

CAPÍTULO 3

EL MÉTODO DE ANÁLISIS EXERGÉTICO

En este capítulo se desarrolla la metodología de análisis, cuya aplicación a una central termoeléctrica particular y el análisis de los resultados se llevan a cabo en los capítulos cuatro y cinco del presente trabajo.

3.1 Breve descripción de la metodología de análisis

La metodología de análisis se describe brevemente a continuación:

1. Realizar una descripción tanto del sistema como del proceso que va a estudiarse.
2. Dividir convenientemente el sistema en volúmenes de control por medio de fronteras claramente especificadas.
3. Definir el ambiente del sistema.
4. Realizar las idealizaciones necesarias para desarrollar un modelo manejable.
5. Calcular los flujos de masa y de energía por medio de un análisis de Primera Ley.
6. Calcular los flujos de exergía y la destrucción de exergía en cada componente.
7. Definir y calcular las eficiencias exergéticas y otros parámetros de evaluación de cada componente.
8. Elaborar un diagrama de flujo exergético.
9. Identificar la locación y magnitud de los principales sumideros de exergía.

3.2 Descripción de una planta termoeléctrica

La mayoría de las plantas termoeléctricas utilizan el ciclo de vapor, llamado ciclo de Rankine. En una planta que opera con el ciclo de vapor, la energía química inherente al combustible primero se transforma para elevar la entalpía de los gases de combustión; esta entalpía se transfiere por convección y radiación al fluido de trabajo; una parte de la entalpía del fluido de trabajo se convierte a energía mecánica en la turbina y otra parte se libera al ambiente por medio del sistema de enfriamiento; finalmente, la energía mecánica de la turbina se convierte a energía eléctrica en un generador.

La vasta mayoría de plantas generadoras de potencia son plantas de vapor en las que agua es el fluido de trabajo. Se utiliza agua debido a que presenta las conveniencias de ser abundante y baja en costo, además de ser no-tóxica, químicamente estable y relativamente no-corrosiva [15]. Los principales componentes de una planta de vapor se muestran esquemáticamente en la figura 3.1.

La función de la caldera -o del reactor nuclear,- es suministrar la energía requerida para vaporizar el agua de alimentación. En las centrales termoeléctricas, esta energía proviene de la quema del combustible fósil, en las nucleoeeléctricas proviene de la reacción nuclear que ocurre en el reactor y en las plantas de potencia solares la radiación solar es colectada y concentrada por colectores.

La mayoría de las calderas modernas son del tipo de pared de agua, en el cual las paredes de la caldera están casi totalmente construidas de tubos verticales que llevan ya sea agua de alimentación hacia la caldera o vapor fuera de ésta.

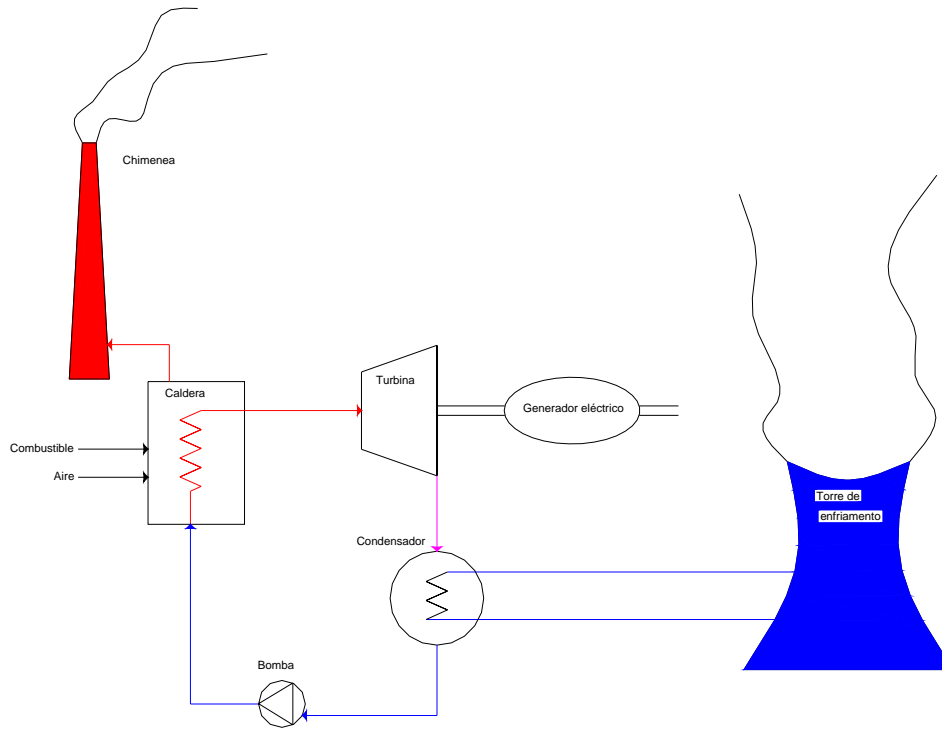


Figura 3.1. Diagrama esquemático de una central termoeléctrica común.

En una caldera de pared de agua común, el agua precalentada que entra a la caldera proveniente del tren de calentadores a una temperatura de alrededor de 230-260°C se calienta aún más en el economizador. Posteriormente entra al tanque de vapor el cual se encuentra arriba de la caldera. En éste el agua líquida se separa del vapor por gravedad y baja hacia la caldera. El agua caliente sube a través de tubos, en los cuales se vuelve vapor. El vapor pasa a través de otra sección de la caldera, llamada sobrecalentador, donde su temperatura se incrementa típicamente hasta alrededor de los 565°C. El calor se transmite al fluido de trabajo en todo el rango de temperaturas entre la de entrada a la caldera hasta la de salida del sobrecalentador [1].

El vapor de alta presión que sale de la caldera pasa a través de la turbina, donde se expande a una presión menor. El principio básico de su funcionamiento es el mismo que

el de su antecesor el molino de agua. Al igual que el agua empuja las aspas del molino, el vapor empuja las aspas de la turbina de vapor. Considerando la alta presión y temperatura del vapor y el hecho de que parte de éste se condensa durante su expansión por la turbina, además de la gran fuerza centrífuga que ejerce el eje, no es de sorprender que la turbina de vapor sea la pieza de maquinaria mas compleja en la planta y posiblemente de toda la industria. Existen unos pocos fabricantes en el mundo que pueden producirlas [1].

El eje de la turbina está conectado a un generador eléctrico. En el generador es donde se transforma el trabajo mecánico a electricidad. El eje de la turbina hace girar cables conductores dentro de un campo magnético. Esto induce una corriente eléctrica a que fluya dentro de los cables. La potencia eléctrica generada es igual a la potencia mecánica del eje, menos pérdidas pequeñas por la resistencia de los cables y por fricción.

El generador produce una corriente eléctrica alterna. El eje de la turbina debe girar a una velocidad específica para producir la frecuencia exacta de la corriente alterna. Para la distribución de la electricidad, el voltaje producido se eleva hasta cientos de kilovolts con el fin de minimizar las pérdidas debidas a la resistencia de los cables.

Por otro lado, el vapor de baja presión que sale de la turbina entra al condensador donde cede parte de su energía al agua fría de alimentación que circula por tuberías procedentes de la torre de enfriamiento o de una fuente de agua cercana. La función del condensador no es únicamente condensar el vapor procedente de la turbina, sino también reducir la presión a la que éste se condensa, lo cual incrementa la eficiencia del ciclo.

La mayor parte de la energía cedida por el sistema se transfiere ya sea a una fuente cercana de agua, tal como un río, un lago o el mar, o a la atmósfera. La descarga de agua caliente a las aguas puede causar contaminación térmica y posible daño a los organismos acuáticos. Debido a esto, las agencias de protección ambiental de muchos países mandan que el calor liberado sea transferido a la atmósfera a través de torres de enfriamiento [1].

Finalmente, el condensado se bombea a una presión mayor, generalmente se precalienta en una serie de intercambiadores de calor, y cierra el ciclo al entrar en la caldera.

Debido a una preocupación por la calidad del medio ambiente y a consideraciones de seguridad, está limitada la interacción entre la central y el medio ambiente. En específico, deben regularse las emisiones de los productos de combustión y la descarga térmica procedente del condensador. Otros aspectos que deben considerarse son el procesamiento y la distribución del combustible, así como el manejo de los residuos tóxicos y peligrosos de la quema de combustible o la reacción nuclear.

Los contaminantes emitidos a la atmósfera debido a la quema de combustible fósil pueden llegar a concentraciones dañinas para la salud pública y el medio ambiente. Las partículas de ceniza, el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los productos de combustión incompleta, el monóxido de carbono (CO) y metales volátiles salen por la chimenea. Por lo tanto, en muchos países existen regulaciones ambientales las cuales requieren de que se instalen dispositivos de control de emisiones contaminantes en las centrales termoeléctricas [1]. La instalación y mantenimiento de estos dispositivos contribuye significativamente a los costos de la planta. Por otro lado,

los contaminantes que no son emitidos a la atmósfera terminan en forma de desechos sólidos los cuales requieren también de un manejo adecuado.

3.3 Descripción del ciclo de vapor avanzado

El ciclo ideal de Rankine –introducido en la sección 2.4,- modela el funcionamiento de las plantas de vapor. Sin embargo, en la búsqueda de una eficiencia mayor, se han desarrollado ciclos de vapor más complejos que son los que se ocupan prácticamente en todas las plantas termoeléctricas. Debido a que la eficiencia térmica del ciclo ideal de Rankine tiende a incrementarse conforme la temperatura promedio a la que se adiciona energía al ciclo por transferencia de calor aumenta y/o la temperatura promedio a la que el sistema cede energía disminuye, se han estudiado diversas formas en que esto puede llevarse a cabo en la práctica.

En primer lugar, nótese que al incrementarse la presión de la caldera, se incrementa la temperatura promedio a la que se transfiere el calor hacia el fluido de trabajo. Similarmente, al disminuir la presión del condensador, se disminuye la temperatura a la que se transfiere energía en el condensador. Por lo tanto, tanto aumentando la presión de la caldera como disminuyendo la presión del condensador, la eficiencia térmica del ciclo tiende a incrementarse.

Un incremento en la presión de la caldera o una reducción en la presión del condensador, sin embargo, puede resultar en una disminución porcentaje de vapor a la salida de la turbina. Si el porcentaje de vapor del fluido a través de la turbina es demasiado bajo, el impacto de las gotas de agua sobre las aspas puede desgastarlas, reduciendo la

eficiencia e incrementando la necesidad de mantenimiento. Por lo tanto, por lo general se busca mantener al menos 90% del porcentaje de vapor del fluido [15].

Con la finalidad de incrementar la temperatura promedio de transferencia de calor hacia el ciclo sin reducir el porcentaje de vapor a la salida de la turbina, una práctica casi universal en el diseño de centrales eléctricas es el sobrecalentado. En una sección de la caldera llamada sobrecalentador, se calienta el vapor saturado hasta un estado de vapor sobrecalentado. La temperatura promedio de adición de calor al ciclo es mayor para un ciclo con sobrecalentado que para uno sin éste, por lo que la eficiencia térmica es mayor. Por otro lado, la el porcentaje de vapor a la salida de la turbina es mayor en este caso también, lo cual presenta las ventajas mencionadas anteriormente.

La temperatura del vapor a la entrada de la turbina está acotada por limitaciones metalúrgicas impuestas por los materiales utilizados para fabricar el sobrecalentador y la turbina. Mejoras en los materiales y métodos de fabricación han permitido incrementos significativos en la temperatura máxima viable hasta el grado de que hoy en día se fabrican plantas que pueden operar a presiones del generador de vapor que exceden la presión crítica del agua (22.1 MPa) y temperaturas de entrada a la turbina que exceden los 600°C [15].

Otro método utilizado comúnmente para incrementar la eficiencia térmica de una planta térmica de vapor se conoce como regeneración o precalentado. Con la regeneración lo que se consigue es incrementar la temperatura del fluido de trabajo a la entrada de la caldera. De este modo, la temperatura promedio a la que se transfiere calor al agua de alimentación en la caldera es mayor. Consecuentemente, la eficiencia ideal del ciclo se aproxima un poco más a la eficiencia de Carnot.

La regeneración consiste en el paso del agua de alimentación procedente del condensador a través de una serie de intercambiadores de calor cuyas corrientes calientes son fracciones del flujo de vapor procedentes de sucesivas expansiones de la turbina. A esta serie de intercambiadores de calor se le conoce como tren de calentadores.

Existen dos tipos de intercambiador de calor que se utilizan. En un intercambiador de calor abierto, diversas corrientes a temperaturas distintas se mezclan para formar una corriente a una temperatura intermedia. En teoría, la corriente fría se bombea en algún punto anterior hasta la presión de la extracción procedente de la turbina, de modo que las presiones de todas las corrientes que se juntan en el intercambiador de calor abierto son iguales. Asimismo, las fracciones del flujo de vapor que se extrae de la turbina se seleccionan de modo que la corriente que sale del intercambiador de calor sea un líquido saturado a la presión de extracción.

En los intercambiadores de calor cerrados la temperatura del agua de alimentación se incrementa conforme el vapor extraído de la turbina se condensa en el exterior de los tubos por los que circula el agua de alimentación. Ya que las corrientes no se mezclan, éstas pueden encontrarse a diferentes presiones.

Prácticamente todas las plantas modernas poseen un tren de calentadores. El número de intercambiadores de calor del tren generalmente es mayor que uno. Esto es conveniente ya que entre mayor sea el número de intercambiadores de calor, menor es la diferencia de temperatura entre las corrientes caliente y fría. De este modo se reducen las

irreversibilidades debidas al intercambio de calor a través de una diferencia de temperatura finita [16].

En la figura 3.2 se muestra el esquema de una central con sobrecalentado y con tren de calentadores, mientras que en la figura 3.3 se muestra el diagrama T-s correspondiente.

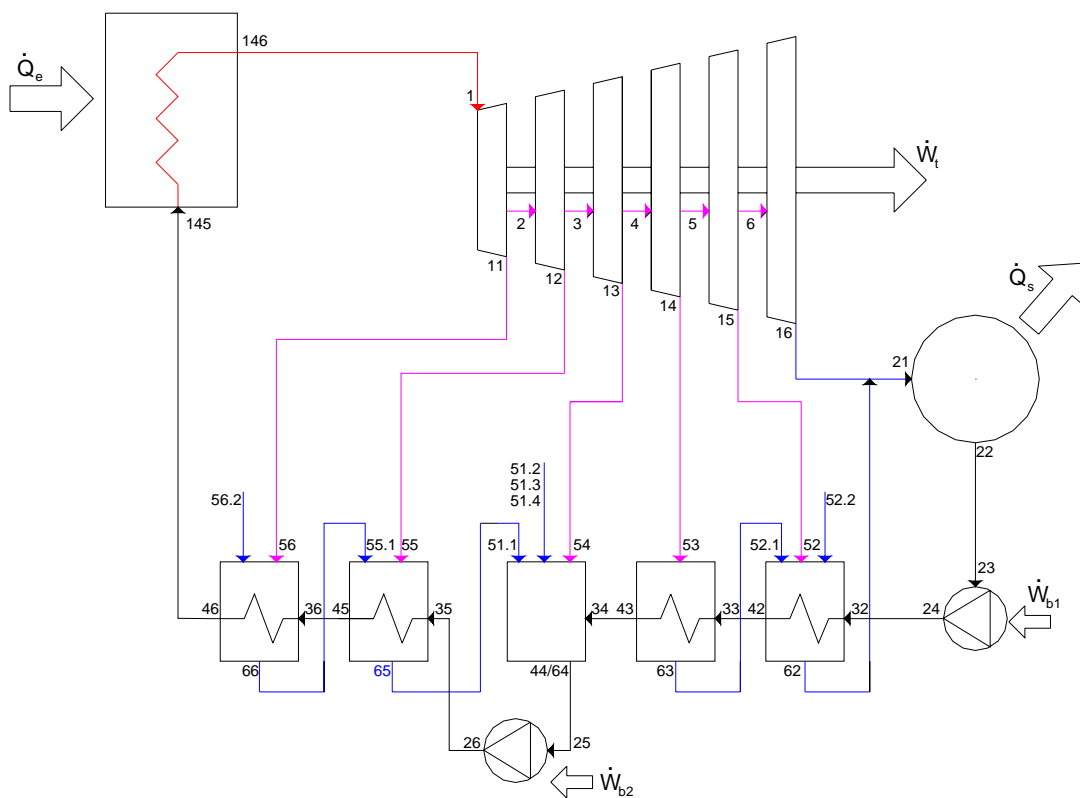


Figura 3.2. Diagrama esquemático de una central con sobrecalentado y regeneración.

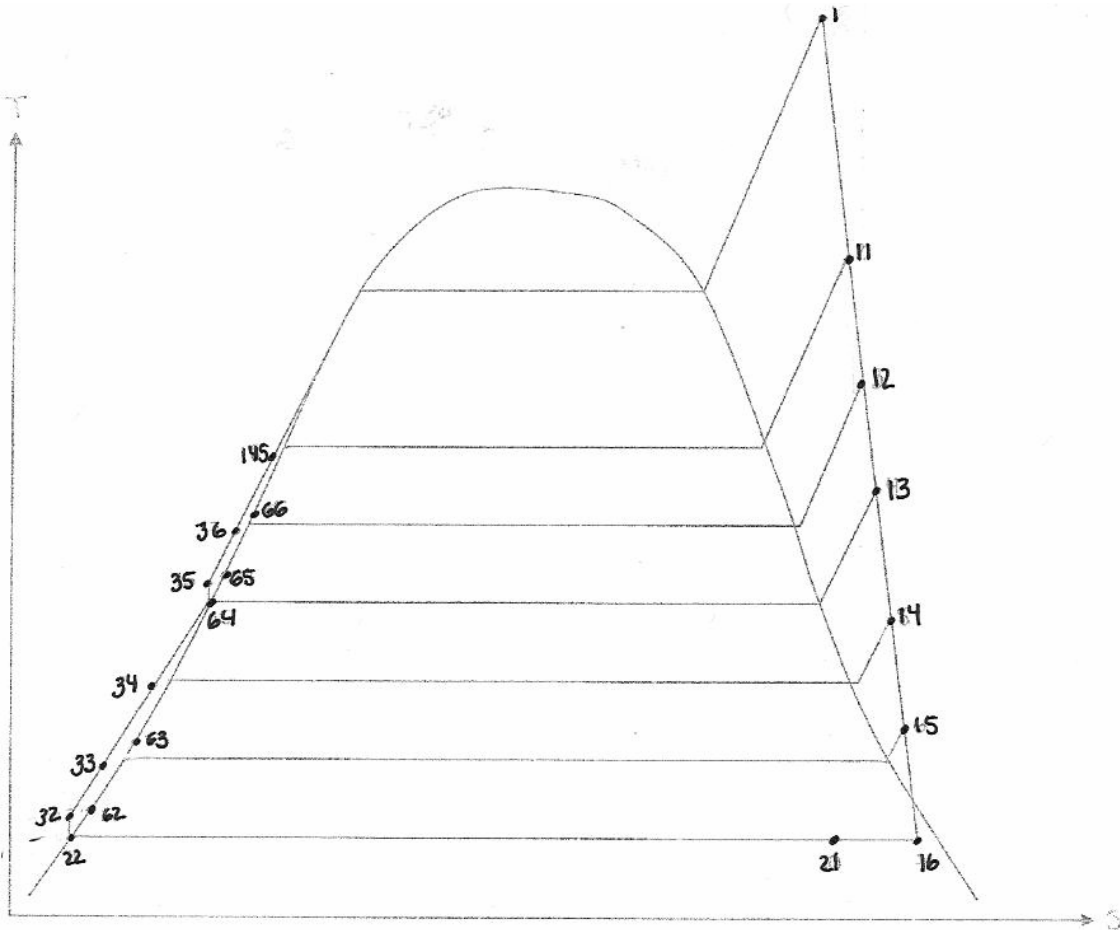


Figura 3.3. Diagrama de temperatura-entropía del ciclo de vapor de la central representada esquemáticamente en la figura 3.2.

3.4 Especificación de los volúmenes de control

Con el fin de aplicar el método de análisis exergético a un sistema, éste debe ser convenientemente dividido en volúmenes de control. En este estudio del ciclo de vapor de una central termoeléctrica, los volúmenes de control a estudiarse son los principales componentes del ciclo, a saber: los intercambiadores de calor de la caldera, cada

expansión de la turbina, el condensador, las bombas y los intercambiadores de calor del tren de calentadores.

La frontera del volumen de control puede ser tanto real como imaginaria. En el caso de que exista intercambio de calor entre el volumen de control y el ambiente, debe especificarse la temperatura de la frontera en las partes donde ocurre el intercambio de calor. Es decir, debe especificarse si el gradiente de temperaturas se encuentra dentro o fuera de esta, ya que en el primer caso, la destrucción de la exergía debida a una caída de la temperatura del fluido se considera una irreversibilidad interna al componente, mientras que en el segundo caso se considera una pérdida de exergía y por lo tanto una irreversibilidad externa.

3.5 El ambiente del sistema

La exergía es una propiedad inherente al sistema una vez que el ambiente ha sido especificado. A lo largo de este estudio, el ambiente del sistema se define por medio de los valores estándar de temperatura y presión ambiental de $T=25\text{ C}$ y $p=1\text{bar}$, respectivamente.

3.6 Idealizaciones

Los procesos que ocurren en una planta de vapor real son suficientemente complejos que se requiere de idealizaciones para desarrollar modelos termodinámicos útiles [10], [15]. Para llevar a cabo el análisis, en esta tesis se hacen las siguientes idealizaciones.

1. El estudio se restringe al caso en que la planta opera en estado estacionario. Por lo tanto quedan fuera los problemas de carácter dinámico.
2. Los efectos de la energía cinética y potencial de los flujos másicos de las corrientes que entran o salen del volumen de control se desprecian en este reporte, debido a que, en la mayoría de los procesos de conversión de energía, los cambios en estas formas de energía resultan insignificantes comparados con los cambios en la entalpía de los flujos másicos de las mismas corrientes [7]. Consecuentemente, los términos de exergía cinética y potencial se desprecian.
3. Se considera que todos los componentes de la planta operan adiabáticamente. El único intercambio de calor que ocurre entre el central y el ambiente es por medio de la torre de enfriamiento -o su equivalente- y de la chimenea.
4. La sustancia de trabajo es agua y para ésta no se considera la parte de potencial químico en el cálculo de la exergía.

3.7 Análisis con la Primera Ley

Haciendo un análisis con la Primera Ley se obtienen los valores del trabajo generado por la turbina, el calor suministrado a la caldera, el calor liberado al ambiente por medio del condensador y el trabajo utilizado por las bombas.

Las ecuaciones fundamentales utilizadas en el análisis energético son los balances de masa y de energía para volumen de control en estado estacionario, ecuaciones 2.28 y 2.29, respectivamente:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (3.1)$$

$$0 = \dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e \left(h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e \right) - \sum \dot{m}_s \left(h_s + \frac{1}{2} V_s^2 + g z_s \right) \quad (3.2)$$

Tomando en consideración las idealizaciones, las ecuaciones anteriores resultan en las resumidas en la tabla 3.1 para cada componente.

3.8 Análisis exerético

Por medio del análisis exerético se calcula la magnitud de la destrucción de exería en cada componente durante el proceso.

La ecuación utilizada para el análisis exerético es el balance de exería para volumen de control en estado estacionario, ecuación 2.44:

$$0 = \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j} \right) \dot{Q}_j - \dot{W}_{vc} + \sum \dot{m}_e e_e - \sum \dot{m}_s e_s - \dot{E}_d \quad (3.3)$$

y la exería de flujo específica viene dada por la ecuación 2.42:

$$e = (h - h_o) - T_o (s - s_o) \quad (3.4)$$

Tomando en consideración las idealizaciones, las ecuaciones anteriores resultan en las resumidas en la tabla 3.1 para cada componente.

3.9 Eficiencias exergéticas

El parámetro usado tradicionalmente para evaluar el funcionamiento termodinámico de un sistema es la eficiencia térmica, definida en términos generales como la proporción entre la energía en la forma final deseada y la energía suministrada al sistema.

En esta definición, las cantidades de energía se comparan sin hacer referencia a la calidad de ésta. Empleando el concepto de exergía, la calidad de la energía puede compararse.

Por otro lado, la eficiencia térmica es significativa sólo para procesos cíclicos y generalmente es inútil para procesos abiertos, mientras que la eficiencia exergética es igualmente útil tanto en procesos cíclicos como en procesos abiertos [7].

La eficiencia exergética se define en términos generales como como la proporción entre la exergía del producto y la exergía del recurso:

$$\varepsilon = \frac{\dot{E}_p}{\dot{E}_r} \quad (3.5)$$

La exergía del producto se refiere al resultado deseado producido por el sistema, mientras que la exergía del recurso se refiere precisamente a la exergía utilizada para generar el producto.

Es importante notar que la exergía del recurso no es necesariamente la suma de toda la exergía que entra al sistema ni la exergía del producto es la suma de toda la exergía que sale, como fue originalmente propuesto por Grassmann [17], ya que considerarlo así puede llevar a conclusiones erróneas [4]. Por ejemplo, para el caso de la bomba, la identificación de la exergía del producto como la exergía de salida y la del recurso como la exergía total de entrada podría llevar a la conclusión errónea de que, para la misma eficiencia isentrópica, la eficiencia exergética sería muy distinta al bombear agua que al bombear gasolina [7], ya que no se cancelaría el término de la exergía química.

Por lo tanto, la definición de la eficiencia exergética es un asunto que requiere de cuidado ya que puede variar para cada planta particular –y cada componente,- dependiendo del sentido de instalarla y operarla.

Para la planta prototípica estudiada en este trabajo se define una eficiencia exergética para el sistema y para cada componente como se expone a continuación.

La exergía del producto generado por la planta en su conjunto es la potencia producida; la exergía del recurso es la exergía del combustible. Ya que tanto el combustible de entrada como el trabajo de salida ambos son formas de energía de alta calidad, las eficiencias térmica y exergética de una planta termoeléctrica con un ciclo de vapor resultan ser ambas similares en magnitud, generalmente de alrededor de un 35%.

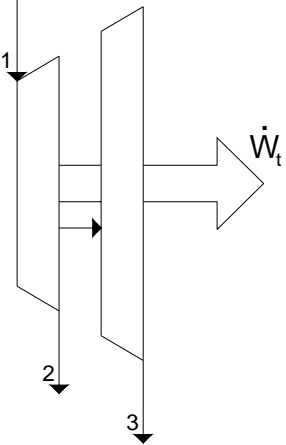
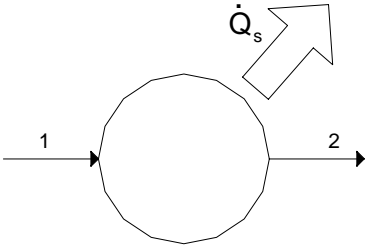
Para una turbina operando en estado estacionario y adiabáticamente, se considera la exergía del producto a la potencia generada -ya que ésta es la finalidad de operar el sistema,- y la exergía del recurso a la reducción de la exergía del vapor entre la entrada y la salida de la turbina.

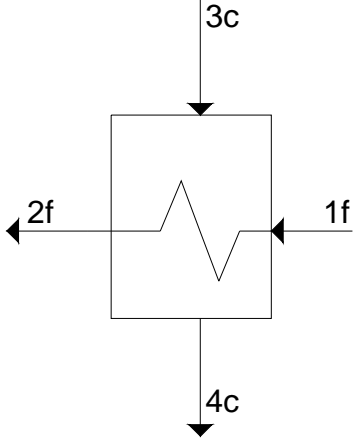
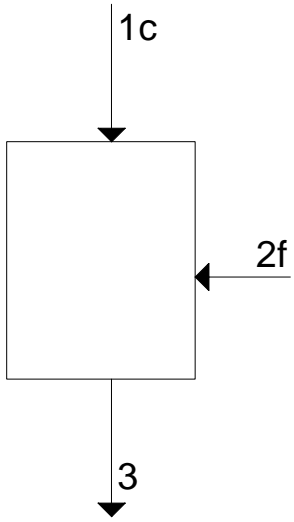
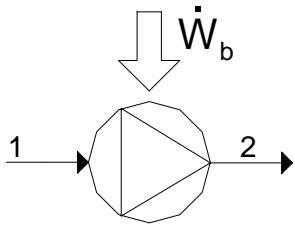
En el caso del condensador cuya finalidad sea disipar el calor al ambiente, no existe un producto en términos de exergía. Por lo tanto, la eficiencia energética tiene un valor nulo.

En el caso de intercambiadores de calor cuya finalidad es aumentar la exergía de la corriente fría a costa de una reducción en la exergía de la corriente caliente, la exergía del producto es precisamente el aumento en la exergía de la corriente fría y la exergía del recurso es la reducción en la exergía de la corriente caliente.

Para las bombas, la exergía del producto se considera que es el aumento en la exergía del fluido entre la entrada y la salida de la bomba; la exergía del recurso es la potencia que se suministra.

La función de la caldera es aumentar la exergía del fluido de trabajo; por lo tanto, este aumento en la exergía de la corriente se considera la exergía del producto. Por otro lado, la suma de las exergías del combustible y del aire precalentado utilizado para la combustión es la exergía del recurso.

Componente	Diagrama	Balances de masa, energía y exergía	Eficiencia exergética
Turbina con dos extracciones		$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$ $\dot{W} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_3 h_3$ $\dot{E}_d = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 - \dot{E}_3 - \dot{W}$	$\varepsilon = \frac{\dot{W}}{\dot{E}_1 - \dot{E}_2 - \dot{E}_3}$
Condensador		$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ $\dot{Q} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_2 h_2$ $\dot{E}_d = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 - \left(1 - \frac{T_o}{T_b}\right) \dot{Q}$	$\varepsilon = 0$

Intercambiador de calor cerrado		$\dot{E}_d = \dot{E}_{1f} + \dot{E}_{3c} - \dot{E}_{2f} - \dot{E}_{4c}$	$\varepsilon = \frac{\dot{E}_{2f} - \dot{E}_{1f}}{\dot{E}_{3c} - \dot{E}_{4c}}$
Intercambiador de calor abierto		$\dot{E}_d = \dot{E}_{1c} + \dot{E}_{2f} - \dot{E}_3$	$\varepsilon = \frac{\dot{m}_{2f}(e_3 - e_2)}{\dot{m}_{1c}(e_1 - e_3)}$
Bomba		$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ $\dot{W} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1$ $\dot{E}_d = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 + \dot{W}$	$\varepsilon = \frac{\dot{E}_2 - \dot{E}_1}{\dot{W}}$

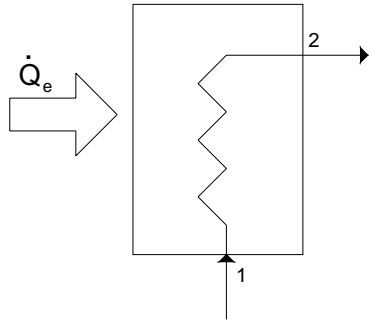
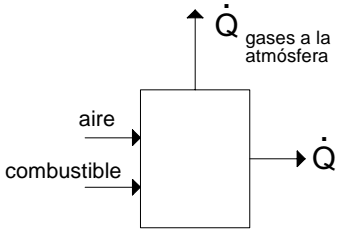
I.C. caldera		$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ $\dot{Q} = \dot{m}_2 h_2 - \dot{m}_1 h_1$ $\dot{E}_d = \dot{E}_1 - \dot{E}_2 + \sum_j \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) \dot{Q}_j$	$\varepsilon = \frac{\dot{E}_2 - \dot{E}_1}{\dot{E}_Q}$
Combustión		$\dot{E}_d = \dot{E}_{comb} + \dot{E}_{aire} - \left(1 - \frac{T_o}{T_c}\right) \dot{Q}$ $- \left(1 - \frac{T_o}{T_{gas.atm.}}\right) \dot{Q}_{gas.atm.}$	$\varepsilon = \frac{\dot{E}_{Q_c}}{\dot{E}_{comb} + \dot{E}_{aire}}$

Tabla 3.1. Balances de materia, energía y exergía y eficiencias energéticas de los principales componentes de una central termoeléctrica.

Considerando por separado el proceso de combustión del proceso de intercambio de calor en la caldera, para el primero se tiene la suma de las exergías del combustible y del aire precalentado como la exergía del recurso y la exergía de los gases de combustión como la exergía del producto, mientras que para el segundo se tienen estos gases como el recurso y el aumento en la exergía del fluido de trabajo como el producto.

Las eficiencias exergéticas para cada componente de la planta prototípica estudiada en este trabajo se resumen en la tabla 3.1.

3.10 Otros parámetros de evaluación

La eficiencia exergética es un parámetro útil para comparar el funcionamiento de componentes similares dentro de un mismo sistema o de sistemas diferentes. Sin embargo, en el caso en que no sea apropiado utilizar una eficiencia exergética para evaluar el funcionamiento de cierto componente (como en el caso del condensador), pueden utilizarse los radios de destrucción de exergía [18].

El radio de destrucción de exergía se define como la proporción entre la destrucción de exergía en el componente j y la exergía suministrada al sistema en su totalidad [4]:

$$\gamma_{E_d} = \frac{\dot{E}_{d_j}}{\dot{E}_S}$$

Alternativamente, la destrucción de la exergía en el componente j puede compararse con la destrucción de la exergía en todo el sistema [4]:

$$\nu_{E_d} = \frac{\dot{E}_{d_j}}{\dot{E}_{d_S}}$$

3.11 Presentación de resultados

A fin de facilitar una buena interpretación de los resultados de un análisis exergético, resulta conveniente mostrarlos claramente en tablas y diagramas. En las tablas se muestran los valores de las propiedades relevantes de cada corriente, se especifican los

valores tanto de la exergía del recurso como del producto, la pérdida y la destrucción de exergía y las eficiencias exergéticas de los principales componentes. Los diagramas permiten un mayor entendimiento de los flujos de exergía a través del proceso y suelen ser de dos tipos: de Grassmann y de pai. Un diagrama de Grassmann muestra claramente los flujos de exergía a través del sistema así como la magnitud de la destrucción y de la pérdida de exergía en cada componente. Un diagrama de pai muestra la fracción de destrucción de exergía de cada componente respecto a la destrucción total de exergía en el sistema o a la exergía total de entrada al ciclo.