
ENTROPIA Y UNIVERSO

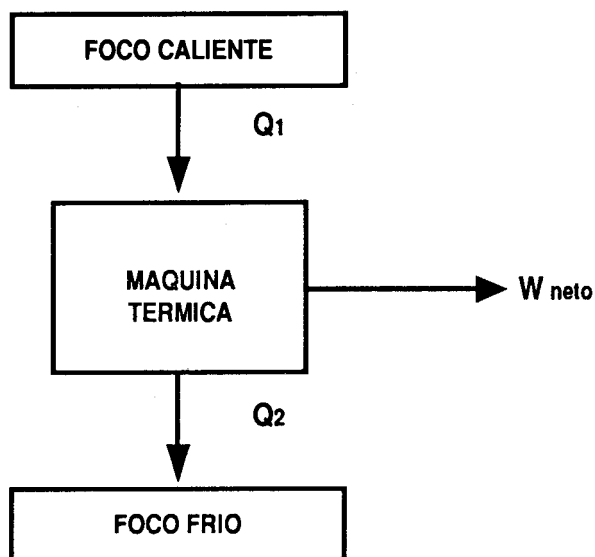
HECTOR RAUL MUÑOZ CHAVEZ

- Jefe de la Central Térmica Termotumaco
- Profesor de Tiempo Completo Universidad EAFIT.
Adscrito al Departamento de Mecánica.

El segundo principio de la termodinámica (íntimamente relacionado con la entropía, concepto que aún hoy suscita una enconada disputa filosófica y científica de la que hablaré al final de este pequeño artículo) empieza a desarrollarse a principios del siglo diecinueve con el advenimiento de la revolución industrial. Aún cuando la máquina de vapor se iba convirtiendo en la fuerza motora que impulsaba esta revolución, nadie poseía los conocimientos necesarios para mejorar su diseño y su fabricación sucesiva se iba realizando al azar. Fue, como en muchos otros descubrimientos científicos, la necesidad práctica de comprender ciertos fenómenos físicos (en este caso los procesos de transferencia de energía en las máquinas térmicas) lo que condujo al entendimiento y formulación de la segunda ley termodinámica.

En 1824 el ingeniero francés Sady Carnot publicó un pequeño librito, ya clásico en la termodinámica, al que llamo "Reflexiones acerca de la fuerza motriz del fuego", documento que sentó las bases para establecer la segunda ley termodinámica. Introdujo, además, conceptos como el de ciclo y proceso reversible. Sady Carnot observó por vez primera que en las máquinas de vapor no podrá haber producción alguna de trabajo, a menos que exista un flujo de calor de un depósito térmico de alta temperatura hacia otra temperatura inferior. Observó además que el trabajo producido es función de la diferencia de temperaturas entre los depósitos y que resulta de mayor magnitud cuando tal diferencia es mayor. Este científico imaginó una máquina de vapor que podría funcionar en un ciclo cerrado. El concepto de ciclo es una idea novedosa y revolucionaria, pues supone una sustancia que ya no se bota después de haber producido trabajo, sino que se recicla, sufriendo en el trayecto diferentes procesos, entre los cuales está absorber calor de una fuente de alta temperatura y producir trabajo expandiéndose contra un dispositivo mecánico como un émbolo. Finalmente esta sustancia vuelve a su estado inicial y se repite indefinidamente el mismo ciclo. La máquina de Carnot es importante porque trabaja en un ciclo compuesto por procesos ideales a los que el llamo reversibles. Un proceso reversible se efectúa sin pérdidas, es decir que factores como la fricción, para mencionar solamente uno, no existen en ellos y así toda la energía liberada en el proceso puede convertirse en trabajo útil, aprovechable. Este proceso, entonces, puede invertirse, haciendo que vuelva a sus condiciones iniciales, sin necesidad de agregar más energía que la que él entregó en el proceso directo. Así podemos definir el proceso

reversible como aquel que se efectúa sin degradación de la energía. Es éste obviamente, un proceso que nunca se verificará en la realidad pero que es de gran utilidad teórica para el estudio de las máquinas térmicas. Una máquina térmica es un dispositivo que opera en un ciclo y que transforma en trabajo cierta cantidad de calor. La representaremos esquemáticamente como muestra la figura.



Donde:

- Q_1 = Calor absorbido por la máquina.
- W_{neto} = Trabajo neto producido por la máquina
- Q_2 = Calor cedido por la máquina

El índice de funcionamiento de una máquina productora de trabajo viene expresado por su rendimiento térmico que se define como la relación entre el trabajo producido y el calor absorbido, es decir:

$$\eta_{termica} = \frac{W_{neto}}{Q_n}$$

Pero el primer principio de la termodinámica que establece la conservación de la energía en los procesos requiere que el calor absorbido sea exactamente igual al trabajo producido más el calor cedido, así:

$$Q_1 = W_{neto} + Q_2$$

De donde:

$$W_{neto} = Q_1 - Q_2$$

Reemplazando este valor del trabajo neto en la ecuación de rendimiento:

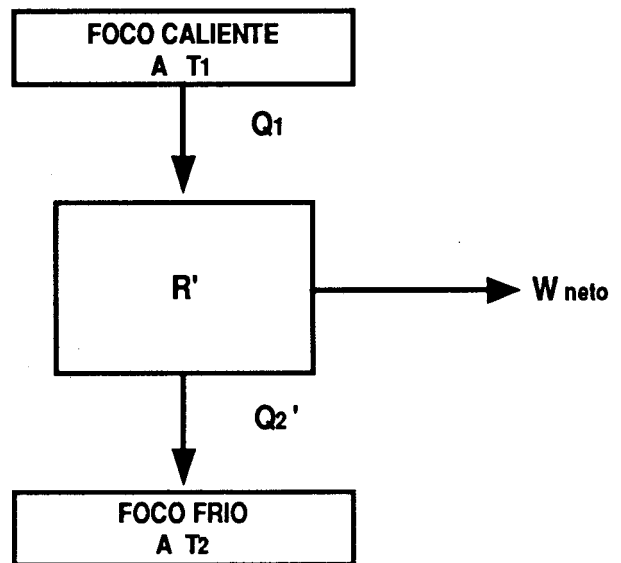
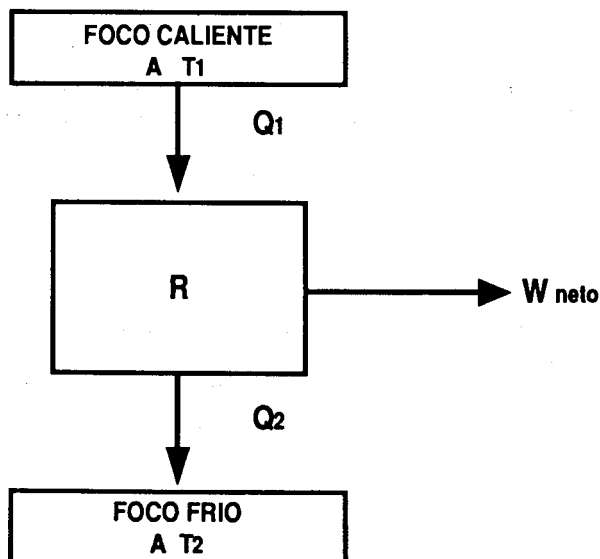
$$\eta_{\text{térmica}} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

Obsérvese que el rendimiento de una máquina térmica operando entre dos fuentes de calor es siempre menor que la unidad o menor que el 100%. Quiere ésto decir que no es posible construir una máquina térmica de 100% eficiente y que solo una pequeña porción del calor absorbido puede ser transformado en trabajo. La máquina Carnot que trabaja con procesos reversibles, es la máquina más eficiente que hay, pues en teoría puede convertir el calor absorbido en la mayor cantidad de trabajo mecánico posible. Esto se conoce como el postulado de Carnot y puede enunciarse en dos axiomas:

- a- Es imposible construir una máquina térmica que operando entre dos regiones de temperatura sea más eficiente que una máquina Carnot que opere entre las mismas regiones de temperatura.
- b- Todas las máquinas térmicas reversibles (o Carnot) tienen la misma eficiencia si trabajan entre las mismas regiones de temperatura.

Así entonces si tenemos dos máquinas térmicas reversibles R y R' su eficiencia será la misma:

$$\eta_R = \eta_{R'}$$



De la definición de eficiencia :

$$1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2'}{Q_1'}$$

De donde:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{Q_2'}{Q_1'}$$

La relación de Q_1/Q_2 es por tanto una constante para todas las máquinas reversibles que operen entre los dos mismos focos de temperatura. Como ninguna restricción se ha impuesto a la sustancia operante, el rendimiento de una máquina reversible es independiente de la naturaleza de dicha sustancia y depende solamente de la temperatura de los focos. Así entonces:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = f(T_1, T_2)$$

Existen diferentes formas de definir la naturaleza de esa función f, pero la primera que se nos ocurre, por ser la más fácil de manipular, es una relación lineal entre el calor y la temperatura, que fue la que propuso William Thomson (más conocido como Lord Kelvin)⁽¹⁾

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

(1) Lord Kelvin construyó, a partir de esta relación, una escala de temperatura absoluta que lleva su nombre.

Ordenando convenientemente esta relación:

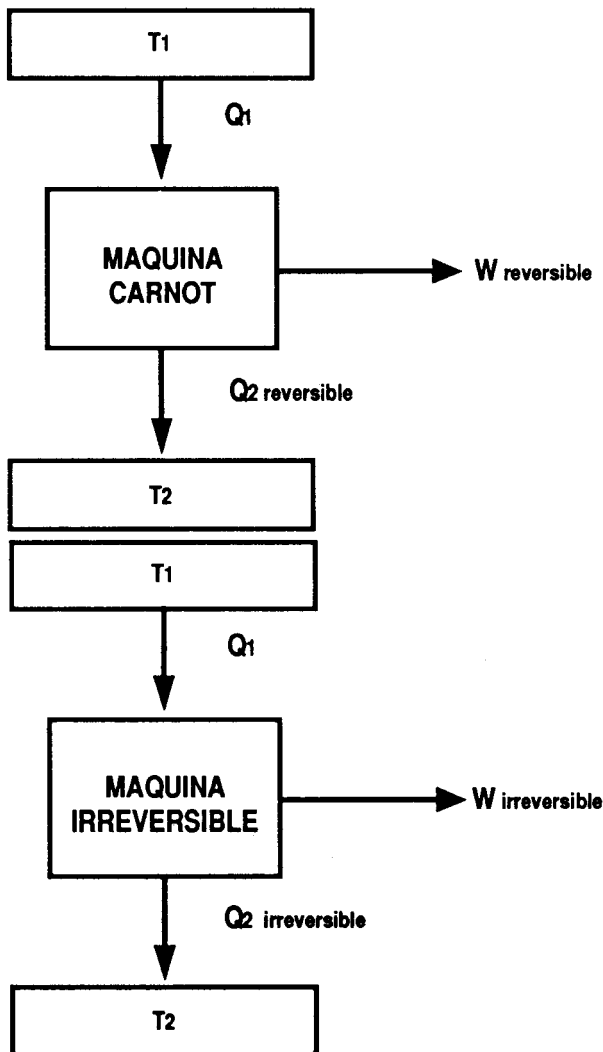
$$\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2} \quad \text{ó} \quad \frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Lo que generalmente se representa con el símbolo

$$\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$$

que significa que para los procesos reversibles la integral cíclica (\oint) de esta relación $\frac{\delta Q}{T}$ es igual a cero.

Ahora consideremos una máquina que opera en un ciclo compuesto por procesos irreversibles, que son los que realmente se dan en la práctica. Esta máquina será, según el postulado de Carnot, menos eficiente que una máquina Carnot, que opere entre los dos mismos focos de temperatura y que reciba la misma cantidad de calor Q_1 :



Por el principio de Carnot:

$$W_{reversible} > W_{irreversible}$$

Ya que para ambos ciclos reversibles e irreversibles se requiere, según la primera ley de la termodinámica, que:

$$W = Q_1 - Q_2$$

Concluimos que:

$$Q_1 - Q_2_{reversible} > Q_1 - Q_2_{irreversible}$$

de donde:

$$Q_2_{reversible} > Q_2_{irreversible}$$

En consecuencia si para una máquina reversible teníamos que:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0$$

Para una máquina irreversible se verificará la siguiente relación:

$$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2_{irreversible}}{T_2} < 0$$

Esto quiere decir que para todos los ciclos irreversibles, que son los que en realidad se llevan a cabo en la naturaleza, podemos escribir:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$$

A esta desigualdad Rudolf Clausius la llamó ENTROPIA y la designó con la letra "S". Así entonces:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} < ds$$

que nos dice que la integral cíclica de la relación $\frac{\delta Q}{T}$ nos da el cambio de entropía en un proceso de transmisión de calor. Como vemos, a diferencia de los restantes principios de la física, el que corresponde al segundo de la termodinámica no hace referencia a ningún principio de conservación sino

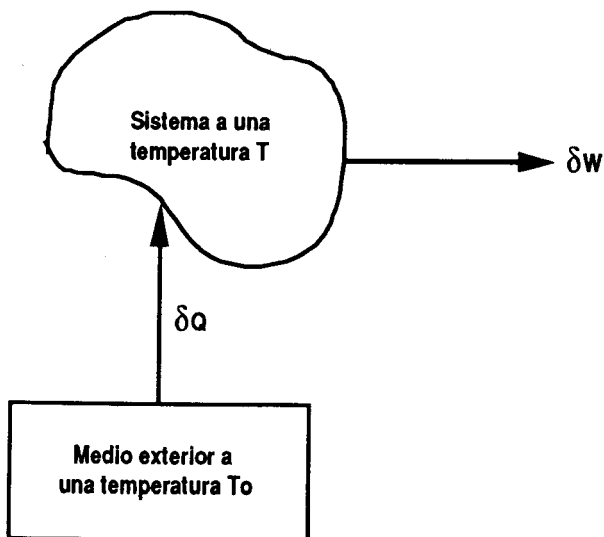
más bien a la evolución de la entropía, la cual no se conserva en el curso del tiempo, sino que, como se demuestra matemáticamente, no hace sino crecer, y en el mejor de los casos permanece constante, pero nunca disminuye. La entropía se origina en los intercambios energéticos y puede verse desde tres puntos de vista:

1. Físicamente: es una función cuyo cambio en un proceso espontáneo es una medida de la irreversibilidad del proceso.
2. Matemáticamente: es una función apropiada para cuantificar la segunda ley.
3. Tecnológicamente: función cuyo cambio en un proceso de absorción de calor es una medida de la fracción de calor que no puede convertirse en trabajo.

Además usar energía con rendimiento es convertir movimiento desordenado en movimiento ordenado a través de una máquina que trabaje entre dos niveles diferentes de temperatura. Justamente este desequilibrio lo crea la máquina.

Finalmente consideremos lo que se conoce como PRINCIPIO DEL INCREMENTO DE ENTROPIA y sus implicaciones.

Asumiendo como positivo el calor que entra a un sistema y negativo el que sale, consideremos el cambio total de entropía en un sistema y su medio exterior en un proceso de transmisión de calor. Una cantidad de calor δQ se transmite desde el medio exterior al sistema, como muestra la figura:



En este proceso el calor entra al sistema, por lo tanto δQ es positivo y el cambio de entropía debido a esta transmisión de calor, para el sistema será:

$$ds_{\text{Sistema}} > \frac{\delta Q}{T}$$

Para el medio circundante, el calor sale de él, lo que significa, según nuestra convención, que el calor es positivo, y el cambio de entropía para el medio será entonces:

$$ds_{\text{M.Circundante}} > -\frac{\delta Q}{T_0}$$

De donde el cambio total de entropía, será la suma de estos cambios individuales, es decir:

$$ds_{\text{Sistema}} + ds_{\text{M.Circundante}} > \frac{\delta Q}{T} - \frac{\delta Q}{T_0}$$

La cantidad de calor que entra al sistema es la que sale del medio circundante, así que δQ para ambos es el mismo, entonces:

$$ds_{\text{Sistema}} + ds_{\text{M.Circundante}} > \delta Q \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)$$

Para que haya transmisión de calor del medio circundante al sistema se requiere que $T_0 > T$ ya que el calor se transmite sólo de los cuerpos de mayor temperatura a los de temperatura inferior. Así pues:

$$\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) > 0$$

De donde:

$$ds_{\text{total}} = ds_{\text{Sistema}} + ds_{\text{M.Circundante}} > 0$$

Concluimos que para todos los posibles procesos entre un sistema y el medio circundante, estos se realizan solamente si a ellos va asociado un aumento en la entropía total. De acuerdo con el primero y segundo principio de la termodinámica, la energía del universo es constante pero la entropía, como lo acabamos de ver, crece continuamente. Surgen entonces las siguientes preguntas: ¿Puede la entropía del universo crecer indefinidamente? o ¿existe por el contrario una entropía máxima del universo? y si tal límite existe ¿Cuándo se alcanzará? Como

todos los procesos reales van acompañados de un incremento de entropía, la energía utilizable de que dispone la humanidad irá decreciendo continuamente. Llegará un momento en el futuro que no existirá energía utilizable y en ese momento la entropía del universo alcanzará su valor máximo y prevalecerá según la mecánica estadística un desorden completo y un estado de azar. En aquel instante del universo toda la materia estará a igual temperatura y de acuerdo con Rudolf Clausius se habrá alcanzado "la muerte térmica del universo", creencia que originó pánico en las gentes de finales del siglo XIX. Ningún tipo de energía podrá utilizarse para elevar la temperatura local por encima de la de sus alrededores y la realización de trabajo será imposible. Sin embargo la energía del universo será, según el primer principio, la misma que actualmente. La entropía entonces, desvaloriza la energía al hacerla perder, no cantidad, sino cualidad, transformándola en energía de baja calidad, desaprovechable o, menos noble. De allí se sigue una deteriorización inevitable y mortal. La humanidad de una forma irracional, acelerando la destrucción, crea y hace aumentar la entropía del universo. Con sobrada razón el sociólogo francés Levi-Strauss afirmó que el estudio del hombre en vez de llamarse antropología debería llamarse entropología. Avanzamos irremediamente hacia una inercia final cada vez más grande y definitiva, ya la muerte individual es un signo premonitorio, es como si nuestro destino fuera aumentar la agonía universal.

Hay sin embargo quienes creen exactamente lo contrario. Las modernas teorías astrofísicas del "big bang" afirman la creencia de un universo primitivo, caótico, inmensamente caliente, homogéneo, isotrópico, isotermo y con alta entropía que evolucionó expansivamente hacia estructuras ordenadas, contrastadas y frías. Esto hace pensar que nos

alejamos de la inercia universal definitiva, isotermia o muerte térmica del universo, ésta no se situaría en el futuro sino en el lejano pasado. Sustenta ésta teoría la organización y superación de la materia inerte en forma de materia viviente y pensante, pues en un universo en desorganización y degradación constantemente en aumento, este hecho parece contradecir el principio de la entropía, pues a pesar de eso se creó la vida, se organizaron las células, se organizó el código genético inmortal y se desarrolló el cerebro.

Así el esquema pesimista de Levi Strauss:

ORDEN $\xrightarrow{\text{TIEMPO}}$ CAOS

Se transforma en el cuadro astrofísico moderno y optimista que dió origen a la vida.

CAOS $\xrightarrow{\text{TIEMPO}}$ ORDEN

BIBLIOGRAFIA

- Gamow, George. Biografía de la Física. Buenos Aires: Ed. Alianza, 1970.
- Hawking, Stephen W. La Historia del Tiempo. Bogotá : Ed. Crítica, 1989.
- Martínez, Regino. Algebra Multilineal. Medellín: Universidad de Antioquia, 1990. PP 26, 192 - 196.
- Semansky, M. W. & Dittman R. H. Calor y Termodinámica. 6ª ed. México: Mc. Graw Hill, 1984, Cap. 8.
- Wylen, J. Van. Fundamentos de Termodinámica. México: Limusa, 1983. Capítulos 6 y 7.