

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

La Revolución Industrial cambió drásticamente la condición de las sociedades humanas al permitir al hombre disponer de grandes cantidades de energía. Con el desarrollo de la máquina térmica, la energía del carbón y posteriormente la del petróleo, gas natural y combustible nuclear se ha podido utilizar para la producción y el consumo de bienes y servicios que eran impensables en otra época.

En tiempos preindustriales, las fuentes principales de energía mecánica eran el viento, el movimiento del agua y la proveniente de los animales domésticos; la fuente principal de energía térmica era la leña. El uso que se le daba a la energía disponible era para realizar actividades relativamente básicas tales como bombear agua, moler grano, propulsar barcos de vela, refinar metales y cocinar. Las tecnologías para transformar energía utilizadas en tiempos preindustriales tales como los molinos de agua y de viento presentaban un impacto ambiental mínimo.

Con el desarrollo de la máquina térmica, el combustible fósil se convirtió en la fuente principal de energía, (seguido del combustible nuclear y la hidroenergía.) La primera máquina térmica que se utilizó para transformar la energía del carbón en trabajo fue la máquina de vapor, utilizada originalmente para bombear agua de las minas, para operar los molinos y para propulsar trenes y barcos. Posteriormente se desarrollaron los motores de gasolina y de diesel [1].

Durante el Siglo XX, la generación eléctrica con turbina de vapor fue la tecnología más utilizada para la distribución de trabajo a los consumidores. Por otro lado, en las próximas décadas la turbina de gas de ciclo combinado (GCGT) será la opción preferible debido a sus ventajas económicas y ambientales [2]. Actualmente, 55% del combustible fósil a nivel mundial es consumido en plantas de generación eléctrica [1].

En este capítulo introductorio se analizan los efectos de la quema de combustible fósil sobre el medio ambiente; posteriormente, se presentan las ventajas de usar el método de análisis exergético para evaluar los procesos de conversión de energía; finalmente, se exponen los objetivos del presente trabajo de investigación.

1.1 La generación de energía eléctrica y el medio ambiente

El Siglo XX estuvo caracterizado por un consumo mundial de energía sin precedente. Paralelamente, estuvo marcado por un reconocimiento de que la producción de energía eléctrica a partir de combustible fósil y nuclear está teniendo efectos dañinos sobre la calidad del medio ambiente y la salud humana.

La población humana a nivel mundial actualmente consume casi el doble de energía primaria de la que consumía hace 30 años y se proyecta que para el año 2030 su consumo sea de alrededor de un 50% por encima de los niveles actuales (tabla 1.1). Los combustibles fósiles son las principales fuentes de energía primaria y continuarán siéndolo durante las próximas décadas, cubriendo más del 90% del incremento en la demanda hasta 2030 (tabla 1.1).

	1971	2000	2010	2030
Carbón	1,449	2,355	2,702	3,606
Petróleo	2,450	3,604	4,272	5,769
Gas natural	895	2,085	2,794	4,203
Nuclear	29	674	753	703
Hidroenergía	104	228	274	366
Otras renovables	73	233	336	618
TOTAL	4,999	9,179	11,132	15,267

Tabla 1.1. Demanda mundial de energía primaria en unidades de Mtoe (million tons of oil equivalent) en los años 1971, 2000, y proyecciones para los años 2010 y 2030 (fuente: Agencia Internacional de la Energía. *World Energy Outlook 2002*).

Por otro lado, la generación de energía eléctrica a nivel mundial se duplicará durante el período entre el año 2000 y el 2030 (tabla 1.2). La fuente principal de energía primaria destinada a la generación de electricidad actualmente es el combustible fósil (64%), y durante las próximas décadas lo seguirá siendo, cubriendo un mayor porcentaje de la demanda (72.5%) (figuras 1.1 y 1.2). La porción de electricidad a nivel mundial generada con combustible nuclear comenzará a declinar dentro de pocos años, pasando de un 17% en el 2000 a un 8.4% en el 2030. La cantidad de electricidad a nivel mundial generada con hidroenergía seguirá aumentando durante las próximas décadas, sin embargo, su fracción respecto a la generación eléctrica mundial total disminuirá, pasando de 17% en el

2000 a 13.5% en el 2030. Finalmente, el mayor crecimiento anual se dará para las otras fuentes de energía renovable (tabla 1.2), y su fracción del pastel eléctrico se incrementará de 1.6% a 4.4% en 30 años.

	2000	2010	2020	2030	Promedio de crecimiento anual (%)
Carbón	5,989	7,143	9,075	11,590	2.2
Petróleo	1,241	1,348	1,371	1,326	0.2
Gas natural	2,676	4,947	7,696	9,923	4.5
Celdas de hidrógeno	0	0	15	349	-
Nuclear	2,586	2,889	2,758	2,697	0.1
Hidroenergía	2,650	3,188	3,800	4,259	1.6
Otras renovables	249	521	863	1,381	5.9
Generación total (TWh)	15,391	20,037	25,578	31,524	2.4

Tabla 1.2. Balance de electricidad a nivel mundial (fuente: Agencia Internacional de la Energía. *World Energy Outlook 2002*).

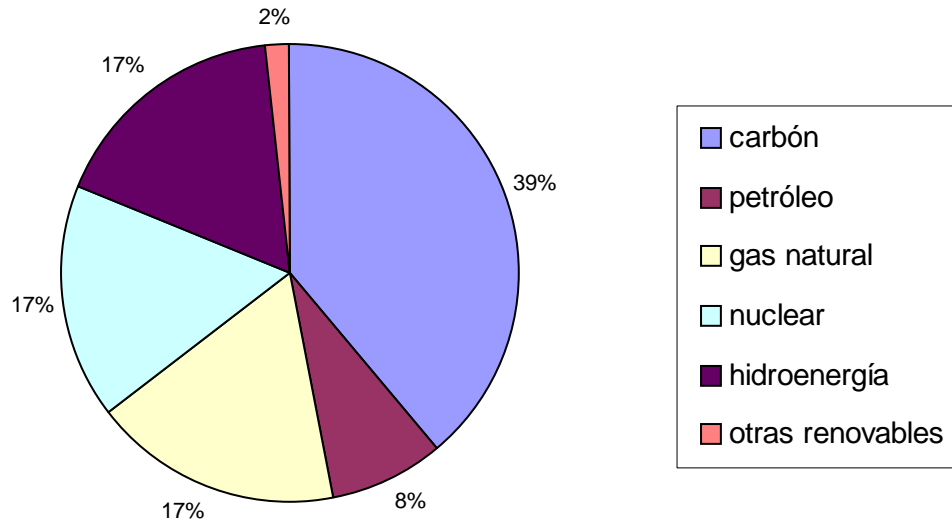


Figura 1.1. Generación de energía eléctrica a nivel mundial en el año 2000 (fuente: *WEO 2002*).

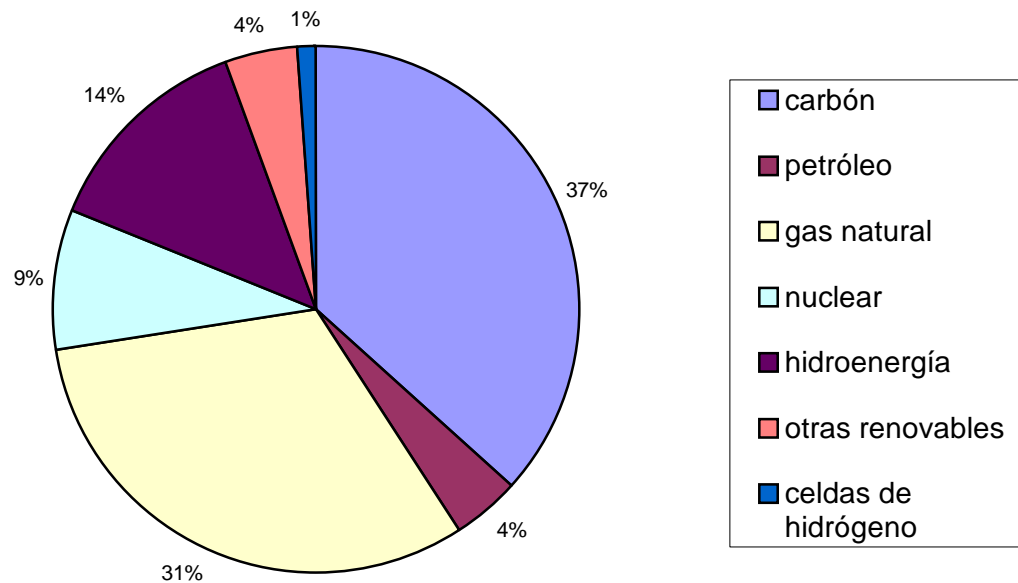


Figura 1.2. Generación de energía eléctrica a nivel mundial en el año 2030 (fuente: Agencia Internacional de la Energía. *World Energy Outlook 2002*).

Con los extensos depósitos de petróleo que tiene México, no es sorprendente que cerca de la mitad de la demanda de energía eléctrica se cubra actualmente con petróleo (figura 1.3). Sin embargo, se proyecta que durante los próximos 25 años México pase de ser un exportador a un importador de petróleo [2], y que para el año 2030, el gas natural sea el combustible dominante, cubriendo un 51% de la demanda de energía eléctrica (figura 1.4).

	1990	2000	2010	2030	Promedio de crecimiento anual 2000-2030 (%)
Carbón	8	19	22	32	1.7
Petróleo	70	97	109	141	1.2
Gas natural	13	40	97	296	6.9
Nuclear	3	8	10	10	0.8
Hidroenergía	23	33	43	58	1.9
Otras renovables	6	6	13	41	6.7
Generación total (TWh)	123	204	294	578	3.5

Tabla 1.3. Balance de electricidad en México (fuente: Agencia Internacional de la Energía. *World Energy Outlook 2002*).

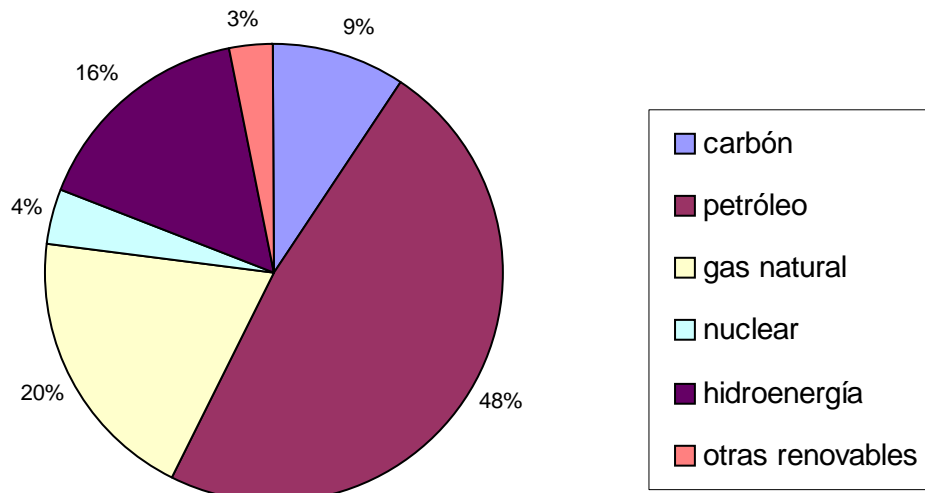


Figura 1.3. Generación de energía eléctrica en México 2000 (fuente: Agencia Internacional de la Energía. *World Energy Outlook 2002*).

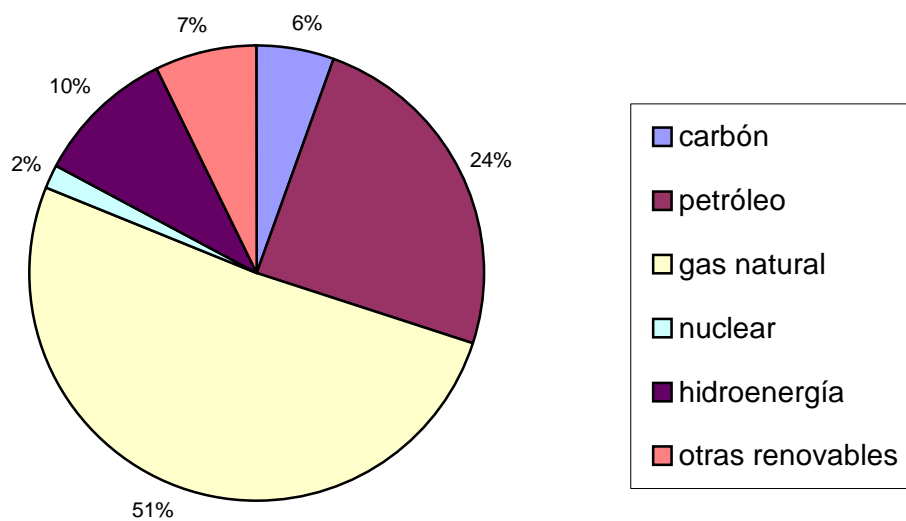


Figura 1.4. Generación de energía eléctrica en México 2030 (fuente: Agencia Internacional de la Energía. *World Energy Outlook 2002*).

A pesar de los innegables beneficios de la generación de energía eléctrica, la quema de combustible fósil conlleva efectos dañinos sobre el mundo natural. Estos efectos incluyen, entre otros, un aumento de la contaminación del aire, agua y suelos, y más recientemente, cambios en el clima global en gran medida debido a las emisiones antropogénicas de gases invernadero.

La quema de combustible fósil produce contaminantes sólidos y gaseosos tales como óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre, los cuales pueden llegar a concentraciones dañinas para la salud pública. Algunos de estos contaminantes reaccionan en la atmósfera al absorber la radiación solar formando otros productos tóxicos, como el ozono, el cual no es emitido directamente por ninguna fuente. Debido a la complejidad de las reacciones fotoquímicas atmosféricas, se requiere de un gran esfuerzo de limitar la emisión de todos los precursores de la contaminación atmosférica si se ha de reducir su concentración a niveles bajos [1].

A pesar de la severidad de la contaminación, es técnicamente posible reducirla a niveles no dañinos al limitar la emisión de los contaminantes. Para esto, sin embargo, se requiere de tecnología compleja y costosa. En algunos países existen regulaciones que mandan la instalación de dispositivos de control de emisiones en las centrales termoeléctricas [1]. Sin embargo, en México aún no se han implementado este tipo de regulaciones.

Por otro lado, el aumento en la temperatura promedio de la atmósfera terrestre debido a la creciente concentración de los gases invernadero se ha convertido en una preocupación internacional. Los gases invernadero son moléculas que absorben la radiación infrarroja,

las cuales al acumularse en la atmósfera alteran el equilibrio térmico de la Tierra con el Sol y el espacio exterior. El gas de invernadero más común es el dióxido de carbono, el cual es liberado cuando se quema combustible fósil.

De acuerdo con un estudio realizado por la Agencia Internacional de la Energía, se proyecta que, para el año 2030, las emisiones de CO₂ a nivel mundial llegarán a un 70% por encima de los niveles actuales [2]. De este incremento en las emisiones de CO₂, casi la mitad será debido a la generación eléctrica [2].

Contrario a lo que ocurre con los químicos contaminantes, la mayoría de los cuales se precipitan desde la atmósfera después de unos pocos días de su emisión, los gases de invernadero se acumulan en la atmósfera durante años, incluso siglos. Por lo tanto, el aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera refleja las emisiones acumuladas durante muchas décadas pasadas.

Limitar el aumento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera requiere ya sea de la reducción en la quema de combustible fósil o del secuestro del dióxido de carbono generado debajo de la superficie de la Tierra o de los océanos [1]. Sin embargo, a diferencia de la reducción de emisiones de otros contaminantes del aire, la reducción en las emisiones de CO₂ no va a reducir la concentración de éste en la atmósfera, sólo aminorará su aumento inexorable.

Por otro lado, el combustible fósil es un recurso no renovable ya que se extrae de depósitos de la Tierra que tardaron millones de años en formarse. De acuerdo a un estudio realizado en 1997 por el Censo Geológico de los Estados Unidos (USGS), al ritmo

actual de consumo, las reservas probadas de carbón disponible durarán 250-300 años, las de petróleo 65-70 años y las de gas natural 85-90 años [1].

En contraste con las plantas termoeléctricas, las plantas nucleares no emiten CO_2 a la atmósfera ni otros contaminantes como SO_2 o NO_x . La desventaja principal de las centrales nucleares, sin embargo, es la dificultad de asegurarse de que la inmensa radioactividad de su combustible nunca escape por accidente. Además, al igual que el combustible fósil, el combustible nuclear es un recurso no renovable.

Por lo tanto, debido al riesgo de accidentes y a los problemas ambientales relacionados con la preparación del combustible y el manejo y almacenaje de los desechos nucleares, en muchos países se han abandonado los planes de construcción de nuevas centrales nucleares [1].

Existen otras fuentes de energía menos ricas pero que son limpias y no son agotables. Estas son las llamadas fuentes de energía renovable, y son la energía del sol, del viento, de las corrientes de los ríos, de la marea y de la biomasa. De hecho, éstas son las fuentes de energía que se utilizaban a pequeña escala en las sociedades preindustriales. La tecnología moderna ha permitido utilizar estas fuentes en una escala mucho mayor; sin embargo, en el año 2000 en conjunto constituyeron sólo un 5% del consumo mundial de energía [2].

Actualmente, algunas de las energías renovables (hidroenergía, eólica, solar térmica) son competitivas respecto a la energía fósil y nuclear, mientras que otras (fotovoltaica) en general son todavía más costosas, aunque no excesivamente, y eventualmente pueden volverse más económicas conforme se consideren los costos del manejo de la

contaminación en el precio de la energía fósil y nuclear (1). De acuerdo a la proyección realizada por la Agencia Internacional de la Energía, el porcentaje de fuentes renovables en la generación eléctrica se incrementará de un 1.6% en el año 2000 hasta un 4.4% para el año 2030 [2].

La conclusión principal es que con el fin de preservar las reservas fósiles, de mitigar la contaminación atmosférica y la producción de desechos radioactivos, y de aminorar el calentamiento global asociado a la creciente concentración de CO₂ en la atmósfera, el ser humano debe preservar estos recursos, incrementar la eficiencia en su uso y volver a fuentes de energía renovables.

Debido a la gran escala a la que se construyen las plantas generadoras de potencia, el aumento en su eficiencia representa un ahorro significativo de los recursos, así como una moderación de las emisiones de desechos contaminantes y CO₂. Evidentemente, esta no es una medida decisiva para cambiar el curso de los hechos, pero es una medida importante durante el período de transición hacia el uso a gran escala de fuentes de energía limpias.

En la siguiente sección se introduce el método de análisis exergético para evaluar la eficiencia de los procesos de conversión de energía y guiar las decisiones orientadas hacia el uso eficiente de ésta.

1.2 El método de análisis exergético

Los métodos tradicionales de análisis de sistemas de conversión de energía se basan en la Primera Ley de la Termodinámica y en la eficiencia térmica como la variable que evalúa el funcionamiento termodinámico de un sistema. La eficiencia térmica es sin duda alguna un factor que proporciona información valiosa acerca del límite superior de obtención de energía. Sin embargo, existe información que no puede obtenerse por medio de un análisis basado en la Primera Ley exclusivamente.

En general, el balance de energía no proporciona información acerca de las pérdidas internas [3]. Un balance de energía para un sistema adiabático como una válvula de admisión, un intercambiador de calor o una cámara de combustión puede llevar a uno a creer que estos procesos están libres de pérdidas de cualquier tipo.

Esto se debe a que el balance de energía trata todas las formas de energía como equivalentes, sin diferenciar entre los diferentes grados de calidad de la energía [3]. De este modo, la energía de una fuga de vapor a alta presión de la turbina se trata de manera similar a la energía transferida al ambiente por medio del condensador en una planta generadora de potencia.

El método de análisis exergético es una técnica relativamente nueva basada en el concepto de exergía, definido en términos generales como el potencial de generar trabajo que poseen diferentes formas de energía en relación con un ambiente determinado. A diferencia de los criterios tradicionales de evaluación, el concepto de la exergía se basa en la Primera y Segunda Ley de la Termodinámica.

Existen múltiples libros y artículos que promueven la aplicación del método de análisis exergético [3], [4], [5], [6]. La popularidad del método se debe a que, a diferencia de los análisis basados exclusivamente en los balances de masa y energía, con el método de análisis exergético es posible por un lado identificar las pérdidas termodinámicas internas en un sistema, y por otro comparar entre distintas formas de energía.

Un balance de exergía proporciona información acerca de cuánto del potencial original de generar trabajo se pierde o se destruye durante un proceso. De este modo, la ineficiencia termodinámica de una válvula de admisión resulta evidente.

Por otro lado, un análisis exergético proporciona una medida cuantitativa de la calidad de las diferentes formas de energía. El concepto de calidad de la energía térmica se basa en la temperatura a la cual ésta se encuentra disponible – entre mayor sea esta temperatura, mayor es la eficiencia para convertir la energía térmica a trabajo. De este modo, el análisis exergético permite evaluar un proceso de varios niveles de temperatura [7].

El concepto de exergía se utiliza principalmente dentro del área de generación de potencia, donde se trata con energía en diferentes formas y a diferentes temperaturas y por lo tanto de diversos niveles de calidad [8].

1.3 Justificación y objetivos

Aunque el método exergético generalmente se considera una técnica de análisis nueva, las primeras contribuciones al concepto de “disponibilidad” de la energía para su conversión a trabajo se deben a Clausius, Tait, Thomson, Maxwell y Gibbs y datan de la segunda mitad del Siglo XIX [3].

En la década de los 30s, surgió un interés por la aplicación del concepto de la exergía debido al crecimiento industrial y los nuevos desarrollos tecnológicos. Posteriormente, el progreso fue interrumpido por la Segunda Guerra Mundial, para renacer en la década de los 50s. Desde entonces se han publicado numerosos artículos relacionados con el análisis exergético [3]. En particular, en la década de los 80s se dio en el ámbito académico un auge del análisis exergético, cuando varios grupos de investigadores desarrollaron metodologías y formalizaron teorías encaminadas a la síntesis y la optimización del diseño de sistemas térmicos [9].

Existe un sinnúmero de reportes de la aplicación exitosa del método de análisis exergético tanto a sistemas de generación eléctrica [9], [10], [11], [12], [13], [14], como a sistemas de refrigeración, producción de hidrógeno, intercambio de calor, a procesos industriales, y a sistemas económicos, ecológicos y sociales, entre otros. Sin embargo, a pesar de los numerosos reportes y libros que promueven el uso del método de análisis exergético, los sistemas de conversión de energía en su mayoría se diseñan y su funcionamiento se evalúa usando únicamente los balances de masa y energía [9].

Los objetivos de esta tesis se exponen a continuación:

- Presentar una metodología para realizar un análisis termodinámico del ciclo de vapor de una central termoeléctrica basado en la Primera y en la Segunda Ley.
- Aplicar la metodología anterior al análisis del ciclo de vapor de una central particular con el fin de identificar la locación y magnitud de los principales sumideros de exergía.
- Comparar los resultados obtenidos a partir del análisis con datos de diseño con los obtenidos a partir del análisis con datos de operación.
- Discutir los factores que contribuyen a la ineficiencia del proceso.

1.4 Contenido

Este reporte se estructura en cuatro capítulos. El primero es un repaso de los fundamentos termodinámicos en los que se basa el método de análisis. En primer lugar se repasan las Leyes de la Termodinámica y se analizan el ciclo ideal de Carnot y el ciclo de Rankine; posteriormente, se introduce el concepto de volumen de control para el análisis de sistemas cuyas fronteras permiten el intercambio de materia con los alrededores; se analiza la relación de dependencia que existe entre las propiedades que definen el estado de un sistema; se exponen los fundamentos de los procesos de combustión; finalmente, se elabora el concepto de exergía, haciendo especial énfasis en el concepto de eficiencia exergética.

En el segundo capítulo se presenta la metodología de análisis. Primeramente se describen el sistema y el proceso objetos del estudio; posteriormente, se determinan los supuestos sobre los que se basa el análisis; a continuación, se desarrollan las ecuaciones relevantes a partir de los balances de materia, energía y exergía; finalmente, se define la eficiencia exergética para cada componente así como otros parámetros de evaluación.

Siguiendo la metodología del capítulo dos, en el tercer capítulo se realiza un análisis de la Unidad 1 de la Central Térmica Lerma. A partir de los datos de diseño y operación de las propiedades termodinámicas, se lleva a cabo un análisis de Primera Ley; posteriormente, se calculan los valores de la destrucción de exergía, las eficiencias exergéticas de cada componente y se calculan otros parámetros de evaluación relevantes.

En el cuarto capítulo se presentan los resultados. A partir de los valores obtenidos en el capítulo anterior, se identifican la locación y magnitud de los principales sumideros de exergía. Posteriormente, se comparan de las eficiencias exergéticas del modelo de diseño con las del modelo de operación. Finalmente, se discuten los factores que contribuyen a la ineficiencia del proceso.