

LOS CONCEPTOS DE LA PRIMERA LEY DE LA TERMODINAMICA Y DE EXERGIA COMO METODOS DE ANALISIS DEL USO FINAL DE LA ENERGIA

Concepts of the First Law of thermodynamics and Energy as methods of analysis of the final use of energy.

LUIS ALFREDO HERNANDEZ A.¹

RESUMEN

En la actualidad el análisis del uso final de la energía con base en la primera ley de la termodinámica y de la exergía, se presentan como dos métodos complementarios y necesarios para el diagnóstico del rendimiento energético de tareas y procesos específicos realizados en actividades de producción y/o bienestar en los sectores de la economía de país. Como resultado de su aplicación se podría conducir a grandes ahorros de energía mediante reducción de pérdidas al ambiente y una mejor concordancia energética en la triada fuente-tecnología-uso final.

Palabras Claves: *Energía, Exergía, excergoconomía, Uso racional*

SUMMARY

Analysis of final use of energy based upon thermodynamic first law and exergy actually are considered as two complementary and necessary methods for energetic yield diagnostic of tasks and specific processes for production activities and/or welfare in the economic sectors of the country. As an application result, it could conduce to energy savings of losses to the enviroment and a better energy agreement between source-technology-final use.

INTRODUCCION

La termodinámica es la ciencia que suministra la base científica para el análisis de los procesos de transformación y utilidad de la energía que complementada con la economía, constituyen el marco de referencia dentro de cualquier contexto productivo.

En el presente trabajo, se realiza el análisis termodinámico con el fin de implementar un marco teórico para abordar la problemática energética y, luego definir criterios de eficiencia en el uso final de la energía que fundamenten la formulación de nuevas metodologías para evaluar y proyectar su uso.

MARCO TEORICO

La termodinámica clásica es una ciencia netamente empírica que ha abstraído las leyes que la rigen de hechos observables acordes con resultados de laboratorio. Como teoría, establece relaciones entre estados de equilibrio y se vale de procesos ideales y reversibles para su explicación.

Tres son las leyes que definen prácticamente la termodinámica clásica.

La ley cero establece que un sistema aislado alcanzará un estado de equilibrio que, matemáticamente se puede presentar así:

$$g(P_1, V_1) = g(P_2, V_2) = T \quad (1)$$

Siendo P_1, V_1 y P_2, V_2 ; los volúmenes y presiones en dos estados diferentes y T la temperatura.

Usualmente, esta ley se enuncia en los siguientes términos "Dos cuerpos, cada uno en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí" (Van Wylen, 1970). Esta ley introduce la existencia de una propiedad llamada temperatura (T), la cual es una variable medible.

La primera ley de la termodinámica, expresada en su forma más común, constituye el enunciado del principio de la conservación de la energía y matemáticamente se expresa como:

¹ Profesor Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Santafé de Bogotá, D.C., Noviembre de 1993.

$$dQ - dW = dU \quad (2)$$

Si se suponen despreciables las variaciones de las energías cinética y potencial, esta ley establece que la energía neta que entra o sale de un sistema es igual a la variación de la energía interna del sistema (ΔU). Por otra parte, tal ley confirma que las dos únicas formas de energía en transición, o que se pueden transferir a distancia, son el trabajo (W) y el calor (Q). Esta ley restringe la creación de energía, no haciendo ninguna distinción entre el calor y trabajo, como establece la igualdad en ambas formas de energía, así:

$$f\delta q - f\delta w = 0 \quad (3)$$

La segunda ley de la termodinámica se concibe en términos de la entropía (García Collin, 1981). Esta se entiende como la medida del grado restricción de un sistema, de tal modo, que la entropía de un sistema será menor cuantas más restricciones tenga éste y viceversa.

Esta ley establece que cualquier proceso que suceda dentro de un sistema aislado conduce a que la entropía del sistema (S) permanezca igual o aumente. Matemáticamente, este principio se expresa, así:

$$dS (\text{Sistema aislado}) \geq 0 \quad (4)$$

La igualdad se presenta cuando los procesos termodinámicos dentro del sistema son reversibles o ideales y la desigualdad cuando son irreversibles o reales.

Dado que se puede encerrar cualquier proceso real

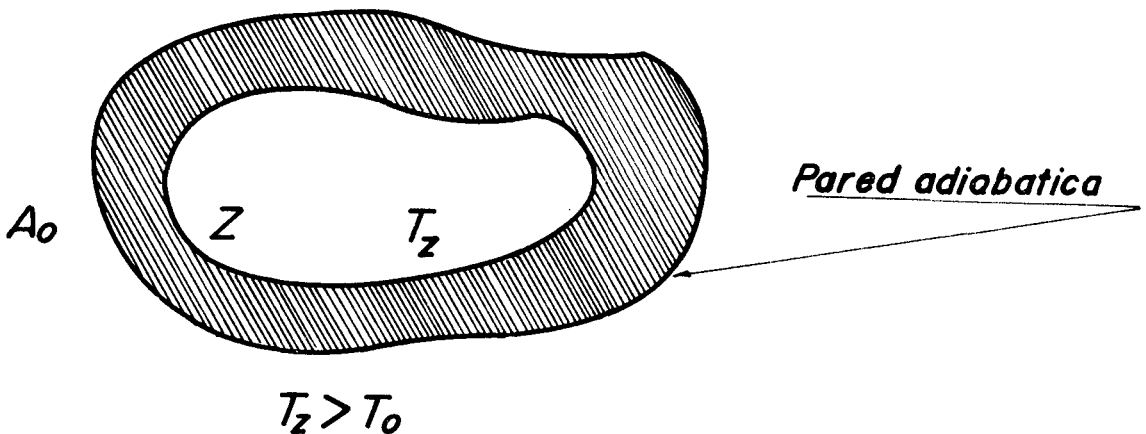


Figura 1.

en una porción del universo, esta ley establece que en la naturaleza, los procesos se presentan en tal forma que constantemente se tiende al equilibrio termodinámico, con cada vez, menos restricciones.

La expresión (4) también se puede presentar así:

$$dS (\text{universo}) \geq \frac{dQ}{T} \quad (5)$$

En (5), se impone dirección a los procesos en la naturaleza, ya que si se presenta la desigualdad, se cumplirán.

Nótese que la temperatura (T), la energía interna (U) y la entropía (S), introducidas, respectivamente, en las tres leyes, son variables de estado o funciones de punto, porque sus valores en el espacio termodinámico sólo, van a depender de sus estados inicial y final. (Dickson, 1975).

ANÁLISIS CONCEPTUAL

Eficiencia de primera ley y calidad termodinámica de la energía.

Consideramos un sistema Z con una temperatura T_z mayor que la temperatura de sus alrededores T_0 y separado del ambiente por una pared adiabática. (Ver figura No.1.)

Al quitar la restricción de dicha pared, se puede estimar la cantidad máxima de trabajo (W), la cual puede obtenerse al terminar el proceso de homogenización con el ambiente.

Si el sistema Z es finito (o sea, no es un foco calorífico), se puede mantener la temperatura T_2 mediante la quema de algún combustible. Así, la salida de calor de dicho sistema se puede presentar como la proveniente de un foco caliente a la misma temperatura T_2 . Por otro lado, podemos considerarlo a A_0 como un foco frío al cual va a fluir calor.

Partiendo del teorema de Carnot (Hernández, 1992) se sabe que ninguna máquina que opere entre dos focos dados con distinta temperatura, reversible o no, tendrá mayor eficiencia que una máquina de Carnot. Por tanto, si Q es el calor que puede pasar del foco caliente al frío, la mayor cantidad de trabajo se obtiene partiendo de que la eficiencia para la máquina térmica se define como:

$$N_r = \frac{W}{Q} \quad (6)$$

$$N_x = \frac{Q - Q'}{Q} = 1 - \frac{Q'}{Q}$$

donde N_r es la eficiencia del ciclo de Carnot reversible. Para el ciclo de Carnot, señalado en la figura 2, se puede demostrar que:

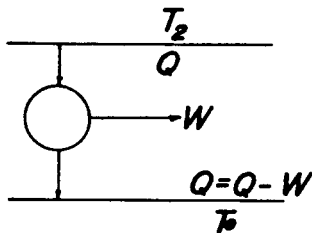


Figura 2.

donde: Q = Calor suministrado

W = Trabajo realizado

Q' = Calor perdido

$$\frac{Q'}{Q} = \frac{T_1}{T_2}$$

Luego,

$$\frac{W}{Q} = 1 - \frac{T_1}{T_2}$$

y,

$$W_{r_{\max}} = Q \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) \quad (7)$$

De la ecuación (7), se deduce que existe una restricción total en la conversión de calor en trabajo y, para que haya flujo de calor, es necesario que exista un gradiente térmico; por tanto, la energía que se encuentra en nuestros alrededores, a temperatura T_0 , que no involucra contraste térmico, se halla en un estado que es inútil para la obtención de trabajo. Si tomamos T_0 constante, se puede afirmar que, cuando el calor del foco caliente, se transfiere a una temperatura T_2 que tiende al infinito, Q tiende a convertirse íntegramente en trabajo.

Lo anterior conduce a que las distintas formas de energía se puedan definir de acuerdo con su capacidad para desarrollar trabajo o convertirse en él. A dicha capacidad se le denomina **calidad termodinámica de la energía** (Dickson, 1975).

Con referencia a la expresión (6), se puede decir que N es la eficiencia de la máquina que opera entre dos focos térmicos siendo, en la práctica, Q el calor o energía que cuesta y que es suministrado por, ejemplo, por la quema de algún combustible, generalmente a una temperatura alta y W el trabajo producido por la máquina, perdiéndose una cantidad de calor Q'. Por tanto, la forma más general de presentar la eficiencia del dispositivo es:

$$N_{1a \text{ ley}} = \frac{\text{Energía útil}}{\text{Energía suministrada}} \quad (100) \quad (8)$$

lo cual corresponde a la eficiencia de la primera ley y que, actualmente, se utiliza como único parámetro del rendimiento en los procesos de transformación de energía.

El concepto de Exergía y su importancia en los procesos energéticos.

Haciendo referencia nuevamente a la Figura 1., se observa que, para obtener un sistema contrastado térmicamente con los alrededores, se necesita realizar una cantidad de trabajo. De lo contrario, cuando se tiene la situación del contraste térmico, la cantidad máxima de trabajo que se puede extraer en la homogenización es igual al trabajo mínimo anterior, si el proceso es nuevamente reversible. A esta cantidad de trabajo mínima utilizada para crear el contraste térmico que, además, corresponde al trabajo máximo en la aniquilación de dicho contraste, se le llama **EXERGIA** (García Collín, 1981).

De la anterior conceptualización se desprende, que se puede hablar de la exergía para crear cualquier

contraste termodinámico, lo cual implica disminución de la entropía del sistema sobre el cual se está operando o, por el contrario, se puede hablar de la exergía que aporta cualquier contraste termodinámico, producto del aumento de la entropía del sistema que sufre un proceso de homogenización.

Para desarrollar matemáticamente el concepto de exergía, consideramos un sistema Z inmerso en un alrededor A_o "muy grande" y homogéneo con respecto a Z (ver figura 3).

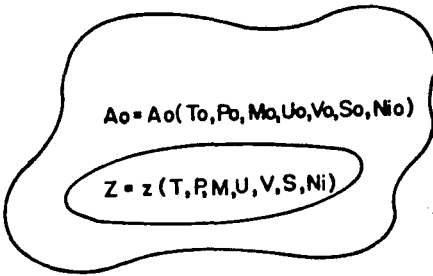


Figura 3

Siendo M la masa y N_i el número de moles del componente químico i.

Con base en la definición del problema se, tiene que:

$$U \ll V_o, V \ll V_o; N_i \ll N_{i_o} \quad (9)$$

Si consideramos un sistema compuesto (Z+Ao), aislado del exterior, excepto del hecho de que se puede hacer trabajo por o sobre Z, luego, cualquier proceso reversible al interior de Z+Ao, debe satisfacer:

$$dQ = du + dv_o + dW = 0 \quad (10)$$

$$dv + dv_o = 0$$

$$dN_i + dN_{i_o} = 0$$

La interacción de Z y Ao puede ocurrir en forma controlada a través de la frontera de Z. Puesto que Z es "muy pequeño", dicha interacción no cambia notablemente los parámetros intensivos de Ao, por tanto:

$$dT_o = 0 \Rightarrow T_o \equiv \text{cte.} \quad (11)$$

$$dP_o = 0 \Rightarrow P_o \equiv \text{cte}$$

$$dM_o = 0 \Rightarrow M_o \equiv \text{cte}$$

Con base en las expresiones diferenciales de la primera y segunda leyes de la termodinámica, se tiene:

$$dQ_o = T_o dS_o = dU_o + dW \quad (12)$$

Suponiendo que el trabajo por o sobre Ao es de carácter volumétrico y químico, la expresión (12) queda convertida en:

$$T_o dS_o = dU_o + P_o dV_o - \sum M_{i_o} dN_{i_o} \quad (13)$$

y

$$dS_o = \frac{1}{T_o} (dU_o + P_o dV_o - \sum M_{i_o} dN_{i_o})$$

reemplazando

$$dS_o = - \frac{1}{T_o} (dU + P_o dV - \sum M_{i_o} dN_{i_o}) - \frac{dW}{T_o} \quad (14)$$

Puesto que la entropía es una variable extensiva y por tanto aditiva, la diferencial total será:

$$dS_{\text{total}} = dS_{A_o} + dS_{\text{sis}} = dS_o + dS \quad (15)$$

$$dS_{\text{total}} = - \frac{1}{T_o} (dU + P_o dV - T_o dS - \sum M_{i_o} dN_{i_o}) - \frac{dW}{T_o}$$

Si definimos la exergía (Ex) como:

$$Ex = U + P_o V - T_o S - \sum M_{i_o} N_i \quad (16)$$

y haciendo uso del conjunto de ecuaciones (11), se tiene que:

$$dEx = dU + P_o dV - T_o dS - \sum M_{i_o} dN_i \quad (17)$$

ya la ecuación (15) queda así:

$$dS_{\text{total}} = - \frac{1}{T_o} (dEx + \frac{dW}{T_o}) \quad (18)$$

La ecuación (16), además de definir la exergía que puede ser calculada para cualquier sistema, muestra la relación entre la exergía (Ex) y la entropía del sistema Z.

La expresión (18) demuestra que, si se lleva a cabo un proceso reversible, como se ha supuesto en todo

el desarrollo de la segunda ley, se tiene que:

$$dS_{total} = \frac{dQ}{T} = 0$$

$$dS_{total} = -\frac{1}{T_o} (dW + dEx) = 0$$

entonces:

$$dW = dEx$$

integrando la ecuación anterior:

$$iWf = - (0 - Ex)$$

por tanto:

$$Ex = iWf_{max}$$

y según (7),

$$Ex = Q \left(1 - \frac{T_o}{T_2}\right) \quad (19)$$

siendo iWf_{max} el trabajo máximo del sistema.

Por lo tanto, la exergía, definida por (16) se puede interpretar como la función termodinámica que mide el máximo trabajo obtenible o el mínimo trabajo por realizar.

Si los procesos fueran irreversibles,

$$dS_{total} > 0$$

y, siguiendo similar desarrollo matemático del proceso reversible, se tiene que:

$$Ex = iWf + T_o \Delta S_{total} \quad (20)$$

Es decir, que parte de la energía se pierde en la cantidad $T_o \Delta S$, confirmando el principio de la degradación de la energía.

Así visto, el concepto de exergía nos conduce a definir un criterio nuevo de eficiencia que tiene en cuenta la irreversibilidad de los procesos reales.

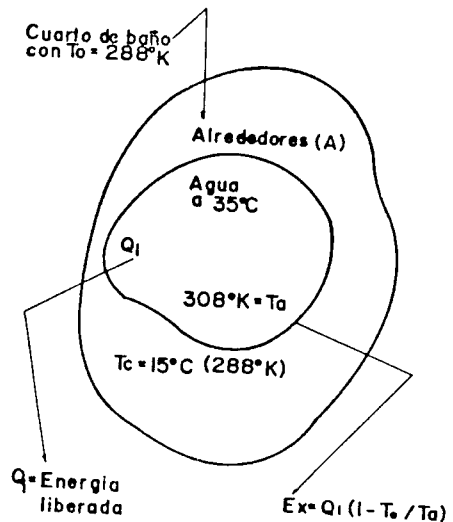
Si se compara la exergía que se consume (Ex_{actual}) en la realidad, con la exergía necesaria ($Ex_{mínima}$), se obtiene la eficiencia exergética Nex , que queda definida así:

$$Nex = \frac{Ex_{mínima}}{Ex_{actual}} \quad \text{Eficiencia de segunda ley} \quad (21)$$

APLICACION DE LOS CONCEPTOS EN ACTIVIDADES DE USO FINAL DE LA ENERGÍA.

Conociendo las actividades que demandan energía en un país, bajo la consideración de que cada tarea o proceso es realizada reversiblemente, es factible determinar la exergía empleada en cada tarea.

Consideremos como ejemplo "Calentar agua para baño", donde se necesita agua a 35°C (308°K) y, suponiendo que los alrededores están constituidos por el cuarto de baño que se encuentra a una temperatura media de 15° (288°K). En la Figura 4 se puede hacer una descripción de tal actividad:



Análisis exergético de la actividad de calentar agua.

Figura 4

El cálculo de la exergía mínima se reduce a conocer la exergía en el proceso de homogenización del contraste térmico de los dos sistemas.

Con base en (7) y (19), se tiene que:

$$Ex_{\min} = Q_1 \left(1 - \frac{T_c}{T_a}\right) = iw f_{\max}$$

si suponemos que la exergía actual necesaria para realizar dicha tarea o actividad proviene de la quema de algún combustible como gas o petróleo, donde el valor de esta exergía coincide con la entalpía (H) del combustible, se puede estimar la eficiencia exergética de dicha tarea así:

$$Nex = \frac{Ex_{\min}}{Ex_{\text{actual}}} = \frac{Q_1 \left(1 - \frac{T_c}{T_a}\right)}{H} = \frac{Q_1}{H} \left(1 - \frac{T_c}{T_a}\right)$$

Nótese aquí que Q_1/H es la eficiencia de primera ley para el dispositivo de calentamiento. Si consideramos que este dispositivo sea el calentador de agua que puede tener una eficiencia media del 65%, con los datos de temperatura tenemos que:

$$Nex = 0,65 \left(1 - \frac{288}{308}\right) = 0.042 = 4.2\%$$

El cálculo anterior muestra que, a pesar de haber una eficiencia alta de 1ª ley, la eficiencia exergética es baja. Además, que la calidad necesaria de la energía para realizar la mencionada tarea es calor a 35°C.

Si en lugar de utilizar un calentador con quemador, empleamos un colector solar, el cálculo de la exergía que es capaz de aportar, sería:

$$Ex_{\text{colector}} = Q_{1c} \left(1 - \frac{T_c}{T_a}\right)$$

$$T_a \text{ } 288^\circ \text{ K y } T_c \text{ } 318^\circ \text{ (} 45^\circ \text{C)}$$

Para este caso, considerando a la exergía del colector como la exergía actual, se tendría que la eficiencia exergética (Nex), sería:

$$Nex = \frac{Ex_{\min}}{Ex_{\text{actual}}} = \frac{Q_1}{Q_{1c}} \left(\frac{1 - \frac{288}{308}}{1 - \frac{288}{318}}\right)$$

Si Q_1/Q_{1c} es la eficiencia del colector solar, cuyo valor típico lo podemos suponer en 50%, entonces:

$$Nex = 0.5 \left(\frac{0.065}{0.135}\right) = 0.24 = 24\%$$

La comparación de las eficiencias exergéticas muestra que el calentador solar brinda la calidad energética necesaria para la tarea propuesta.

CONCLUSIONES

1. Para diferentes tecnologías, la exergía como concepto brinda la posibilidad de hacer más afín el uso final de la energía, con respecto al energético empleado en el desarrollo de actividades.

2. Como consecuencia de la anterior apreciación, se pueden plantear grandes ahorros de energía en actividades de producción y/o bienestar.

3. Para el cálculo de la eficiencia exergética de una tarea específica, es necesario determinar con exactitud la eficiencia de primera ley de la termodinámica.

4. Mientras no existan sistemas de aislamiento que reduzcan el contraste térmico con el ambiente los procesos que demandan una calidad de calor, superior a 100°C producirán grandes pérdidas de energía y de exergía.

5. Para plantear eficiencias exergéticas para un sector productivo, definido sobre un plano energético en tareas o actividades propias demandantes de energía, se pueden establecer matrices de exergías actuales y mínimas.

6. La exergía se constituye en una herramienta para el mejoramiento tecnológico de la producción y para la formulación de políticas de uso eficiente, de conservación y de ahorro de energía.

7. En el marco económico se permitirá reducir costos en actividades de producción y/o bienestar.

8. Se podrá reducir el impacto ambiental derivado de la ineficiente utilización de la energía.

LITERATURA CITADA

1. Ahern, J., Exergy as method of energy systems analysis. John Wiley and Sons, New York, 1980.
2. García - Colin, L., Introducción a la termodinámica de sistemas abiertos, Colegio de México, 1981.
3. Dickson, J., Thermodynamics an introduction to energy, Prentice Hall, New York, 1975.
4. Hernández, L.A., Los conceptos termodinámicos de la primera ley y de la exergía como métodos de análisis del uso final de la energía. Universidad Nacional. 1993. (Sin publicar).
5. Van Wylen, G., Fundamentos de termodinámica, Editorial Limusa-Wiley, S.A, México, 1970.