	4662.29
7	59009.77	18.45	4662.82
8	7521.09	18.45	461.49
9	226.06	18.45	423.46
10	308.26	18.45	461.44
11	397.62	18.45	971.15
12	0	0	0
13	13.91	18.45	43.97
14	13.91	18.45	74.41
15	0	0	0
16	0	0	0
17	0	0	0
18	13.35	18.45	66.78
19	30.52	18.45	119.98
20	22.74	18.45	43.99
21	383.84	18.45	459.61
22	799.74	18.45	459.67
23	799.74	18.45	391.87
24	1032.63	18.45	423.46
25	10904.51	18.45	3408.86
26	13446.02	18.45	3408.86
27	3.38	18.45	74.41
28	3.38	18.45	66.72
29	2.86	18.45	119.98
30	36.53	18.45	971.10
31	107.60	18.45	391.87
32	114.42	18.45	423.42

33	602.84	18.45	3408.82
34	1521.01	18.45	1653.62
35	931.68	18.45	3209.21

La figura 3.5 muestra los resultados del coste termoeconómico variable en forma gráfica.

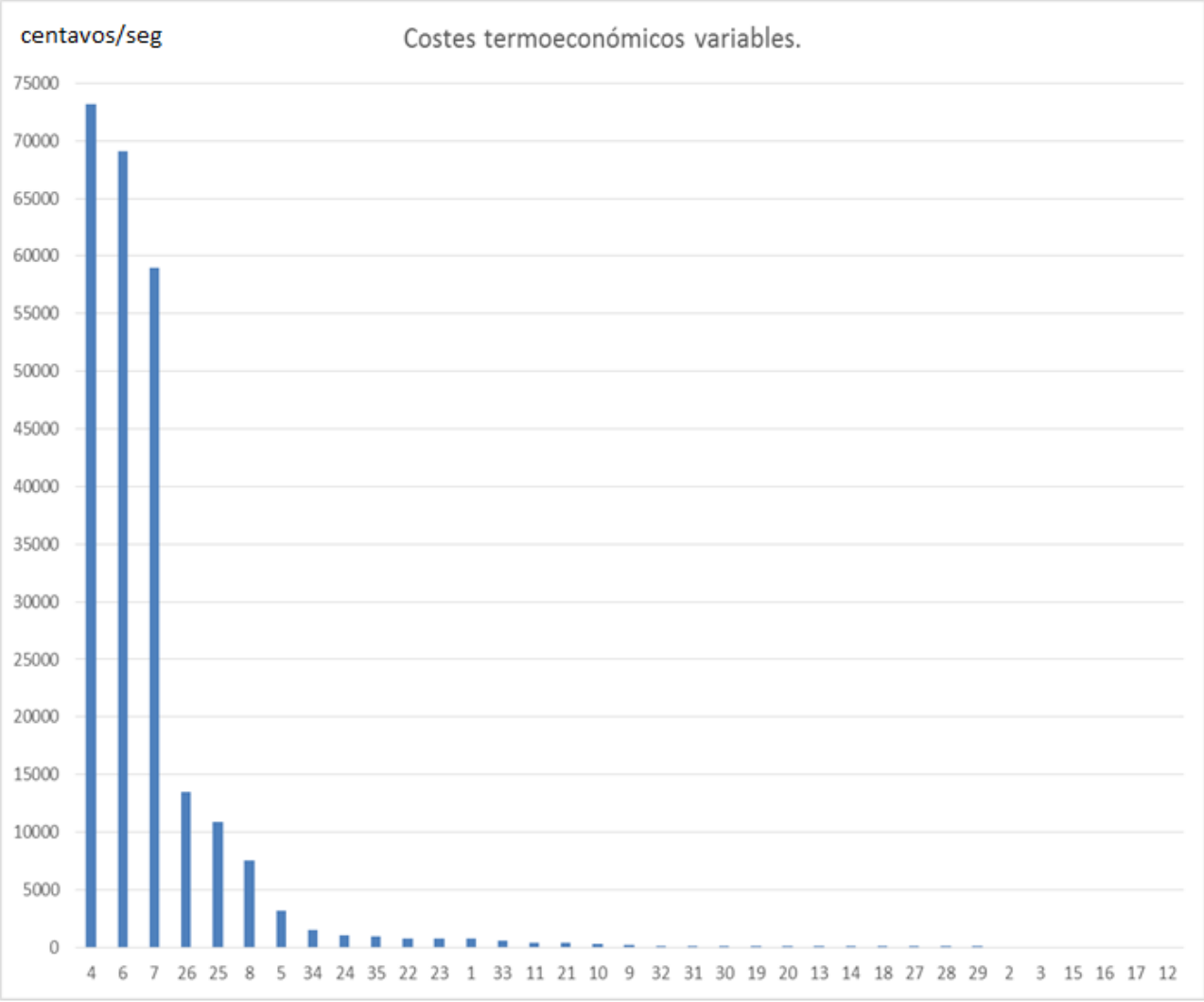


Fig. 3.5 Costes termoeconómicos variables.

En este gráfico los costos que representan los mayores costes termoeconómicos variables o de combustibles son los de vapor vivo y la salida del cilindro de alta hacia

el recalentamiento (4, 6, 7 respectivamente), con valores similares a sus respectivos costos termoeconómicos.

La figura 3.6 muestra los resultados del coste termoeconómico variable unitario en forma gráfica.

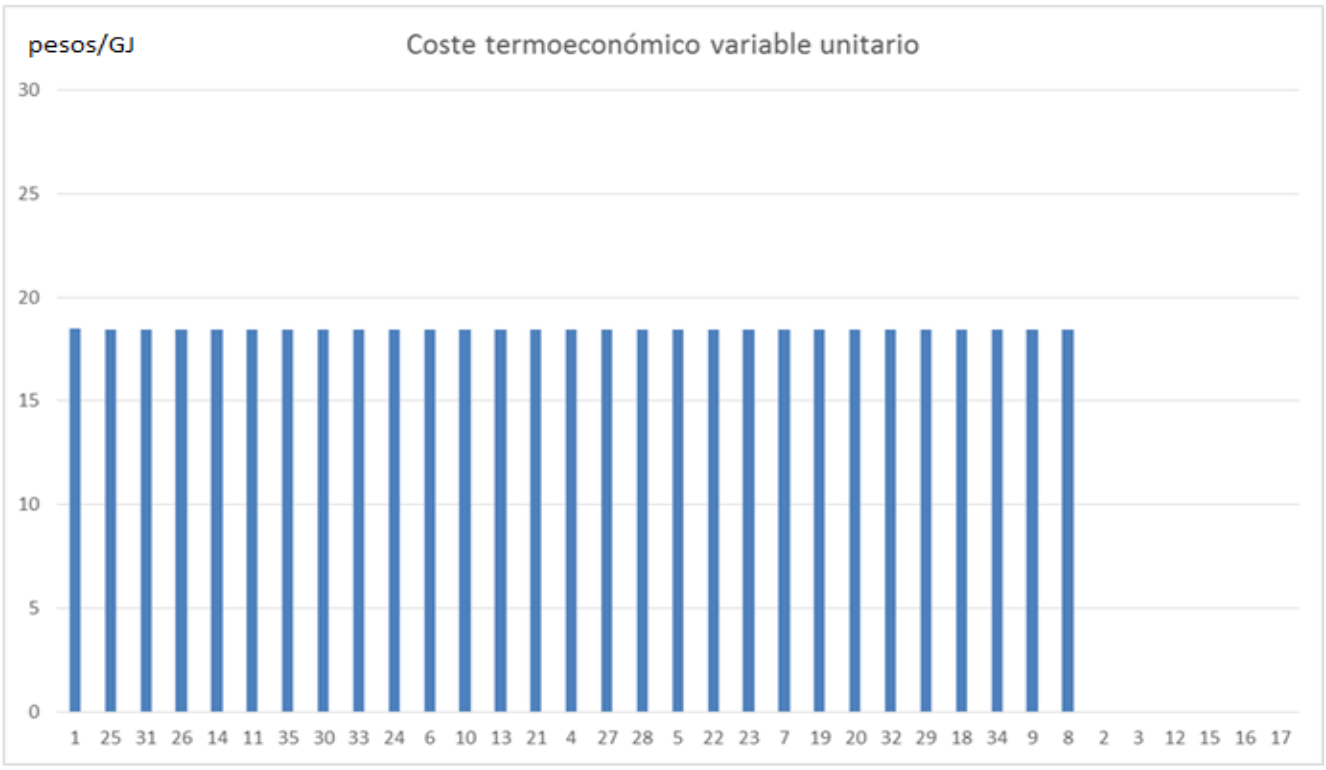


Fig. 3.6 Costes termoeconómicos variables unitarios.

Como se puede observar la mayoría de los flujos mantiene estabilidad en sus costos termoeconómicos variables unitarios, con valores de aproximadamente 19 pesos/GJ. En los flujos 2, 3, 12, 15, 16 y 17 el coste es 0.

La figura 3.7 muestra los resultados del coste exergoeconómico unitario en forma gráfica.

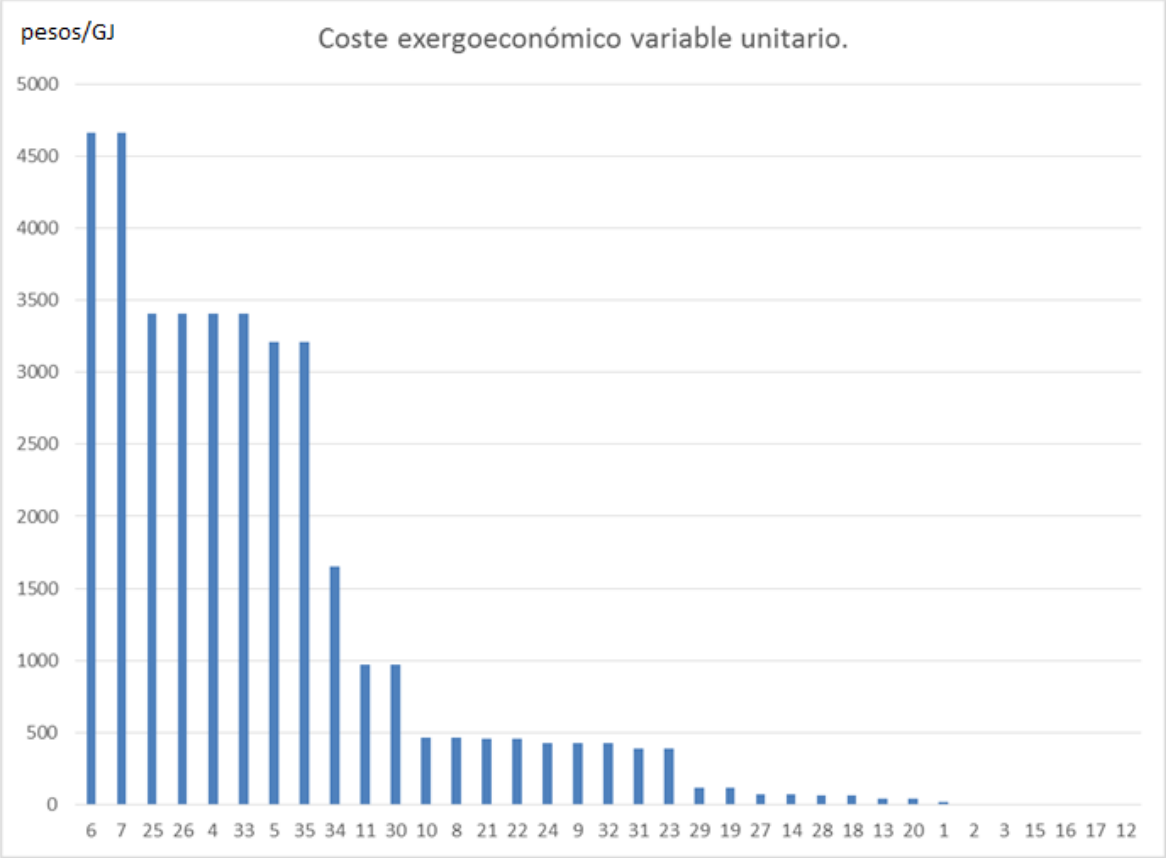


Fig. 3.7 Costes exergoeconómicos variables unitarios.

En los costos exergoeconómicos unitarios se observa que los flujos 6 y 7 son los más elevados, con valores que sobrepasan los 4500 pesos/GJ. En un segundo lugar están los flujos 33, 25, 26, 5, 35 con costes que oscilan entre los 3000 y 3500 pesos/GJ. Los valores más pequeños se encuentran en los flujos a9, 29, 13, 20, 27, 14, 18, 28, 1, 15, 12, 17, 16 2 y 3 que se encuentran entre 0 y 92 pesos/GJ.

Conclusiones parciales.

1. Siguiendo la metodología descrita en el capítulo 2 se calcularon los costos exergéticos y los costos exergéticos unitarios. Los flujos que presentan mayores valores corresponden al flujo de vapor vivo y al vapor a la salida del cilindro de alta presión hacia el recalentamiento.

2. Existe coincidencia entre los resultados del análisis termoeconómico (coste termoeconómico y coste termoeconómico unitario) y el exergético, lo que se explica a partir del hecho de que los equipos con mayor coste de inversión, operación y mantenimiento son precisamente los asociados al generador de vapor y la turbina con sus agregados.

3. Independientemente de las diferencias en los costos exergoeconómicos unitarios obtenidos, se corrobora que los flujos asociados con los valores de costos mayores son los de mayor incidencia y por tanto los que deben ser objeto de análisis y control más minucioso.

4. La influencia del costo del combustible se evalúa mediante los costos termo y exergoeconómicos variables. Los resultados obtenidos pueden ser muy útiles para práctica operacional de la unidad 4 de la CTE Carlos Manuel de Céspedes y la toma de decisiones sobre mantenimientos y reparaciones necesarios.

Conclusiones generales.

1. El análisis termoeconómico tiene como uno de sus objetivos principales la determinación de los costes mediante una combinación adecuada de los recursos de la termodinámica y la economía. Así la termoeconomía aporta una herramienta de análisis y optimización cómoda y potente, tanto para el proyecto de nuevos sistemas como para el estudio de mejoras o la optimización de la gestión de instalaciones existentes.
2. A pesar de las ventajas reconocidas de los métodos de análisis de procesos basados en la Segunda Ley (exergéticos y termoeconómicos) los estudios basados en ellos son aún poco frecuentes en la práctica industrial. Por ello resulta necesario y pertinente el esfuerzo conjunto de las instituciones de investigación científica y los departamentos técnicos de las empresas industriales para su generalización.

3. Se realiza el análisis exergo y termoeconómico de la Unidad 4 de la CTE Carlos M. de Céspedes de Cienfuegos utilizando el procedimiento matricial. A partir de los respectivos balances termodinámicos se obtiene la matriz de incidencia de masa, de energía y de exergía, así como la matriz adicional y los vectores de costes complementarios específicos para el esquema térmico analizado.

4. El procedimiento para la ampliación de la matriz de incidencia de rango 15 x 35 a una matriz cuadrada de rango 35 x 35 tiene una influencia decisiva en los resultados y se basa en las reglas de asignación de costes exergéticos. Sin embargo, las referidas reglas no están suficientemente establecidas en la literatura consultada para los casos de esquemas térmicos complejos y constituyen fuente de incertidumbre para el análisis.

5. Los resultados de los costos exergéticos y los costos exergéticos unitarios muestran mayores valores para las corrientes correspondientes al flujo de

vapor vivo y al vapor a la salida del cilindro de alta presión hacia el recalentamiento. Existe coincidencia entre los resultados del análisis termoeconómico (coste termoeconómico y coste termoeconómico unitario) y el exergético, lo que se explica a partir del hecho de que los equipos con mayor coste de inversión, operación y mantenimiento son precisamente los asociados al generador de vapor y la turbina con sus agregados.

6. Mediante los costos termo y exergoeconómicos variables es posible evaluar la influencia del costo del combustible. Los resultados obtenidos pueden ser muy útiles para práctica operacional de la unidad 4 de la CTE Carlos Manuel de Céspedes y la toma de decisiones sobre mantenimientos y reparaciones necesarios.

Recomendaciones.

1. Profundizar en el procedimiento para la ampliación de la matriz de incidencia a partir de las reglas de asignación de costes exergéticos.
2. Presentar los resultados alcanzados al personal técnico de la CTE y continuar trabajando por su implementación y perfeccionamiento.
3. Realizar un análisis de sensibilidad para los principales parámetros de operación como temperatura y presión del vapor de admisión, de las extracciones, magnitud del vacío del condensador, para valorar su influencia en la exergía de los equipos.

Referencias

Benítez A. J., C. A. (s.f.). *“El proceso de formación de costos en la industria.* (Vol. Centro Azúcar 1/2001.). Facultad de Ingeniería Mecánica, ISPJAE.

Gago, C. M. (2010). *"Análisis de costos exergéticos en una planta termoeléctrica".* Universidad de Zaragoza.

García J., Q. E. (2009). *Termoecomía y optimización energética.* Ediciones Peninsular.

Gonzáles, H. J. (2013). *Análisis exergético de la unidad 4 de la CTE Carlos M. de Céspedes.*

Kim D.J. (2010). “A new thermoeconomic methodology for energy systems”, .

Lozano M. A., V. A. (2009). *“Teoría de coste exergético: I. Conceptos básico".* Universidad de Zaragoza.

M., U. (2000). “Análisis termoeconómico y simulación de una planta combinada de producción de agua y energía”. Universidad de Oviedo.

Oktay Z., D. I. (2009). “Exergoeconomic analysis of the Gonen geothermal district". Energy and Buildings.

Ripoll, M. L. (01 de 06 de 2014). Directora de Administración Financiera. (W. G. Urquiza, Entrevistador)

Serra L. (1994.). *“Optimización Exergoeconómica de Sistemas Térmicos”, .* Universidad de Zaragoza.

Torres C. (1991.). *“Exergoeconomía simbólica. Metodología para el análisis termoeconómico de los sistemas energéticos”.* Universidad de Zaragoza.

Torres C., V. A. (2001). *“Curso de Doctorado de Termoeconomía”.* Universidad de Zaragoza.

Tribus N. y Evans R.B. (1962). “Thermoeconomics”. UCLA, Dept of Engineering Report.

Uche, M. (2000). “Análisis termoeconómico y simulación de una planta combinada de producción de agua y energía”. Universidad de Oviedo.

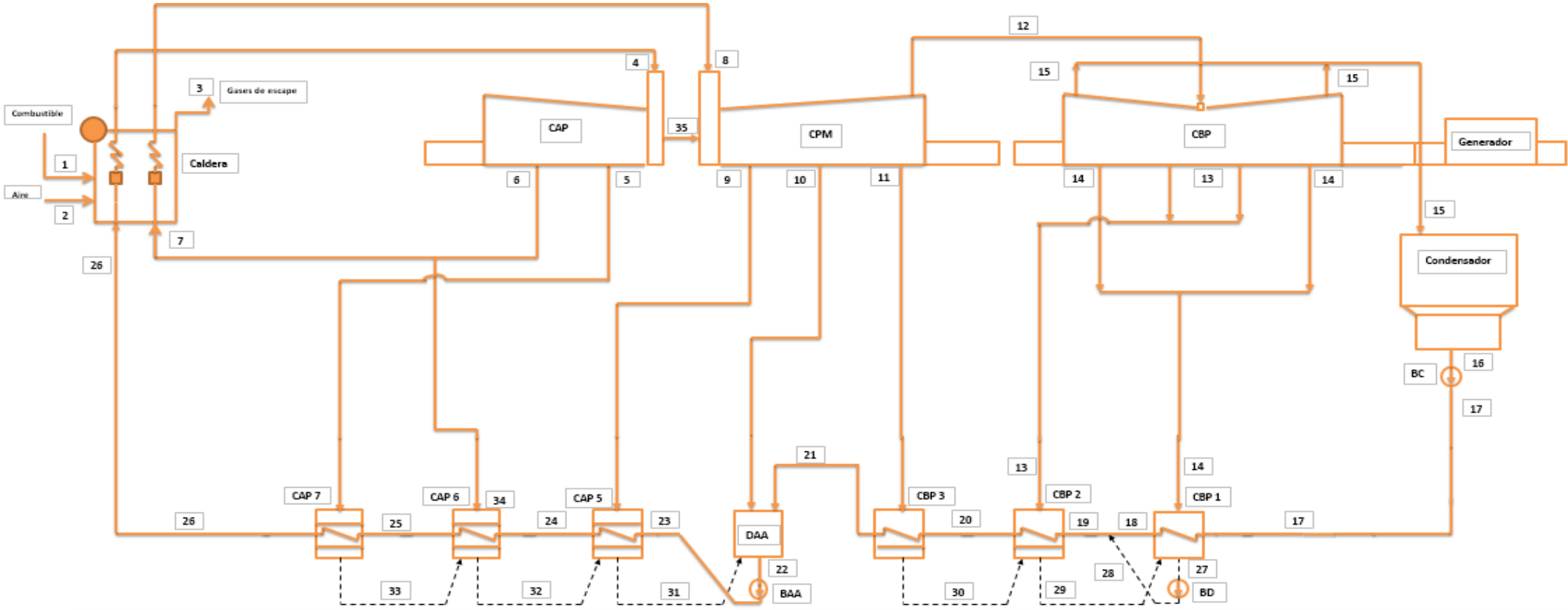
Valero A. (1998). *“Thermoeconomics as a conceptual basis for energy-ecological analysis”.* Proceedings of the International Workshop on Advances in Energy Studies.

Valero, A. (1996). *Análisis termoeconómico de procesos industriales.* Universidad de Oviedo.

Anexos.

Anexo 1.

Esquema de la unidad 4 de la CTE Carlos M de Céspedes.



Anexo 2.

Matriz de incidencia de masa.

Equipos	Flujos de materia entre equipos																																		Fugas o variaciones de nivel														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Caldera	1	1	-1	-1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAP	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CPM	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CBP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAP 7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAP 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAP 5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DAA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CBP 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CBP 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CBP 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Condensador	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bomba AA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bomba D	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bomba C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Anexo 3.

Matriz de incidencia de energía.

Equipos	Flujos de materia entre equipos																																		Fugas o variaciones de nivel													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Calde	1	1	-1	-1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAP	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CPM	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CBP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAP 7	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAP 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CAP 5	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
DAA	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CBP 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CBP 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CBP 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Conde	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bomb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bomb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bomb	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

								Calores intercambiados															Trabajos intercambiados							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

Anexo 4

Matriz adicional.

Entradas(flujos) 16(1)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17(2)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Residuos(flujo) 18(3)	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bifurcaciones 19	0	0	0	0	0	6.75E-06	-7.9E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0.000102	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.00034
21	0	0	0	-4.7E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.54E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0.151286	0	-0.00015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000187	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4.1E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000244	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.00266	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.16E-05	0	0	-0.00015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000316	0	0	0	0	0	0	-0.00019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000535	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.0022	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.00197	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.037866	-0.00365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000393	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.00424	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00012	-5.7E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.9E-05	0	0	0	0	0	0	0	-0.00036	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.13E-05	-2.5E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.1E-05	0	0	0	0	0	0	0	-0.00037	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.13E-05	0	0	0	0	0	0	0	-0.00057	0	0	0

Anexo 5

Matriz de costes.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35
1	1	1	-1	-1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1
3	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	-1	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	1	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	1	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	0	1	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Entradas(flujos) 16(1)	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17(2)	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Residuos(flujo) 18(3)	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Bifurcaciones 19	0	0	0	0	0	6.75E-06	-7.9E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0.000102	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.00034
21	0	0	0	-4.7E-06	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.54E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	0	0	0.151286	0	-0.00015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
23	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000187	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-4.1E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000244	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.00266	0	0	0	0	0
25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.16E-05	0	0	-0.00015	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
26	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000316	0	0	0	0	0	0	-0.00019	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000535	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.0022	0	0	0	0	0	0	0	0
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0005	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.00197	0	0	0	0	0	0	0
29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.037866	-0.00365	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.000393	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-0.00424	0	0	0	0	0	0
31	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00012	-5.7E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.9E-05	0	0	0	0	0	0	0	-0.00036	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.13E-05	-2.5E-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.1E-05	0	0	0	0	0	0	0	-0.00037	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3.13E-05	0	0	0	0	0	0	0	-0.00057	0	0