

El Análisis Termodinámico en la Optimización de Procesos Industriales

Marcos Luján P.

*Departamento de Ingeniería Industrial,
Universidad Católica Boliviana, Regional Cochabamba.
E-mail: lujan@ucbcbba.edu.bo.*

Resumen

El desafío que representa para el hombre la protección del medio ambiente incumbe a prácticamente todas las profesiones, en particular a aquellos profesionales que trabajan en la industria. Ahora, es importante considerar en la eficiencia de los procesos factores que antes no se consideraban muy importantes como la contaminación ambiental, mayor eficiencia en el uso de los recursos energéticos, reducción de la producción de desechos, etc. En el presente artículo se muestra por qué el análisis de exergía puede ser utilizado como un criterio de eficiencia absoluto que tomaría en cuenta todos los aspectos necesarios para un proceso productivo sostenible. También se muestra que en muchos casos no es necesario realizar cálculos complicados para encontrar soluciones óptimas en base al análisis de exergía.

Palabras Clave: análisis de exergía, optimización de procesos, segunda ley

1. Introducción

La optimización de los procesos industriales ha sido siempre una actividad central para los ingenieros en la industria. Los criterios que se aplican están destinados en lo esencial en aumentar la productividad y por ende hacer que la industria sea más rentable, muchos estudios se dedican a alcanzar este objetivo. Esta filosofía está cambiando ya que las industrias tienen cada vez mayor conciencia de que están inmersas en un medio tanto social como ambiental de cuyo bienestar dependen. Por lo tanto tienen que reconsiderar los criterios de eficiencia a los que estaban acostumbradas si desean mantener su competitividad en esta era de globalización.

En la actualidad la sociedad en general está cada vez más consciente de la necesidad de conciliar la protección del medio ambiente con un sistema de producción de bienes y servicios que nos permita mejorar el nivel de vida de la población de una manera sostenible. No tendría sentido tener acceso a muchos bienes y servicios si perdemos lo esencial que es un medio ambiente sano en el que podamos disfrutar de ese bienestar. Esto ha llevado a los gobiernos a

dictar leyes y reglamentos con el objetivo de proteger el medio ambiente y estas leyes en general tienden a obligar a las industrias a mejorar la eficiencia de sus procesos productivos y reducir la contaminación. En principio, estas leyes y reglamentaciones deberían estar en acuerdo con los objetivos de las empresas que también desean mejorar sus procesos productivos y reducir la contaminación, lo que en general redundaría en mayores beneficios para la sociedad; sin embargo, en muchos casos se produce un conflicto de intereses entre las industrias y el gobierno o las organizaciones que desean hacer cumplir estas reglamentaciones. La razón fundamental de esta falta de acuerdo entre las reglamentaciones ambientales se debe a que los criterios de análisis de los procesos productivos y la contaminación ambiental no tienen una base científica sólida. Existe por lo tanto la necesidad de definir un criterio de eficiencia fundamental y global que tome en cuenta no sólo criterios económicos o de productividad, sino también criterios de protección ambiental; esto es lo que se ha venido denominando en los últimos tiempos como **coeficiencia**. Este criterio de eficiencia fundamental puede ser desarrollado a partir de los principios básicos de la termodinámica. Se trata de la combinación de la primera y segunda ley de la termodinámica para hacer un análisis de la eficiencia de un proceso, con un concepto de eficiencia que sea fundamental y aplicable a absolutamente cualquier proceso que no necesariamente tiene que ser un proceso industrial. En lo que sigue explicaremos el porqué y cómo se pueden aplicar estos conceptos.

2. Las leyes de la termodinámica

2.1. Primera ley

La primera ley de la termodinámica en general no ofrece mayor dificultad para su entendimiento y es uno de los principios fundamentales de la ciencias. Para el propósito del presente trabajo tomaremos el siguiente enunciado.

“La energía de un sistema aislado es constante”

Esta definición implica que la energía no se destruye ni se pierde, sólo se transforma. El universo puede ser considerado como un sistema aislado, por lo tanto la energía del mismo se mantiene constante y es la misma ahora como al principio del mismo. Si esto es cierto, entonces por qué parece ser que la energía desaparece, se consume? La humanidad dedica enormes cantidades de dinero y recursos en la construcción de centrales nucleares, plantas termoeléctricas, hidroeléctricas para producir energía que luego es utilizada para realizar una serie de actividades productivas, de transporte y de servicios. Parece ser una contradicción que tengamos que producir cada vez más algo que de acuerdo a la primera ley no se destruye. ¿Qué pasa entonces con lo que llamamos energía?. ¿Qué es lo que en realidad se consume y tenemos que producir permanentemente?. La respuesta a estas preguntas se encuentra en la segunda ley de la termodinámica.

2.2. Segunda ley de la termodinámica

Si bien la energía no se pierde, como lo indica la primera ley, ésta se degrada. No toda la energía de un sistema puede ser manipulada a antojo, una parte de ella no puede ser utilizada por el hombre. La energía disponible en un sistema es aquella parte que puede ser utilizada y manipulada con total libertad, es aquella energía con la que podemos realizar un **trabajo**. La energía disponible de un sistema depende del estado del sistema y de sus alrededores. La variable termodinámica que determina la fracción de energía utilizable de un sistema es la entropía.

El concepto de entropía no es fácil de definir de manera simple, sin embargo se puede asociar un mayor grado de "desorden" de un sistema a una entropía mayor. Para una definición más detallada y rigurosa se puede consultar libros básicos de termodinámica [1, 2].

El cambio de entropía para un sistema cerrado se define mediante la siguiente ecuación:

$$dS = \frac{dQ_{rev}}{T} \quad (\text{Ec. 1})$$

En esta ecuación el subíndice *rev* indica que el proceso tiene que ser reversible. La entropía es una variable de estado, es decir depende únicamente de las condiciones en que se encuentra un sistema. La segunda ley de la termodinámica puede enunciarse de muchas maneras; para nuestros propósitos un enunciado apropiado es el siguiente: "La entropía de un sistema aislado tiende a un máximo". Ahora podemos enunciar la segunda ley de la termodinámica en forma de una ecuación que es muy significativa y entraña la esencia de lo que será el análisis termodinámico.

$$dS_{univ} \geq 0 \quad (\text{Ec. 2})$$

El significado de la segunda ley es de importancia central. El universo puede considerarse como un sistema aislado, por lo tanto todos los fenómenos naturales que se producen en él tienen como consecuencia un aumento de entropía del mismo. Por lo tanto el valor de entropía del universo está en continuo aumento y es imposible que disminuya. Algún día, la entropía del universo no podrá aumentar más, habrá llegado a su valor máximo; en ese momento, ya no será posible ningún fenómeno natural el universo habrá llegado a un "punto muerto" en el que ya nada sucede. Esto incluye la vida pues el fenómeno de la vida está basado en transferencias espontáneas de energía de un sistema a otro, sin estas transferencias de energía la vida no sería posible. Esto implica que la entropía no sólo representa el estado de degradación de la energía sino también el estado de degradación de un sistema, cualquier sistema, el planeta tierra puede ser uno de ellos.

La ec. 2 incluye el símbolo de la igualdad y es muy importante también entender el significado de este signo. Implica que podrían existir procesos en los cuales, el universo no sufre un aumento de entropía. Esta situación no es posible en la realidad pero el concepto de un tal

proceso existe y es un proceso llamado "reversible". Además de no provocar ningún aumento en la entropía del universo, los procesos reversibles son también los más eficientes desde el punto de vista del trabajo necesario para realizarlos, por lo tanto un proceso reversible se constituye en la referencia de un proceso eficiente, el ideal a alcanzar en cualquier proceso para alcanzar la eficiencia máxima. Este criterio por su generalidad puede utilizarse como criterio base para la optimización de procesos desde todo punto de vista, uso de energía, materia prima, recursos humanos y sobre todo desde el punto de vista de protección del medio ambiente.

La entropía tal cual la hemos presentado, no se puede aplicar de forma práctica como criterio de eficiencia. Se necesita elaborar más estas ideas para que tengamos instrumentos teóricos y un lenguaje matemático apropiado para aplicar este concepto a un proceso de fabricación real. Esta tarea ha sido desarrollada en alguna medida por algunos científicos a principios de siglo, pero limitándose a procesos muy específicos como el de las centrales termoeléctricas.

3. El concepto de exergía

La primera ley muestra claramente que la energía no se destruye y la segunda ley nos dice que la energía se degrada pero, qué significa degradar la energía contenida en un sistema?. Básicamente esto significa disminuir la cantidad de energía contenida en un sistema que puede efectivamente transformarse en trabajo. Esta cantidad se denominó *disponibilidad*[3] en los textos de principios de siglo, pero con el desarrollo del análisis termodinámico fue rebautizado con el nombre de *exergía* por Rant en 1953[4]. En esta definición es importante diferenciar con claridad lo que llamamos trabajo de lo que llamamos energía, nos referimos con el término de trabajo a energía que podemos manipular a nuestro antojo, es decir es energía que la podemos utilizar y transferir a cualquier sistema cualquiera que sea el estado de éste para lograr una transformación del mismo. Esta diferenciación es muy importante y no siempre está clara en la literatura. Resumiendo estos conceptos podemos decir que exergía es la cantidad de trabajo disponible en un sistema que se encuentra en un entorno definido.

La exergía disponible durante la transformación de un sistema simple, depende del estado en que se encuentra el sistema en sí y del estado del entorno en el que se encuentra, en concreto de la temperatura (T_o) y la presión (P_o) del entorno y del cambio de estado que sufre el sistema. En los procesos industriales, lo usual es que tengamos sustancias que sufren transformaciones en sistemas estacionarios abiertos, en estos casos, la exergía específica está dada por[3]

$$e_i = h_i - h_o - T_o (s_i - s_o), \quad (\text{Ec. 3})$$

donde h_i y s_i corresponden a la entalpía y entropía específicas del sistema, h_o y s_o a la entalpía y entropía específicas del sistema en equilibrio termodinámico con el entorno. Durante un proceso de transformación la exergía de un sistema cambia debido a que la misma es transferida

a otro sistema o recibe exergía de su entorno. Estos flujos de exergía se realizan en forma de trabajo transferido o de exergía transferida asociada a un proceso de transmisión de energía en forma de calor.

La transferencia de exergía (E) asociada a un proceso de transmisión de calor está dada por la siguiente relación:

$$dE = \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) dQ ; \quad \dot{E} = \int \left(1 - \frac{T_o}{T}\right) \dot{Q} dA, \quad (\text{Ec. 4})$$

donde T es la temperatura del sistema en cuestión, T_o la temperatura del entorno y dA representa un diferencial de área a través del cual se produce la transferencia de calor. Si la temperatura de la fuente de calor se mantiene constante, que es a menudo el caso, esta relación se simplifica a:

$$\dot{E} = \dot{Q}_A \left(1 - \frac{T_o}{T}\right); \quad (\text{Ec. 5})$$

donde, $\dot{Q}_A = \int \dot{Q} dA$, es el calor transferido a través del área en cuestión.

En cuanto a las transferencias de exergía asociadas a transferencias de trabajo éstas representan transferencia de exergía pura hacia o desde el sistema en cuestión, porque trabajo y exergía son cantidades equivalentes.

Es durante esos procesos de transferencia de exergía de un sistema a otro que se producen pérdidas de exergía. Estas pérdidas son inevitables ya que, de acuerdo a la segunda ley de la termodinámica, es imposible lograr una transferencia de exergía de un sistema a otro con una eficiencia del 100%; a menos que el proceso sea reversible, lo que implicaría un proceso infinitamente lento. La ineficiencia de un proceso está asociada con la exergía perdida en el mismo, como lo veremos más adelante. Por lo tanto es de mucha utilidad realizar balances de exergía en los procesos para identificar aquellos que son ineficientes y buscar modificarlos o inventar nuevos procesos para reducir las pérdidas de exergía.

4. Balance de exergía en un proceso abierto estacionario.

En un proceso cualquiera, en el que un sistema dado se comporta como un sistema abierto en estado estacionario, se puede establecer un balance de exergía considerando: los flujos de sustancia que ingresan y salen del sistema, los intercambios de calor y de trabajo del sistema con los alrededores. Por ejemplo en un caldero se tomará en cuenta el flujo de combustible y comburente que ingresa al sistema, el agua que ingresa y sale del caldero, las pérdidas por los humos que salen por la chimenea y las pérdidas de calor hacia el entorno. Al ser la exergía una

característica del estado del sistema, el balance se establece tomando en cuenta todo el flujo de exergía hacia el sistema en todas sus formas y todo el flujo desde el sistema.

$$\dot{E}_d = \sum_i \dot{E}_{i,in} - \sum_j \dot{E}_{j,out} \quad (\text{Ec. 6})$$

en esta ecuación, $\dot{E}_{i,in}$ y $\dot{E}_{j,out}$, representan los flujos de exergía a la entrada y a la salida del sistema, asociados tanto al flujo de materia como a las transferencias de calor y de trabajo. El flujo de exergía asociado a una sustancia i determinada está dado por la siguiente ecuación.

$$\dot{E}_i = m_i e_i, \quad (\text{Ec. 7})$$

donde m_i es el flujo de masa de la sustancia i y e_i es el valor de exergía específica de la sustancia i . El flujo de exergía debido a una transferencia de calor se calcula mediante la ecuación 5 y los intercambios de trabajo se consideran directamente como exergía pura.

El valor de \dot{E}_d representa la cantidad de exergía destruida en el proceso. Esta destrucción de exergía se produce debido a todas las irreversibilidades presentes en el proceso: fricción en las piezas mecánicas, disipación en superficies que rozan, cambios de presión, reacciones químicas, difusión y mezcla de sustancias, transferencias de calor entre sistemas con diferencia de temperatura, etc. [5]. Por esta razón la destrucción de exergía en un proceso se denomina también *irreversibilidad* (\dot{I}).

La *irreversibilidad* de un proceso está asociada con el aumento de entropía del universo por una ecuación muy simple y significativa que fue demostrada por primera vez por Gouy y Stodola a finales del siglo pasado[6]. La ecuación es la siguiente:

$$\dot{I} = \dot{E}_d = T_o \dot{S}_{univ} \quad (\text{Ec. 8})$$

donde \dot{S}_{univ} , es el cambio de entropía del universo por unidad de tiempo y T_o es la temperatura del entorno. Esta ecuación muestra que la irreversibilidad de un proceso está directamente relacionada con el aumento de entropía del universo. Es decir, una irreversibilidad elevada implica un aumento elevado de la entropía del universo o del sistema aislado en el que se encuentra el proceso en cuestión. Un proceso con una irreversibilidad elevada, es un proceso que está lejos de ser un proceso reversible que es el referente de eficiencia por lo tanto la irreversibilidad elevada o un aumento elevado de entropía del universo es el indicativo de un proceso ineficiente en el que se pueden introducir mejoras modificando el proceso o diseñando uno nuevo. Además, al estar las irreversibilidades asociadas con un aumento de entropía del universo, un tal sistema contribuirá en mayor medida al deterioro del entorno que al fin de cuentas es el medio ambiente en el que se realiza el proceso. Es importante subrayar esta última

idea ya que en la mayoría de la literatura sobre el tema no se da suficiente importancia a la implicancia ambiental de este concepto.

Por lo tanto podemos utilizar la irreversibilidad de un proceso como criterio para analizar la eficiencia del mismo desde una perspectiva integral, es decir que tendríamos un criterio que no se basa en criterios aislados como serían criterios económicos o de productividad sino que integra conceptos científicos para elaborar un criterio de eficiencia absoluto que toma en cuenta aspectos que tradicionalmente no se consideran, como el impacto ambiental; aunque tal vez de una manera muy teórica. Sin embargo, es posible, mediante la elaboración de algunas herramientas suplementarias, la aplicación de este concepto al diseño de procesos de fabricación mas eficientes. La meta fundamental de la optimización según este criterio es entonces la de reducir la *irreversibilidad* de un proceso o lo que es lo mismo reducir la pérdida de exergía en el mismo. Este criterio no depende de variables económicas ni coyunturales, es por lo tanto un criterio fundamental que nos indica claramente la manera ideal de realizar un proceso. Las limitaciones que tengamos para alcanzar éste ideal dependerán de factores como: costo de inversión, tiempo, disponibilidad de tecnología, recursos humanos, etc. El uso de la exergía como instrumento de análisis para determinar la eficiencia de procesos ha sido propuesta por la *International Federation of Institutes for Advanced Study* en 1974 [7]. La utilidad de esta metodología ha sido demostrada en cada ocasión en que ha sido aplicada, revelándose muy superior a otras metodologías[8]. La principal dificultad en la aplicación del análisis de exergía a la optimización de procesos es que en muchos casos es difícil calcular la disponibilidad de algunos sistemas, por ejemplo cuál es la disponibilidad de caña de azúcar que ingresa en un ingenio? o de botellas de refresco que salen de una embotelladora?. Estas cantidades son necesarias si queremos aplicar la ecuación 6 para el cálculo de las irreversibilidades de un proceso

5. Aplicación del análisis de exergía

Una de las principales dificultades para la aplicación de esta metodología es la definición de coeficientes de eficiencia, existen muchas maneras de definir estos coeficientes y todas ellas tienen ventajas y desventajas relativas. En el caso del análisis de exergía se han definido tres tipos de coeficientes de eficiencia [9].

5.1. Eficiencia simple

Es la relación entre el flujo de exergía total que sale de un sistema y la exergía total que entra en el sistema.

$$\eta = \frac{\dot{E}_{out}}{\dot{E}_{in}} \quad (\text{Ec. 9})$$

Este coeficiente no presenta ninguna ambigüedad, por lo tanto es aplicable a todo tipo de proceso. Sin embargo, en algunos casos la sensibilidad de este coeficiente no es suficiente

para dilucidar algunos sistemas, sobre todo aquellos en los que la diferencia entre la exergía a la entrada no difiere mucho de la exergía de salida o ambas son elevadas. El proceso puede aparecer eficiente pero eso no significa que no existan irreversibilidades significativas dentro del proceso.

5.2. Eficiencia racional (*rational efficiency*)

Se lo define como la relación entre el flujo de exergía deseado o requerido a la salida y el flujo de exergía utilizado para este propósito.

$$\varphi = \frac{\dot{E}_{\text{req. de salida}}}{\dot{E}_{\text{utilizado}}} \quad (\text{Ec. 10})$$

En este coeficiente existe cierta ambigüedad sobre el valor del flujo de exergía requerido a la salida ($\dot{E}_{\text{req. de salida}}$) ya que depende del proceso y del producto que se desea obtener. El valor del flujo de exergía utilizado está dado por:

$$\dot{E}_{\text{utilizado}} = \dot{E}_{\text{req. de salida}} + I \quad (\text{Ec.11})$$

También tiene la desventaja de que no se puede aplicar a procesos en que toda la exergía utilizada sea destruida en el proceso. Sin embargo encuentra aplicaciones interesantes en procesos en los que el grado de transformación de las sustancias no es muy importante.

5.3. Eficiencia con exergía transeúnte.

Cuando se utiliza la eficiencia simple, le coeficiente de eficiencia es aparentemente elevado y esto se debe a que una buena parte de la exergía que ingresa en el sistema ni siquiera interviene en el proceso y no tiene ningún riesgo de ser perdida en el proceso. Es el caso por ejemplo, del solvente en que se desarrolla una reacción. Para poner en evidencia este fenómeno se define lo que es la exergía transeúnte que se mantiene constante a lo largo del proceso. Con esta definición la eficiencia con exergía transeúnte está dada por:

$$\eta_e = \frac{\dot{E}_{out} - \dot{E}_{tr}}{\dot{E}_{in} - \dot{E}_{tr}} \quad (\text{Ec. 12})$$

La eficiencia con energía transeúnte refleja con mayor énfasis pérdidas de exergía durante el proceso, por lo tanto refleja mejor la eficiencia del mismo. Existen sin embargo algunas dificultades en el cálculo de la exergía transeúnte (\dot{E}_{tr}) ya que para esto sería necesario definir un valor absoluto para la entalpía de los sistemas y éste es un tema que está lejos de estar resuelto satisfactoriamente para la gran diversidad de sistemas utilizados en los procesos industriales.

5.4. Otra opción para la aplicación del análisis de exergía

Dada la dificultad que existe en la aplicación de los coeficientes mencionados en los puntos anteriores, es necesario explorar nuevas opciones para la aplicación del análisis de exergía. Una manera de simplificar la aplicación de este método y de hacerla más accesible a la variedad de sistemas que se pueden estudiar es concentrarse en las transferencias de exergía que se dan en los procesos. La mayor parte de las pérdidas de exergía que se producen se deben a pérdidas de exergía en los procesos en que se produce una transferencia de exergía de un sistema a otro. En estos casos el cálculo de la exergía transferida (E_{trf}) y la exergía efectivamente recibida (E_{rec}) es simple para la mayoría de los casos, la diferencia entre estas cantidades constituye la exergía perdida, es decir la irreversibilidad del proceso. De esta manera se puede calcular la eficiencia de un coeficiente de eficiencia de transferencia de exergía con la siguiente ecuación:

$$\eta_{trf} = 1 - \frac{\dot{I}}{\dot{E}_{trf}} \quad (\text{Ec. 13})$$

$$\dot{E}_{trf} = \dot{E}_{rec} + \dot{I} \quad (\text{Ec. 14})$$

De esta manera podemos calcular un coeficiente de eficiencia global de un proceso, basado en el total de transferencias de exergía que se dan en un proceso de producción y también calcular el cambio total de entropía del universo con las siguientes ecuaciones:

$$\eta_{trf} = 1 - \frac{\sum \dot{I}_i}{\sum \dot{E}_{trf,i}} \quad (\text{Ec. 15})$$

$$\dot{S}_{univ} = \frac{1}{T_o} \sum \dot{I}_i \quad (\text{Ec. 16})$$

Definido de esta manera, este coeficiente tiene la ventaja de que es mucho más fácil de calcular e identifica con más claridad los procesos que son ineficientes; también permite intuir con mayor facilidad los cambios que se pueden hacer para lograr una mayor eficiencia en los procesos. En el siguiente subtítulo se ilustrará la aplicación de este tipo de coeficientes de eficiencia

6. Aplicaciones

El análisis termodinámico ha sido utilizado desde principios de siglo para la optimización de plantas termoeléctricas, sin embargo no se ha desarrollado mucho su aplicación a otros campos en la industria y otras actividades en las que se consume energía (deberíamos decir exergía). La razón para esta falta de interés en esta metodología se debe en particular a las dificultades que presenta su aplicación. El concepto de exergía no es muy difundido entre los

técnicos e ingenieros que trabajan en la industria que por tradición concentran sus análisis a simples balances de energía que conceptualmente son más simples de manejar y además existen vacíos en el desarrollo teórico del análisis de exergía que dificultan su aplicación. La falta de datos tabulados de variables termodinámicas para poder calcular el contenido exergético de ciertos fluidos compuestos por mezclas de sustancias y otros casos especiales es uno de los más importantes. Sin embargo la opción propuesta en el párrafo 5.4 para la determinación de la eficiencia de un proceso puede facilitar la aplicación del análisis de exergía ya que se requiere de muy poca información sobre las sustancias intervinientes en un proceso para realizar los cálculos necesarios.

El concentrar el análisis sobre la eficiencia de los procesos en la *transferencia* de exergía permite facilitar no sólo el análisis cuantitativo si no que también permite aplicar algunas herramientas gráficas para un análisis cualitativo muy simple y rápido de la eficiencia de los procesos. Para ilustrar la utilidad de esta metodología y sus ventajas en relación a un análisis de balances de energía, citaremos algunos ejemplos.

6.1. Eficiencia de intercambiadores de calor

Comparar la eficiencia de intercambiadores de calor co-corriente y contracorriente es uno de los ejemplos más ilustrativos de la importancia del análisis de exergía. Tomando las ecuaciones 4 y 5 podemos representar gráficamente las transferencias de exergía entre un fluido caliente y un fluido frío en intercambiadores co-corriente y contra corriente como lo muestra la figura 1.

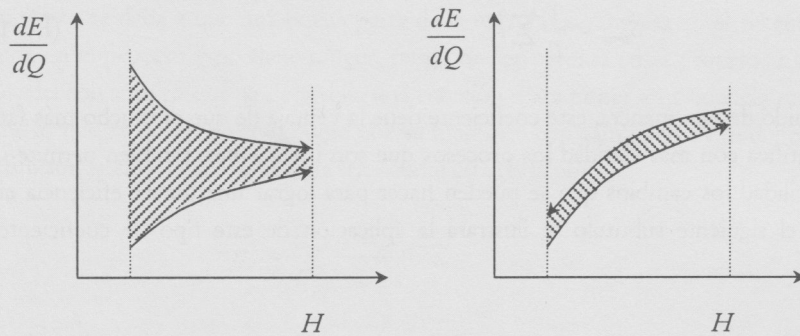


Figura 1. Análisis de exergía de intercambiadores de calor en co-corriente y en contracorriente. El área achurada representa la pérdida del exergía en el proceso.

En las gráficas de dE/dQ versus H , la cantidad de exergía perdida o ganada por cada fluido es proporcional al área bajo la curva que representa la transformación de cada fluido. El área achurada en cada gráfica representa la pérdida de exergía en cada caso. De acuerdo a la

segunda ley para que se produzca una transferencia de exergía esta debe realizarse desde una sistema con un estado exergético mayor hacia un sistema en un estado exergético menor, por lo tanto la curva del fluido caliente tiene que estar en todo momento por encima de la curva del fluido frío; es evidente que en el caso de un intercambiador de calor en co-corriente la pérdida de exergía será siempre mayor que en el caso de un intercambiador en contra corriente. También se puede ver que un intercambiador en contracorriente será más eficiente cuanto menor sea la diferencia de temperatura entre el fluido caliente y el fluido frío en el punto en que se realiza la transferencia de calor. Esto nos lleva a una conclusión importante: habrá mayor pérdida de exergía en un proceso de transferencia de calor cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre los cuerpos que realizan esa transferencia de calor. Por otra parte si reducimos la temperatura entre el fluido caliente y el fluido frío en el punto de transferencia, la velocidad de transferencia del flujo de calor será menor por lo que sería necesario construir intercambiadores más grandes para lograr una mayor eficiencia. Este tipo de conclusiones prácticas ayudan mucho en el análisis cualitativo de los procesos.

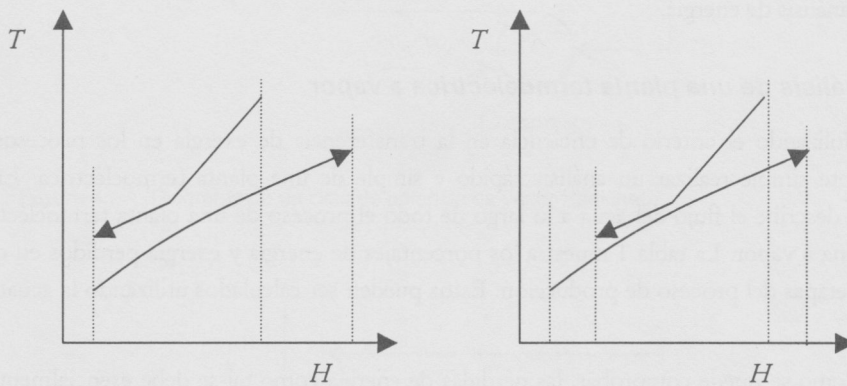


Figura 2. Disposiciones posibles para recuperar calor de la línea caliente hacia la línea fría aplicando la tecnología Pinch.

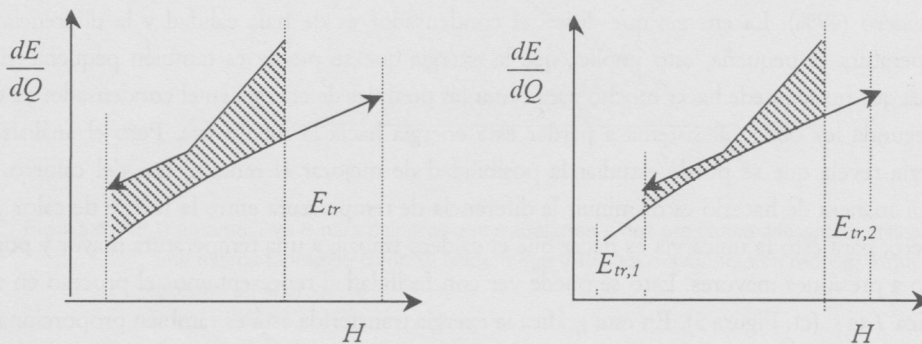


Figura 3. Análisis de exergía en las dos disposiciones posibles para recuperar calor de la línea caliente hacia la línea fría, que son equivalentes según un análisis de energía.

Otro ejemplo interesante de aplicación del análisis de exergía es la comparación con otras metodologías de análisis como por ejemplo la tecnología Pinch (Pinch point technology). Esta tecnología permite mejorar las redes de intercambiadores de calor que puede existir en un proceso industrial. Esto se logra estableciendo las líneas de calentamiento y enfriamiento que se realizan en el proceso. El objetivo es recuperar el calor de las líneas de enfriamiento para transferirlo a las líneas de calentamiento (cf. Figura 2), este proceso puede ser representado en una gráfica del T vs H . En esta figura se puede ver que la energía intercambiada en forma de calor por las dos líneas no depende de la posición relativa de las líneas de calentamiento y enfriamiento en el diagrama T vs H ya que el calor intercambiado corresponde directamente a la diferencia entre estas curvas sobre el eje de la entalpía. Pero la pérdida de exergía debido a este proceso es afectada significativamente por la posición relativa de las curvas en un diagrama dE/dQ vs H ; como se puede ver en la figura 3, la exergía perdida en la gráfica de la izquierda es mayor que la exergía perdida en la gráfica de la derecha, $E_{in} > E_{in,1} + E_{in,2}$. La configuración en el segundo caso será pues más eficiente, ya que se conserva más exergía en el proceso de transferencia de calor. Como se puede constatar este resultado sería revelar esta diferencia con un simple análisis de energía.

6.2. Análisis de una planta termoeléctrica a vapor

Utilizando el criterio de eficiencia en la transferencia de exergía en los procesos es relativamente simple realizar un análisis rápido y simple de una planta termoeléctrica. En la figura 4 se describe el flujo del agua a lo largo de todo el proceso de una planta termoeléctrica que funciona a vapor. La tabla 1 muestra los porcentajes de energía y exergía perdidos en cada una de las etapas del proceso de producción. Estos pueden ser calculados utilizando la ecuación 13.

Como se puede comprobar, las pérdidas de energía como tal se debe esencialmente al calor cedido en el condensador, aparentemente ésta sería la mayor pérdida si se hace un análisis de primera ley únicamente. Sin embargo si tomamos en cuenta las pérdidas de exergía, el condensador cuenta sólo por el 4% de las pérdidas y el principal responsable de las pérdidas es el caldero (49%). La energía que disipa el condensador es de baja calidad y la diferencia de temperatura es pequeña, esto implica que la exergía que se pierde es también pequeña. Esto indica que no se puede hacer mucho para evitar las pérdidas de energía en el condensador ya que la segunda ley obliga al sistema a perder esta energía hacia la fuente fría. Pero el análisis de exergía revela que se puede estudiar la posibilidad de mejorar el rendimiento del caldero. La mejor manera de hacerlo es disminuir la diferencia de temperatura entre la fuente de calor y el caldero, para esto la única vía es hacer que el caldero trabaje a una temperatura mayor y por lo tanto a presiones mayores. Esto se puede ver con facilidad si representamos el proceso en una gráfica T vs s (cf. Figura 5). En esta gráfica la exergía transferida está es también proporcional al área bajo la curva que describe el proceso que sufre el vapor en el caldero a una presión mayor (P_2) la exergía que adquiere el vapor será mayor que a una presión menor (P_1).

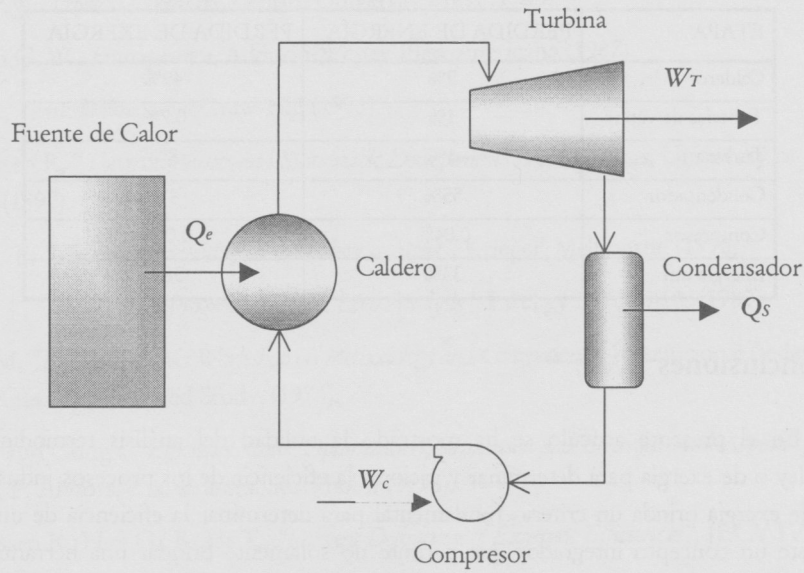


Figura 4. Diagrama de un ciclo de potencia de vapor Rankine.

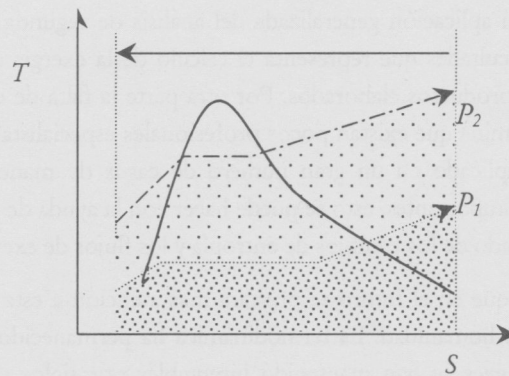


Figura 5. Diagrama T vs S para calderos que trabajarían a dos presiones diferentes, utilizando una misma fuente de calor. El caldero que trabaja a mayor presión recupera mayor exergía en el proceso.

Tabla 1: Pérdidas de energía y exergía en el ciclo de potencia de vapor.

| ETAPA | PÉRDIDA DE ENERGÍA | PÉRDIDA DE EXERGÍA |
|-------------------|--------------------|--------------------|
| Caldero | 9% | 49% |
| Tuberías de vapor | 1% | 0.7% |
| Turbina | 1% | 8% |
| Condensador | 55% | 4% |
| Compresor | 0.04% | 0.05% |
| Energía útil | 33% | 38% |

7. Conclusiones

En el presente artículo se ha mostrado la utilidad del análisis termodinámico de segunda ley o de exergía para determinar y mejorar la eficiencia de los procesos industriales. El análisis de exergía brinda un criterio fundamental para determinar la eficiencia de un proceso, siendo este un concepto integrador que permite no solamente brindar una herramienta para mejorar un proceso sino también un criterio fundamental para decidir incluso las políticas de uso de energía y las reglamentaciones ambientales que pueden ser diseñadas sobre la base de criterios de reducción de la producción de entropía. Es por lo tanto una herramienta de gran utilidad para orientar el desarrollo sostenible en las naciones que están dispuestas a lograrlo.

Sin embargo la aplicación generalizada del análisis de segunda ley no ha sido posible hasta ahora por las dificultades que representa el cálculo de la exergía de algunas sustancias y sobre todo de algunos productos elaborados. Por otra parte la falta de difusión del método de análisis de exergía determina que existan pocos profesionales especialistas en el tema. El análisis de exergía puede ser aplicado en un gran número de casos de manera cualitativa logrando resultados orientadores importantes, esto se puede hacer con la ayuda de gráficos o simplemente interpretando el significado de los cambios de entropía y los flujos de exergía en los procesos.

Es de esperar que en el futuro se prestará mas atención a esta metodología que tiene mucho que brindar a la humanidad. La termodinámica ha permanecido desde su creación sin cambios mayores, sus leyes se han mantenido inmutables por siglos y las implicaciones que encierran están todavía por revelarse.

8. Referencias

- [1] Atkins P.W., *Physical-Chemistry*, Oxford University Press (1986).
- [2] Castellan G. W., *Fisicoquímica*, Addison-Wesley Iberoamericana (1987).
- [3] Wark K., *Termodinámica*, McGraw-Hill (1991).
- [4] Cornelissen R, "*Thermodynamics and Sustainable Development*", Ph.D. thesis, University of Twente (1997).
- [5] Kotas T. J., "*The exergy method of thermal plant analysis*", Krieger, Melbourne (1995).
- [6] Szargut J., "*International Progress in Second Law Analysis*", *Energy* 5, 709-718, (1980).
- [7] Slesser M, "*Energy Analysis Workshop on Methodology and Conventions*", International Federation of Institutes for Advanced Study, (1974).
- [8] Wall G. and Gong ., "*Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Aspects of Energy Systems*", P. Alvfors, et al. Editors. Stockholm (1996).
- [9] Cornelissen R., Hirs G., Kotas T., "*Diferent Definitions of Exergetic Efficiency*", *JECV IV*, Nancy (1995).