

Termodinámica, Mecánica Cuántica e Informática

Enrique A. Cingolani
Email: enrique.cingolani@uai.edu.ar

Tres disciplinas científicas que a priori podrían parecer desconectadas, convergen hacia puntos de encuentro insospechados para el desarrollo de nuevas teorías y tecnologías.

La Termodinámica es una ciencia que se desarrolló a principios del siglo XIX de la mano de la máquina de vapor. Fue extensamente estudiada y condujo a la descripción teórica precisa de las máquinas térmicas, explicando el funcionamiento de la máquina de vapor, del motor de combustión interna y de las máquinas refrigeradoras, entre otras.

La termodinámica tuvo la virtud de establecer restricciones en cuanto a la disponibilidad en el uso de la energía. Si bien su *primer principio* establece la conservación de la energía e indica que la variación de la energía interna de un sistema es igual a la suma del calor más el trabajo intercambiados entre el sistema y el medio, su *segundo principio* limita la forma en que se puede utilizar la energía. Por más que un proceso sea posible desde el punto de vista de la conservación de la energía (primer principio), sólo pueden darse en la naturaleza procesos que conduzcan al aumento de una misteriosa magnitud que se ha dado en llamar *entropía* del universo.

La entropía del universo siempre aumenta en los procesos naturales y solamente puede mantenerse constante en aquellos procesos denominados *reversibles*, pero la entropía del universo jamás puede disminuir.

De esta manera, cualquier máquina térmica que alguien diseñe verá restringido su funcionamiento a partir de estos dos principios de la termodinámica. Ninguna máquina puede violar el primer principio, el de conservación de la energía, o se convertiría en un *móvil perpetuo de primera especie*, es decir en una máquina que produzca más trabajo que la energía que consume. Tampoco una máquina puede violar el segundo principio de la termodinámica, disminuyendo la entropía del universo, o se convertiría en un *móvil perpetuo de segunda especie*. Estos últimos son más difíciles de descubrir que los primeros y existen innumerables propuestas de máquinas que jamás podrían funcionar pues violarían el segundo principio de la termodinámica.

Existe un punto interesante al analizar las máquinas ideales que están al filo de lo permitido, y que llamamos máquinas reversibles. Son teóricamente posibles, no violan el primer principio de la termodinámica y, en cuanto al segundo principio, la variación de entropía del universo que producen resulta nula ($\Delta S_{\text{UNIVERSO}} = 0$).

Para comenzar a incorporar en esta historia a la informática, analicemos una máquina muy simple, compuesta por una pelota de goma ideal, a la cual dejamos caer desde una cierta altura, rebota en el piso y sin rozamiento ni pérdida de energía, se eleva hasta la misma altura desde la que la dejamos caer, iniciando luego otra caída. La pelota queda así rebotando indefinidamente, sin perder su energía. Es interesante notar que este sistema no viola el primer principio de la termodinámica, ya que su energía mecánica total se mantiene constante, ni viola el segundo principio de la termodinámica, dado que no intercambia calor con el medio, por lo cual la variación de entropía del universo es cero, y constituye una máquina reversible ($\Delta S = Q/T = 0$).

La característica interesante de esta máquina que describimos aquí, es que en cualquier momento, conociendo la posición y la velocidad de la pelota de goma, podemos determinar la posición y velocidad que tuvo esta pelota en otro instante. En particular podemos saber la altura máxima desde la cual cayó. Es decir, no se produjo pérdida de información. Este sistema sin fricción no pierde energía en forma de calor ni tampoco pierde información.

Supongamos ahora el caso real, en el cual dejamos caer la pelota de goma, pero en esta oportunidad existe rozamiento con el aire y eventual pérdida de energía en el choque contra el piso. La pelota rebota pero esta vez ya no alcanza la misma altura desde la cual se la dejó caer. Por más que en un momento cualquiera conozcamos la posición y velocidad de la pelota, nos será imposible determinar, por ejemplo, cuál fue la altura inicial desde la que se la dejó caer. El calor disipado se llevó consigo parte de la información acerca del sistema. Después de varios rebotes la pelota quedará inmóvil en el piso y será en cualquier caso indistinguible la altura desde la cual se la haya dejado caer inicialmente. La información original se habrá perdido.

Yendo ahora a los sistemas de cómputo, estos se basan para su funcionamiento en la escritura y borrado de dígitos binarios (bits) a partir de operaciones realizadas en compuertas lógicas. Si nos detenemos en analizar las compuertas lógicas básicas, vemos que son dispositivos irreversibles, es decir dispositivos en los que examinando su salida es generalmente imposible determinar cuáles fueron sus entradas. Como ejemplo pensemos en una compuerta AND de 3 entradas. La salida es un 1 sólo si las tres entradas son 1s, y es la única situación en que podemos conocer las entradas analizando la salida. En el otro caso, en que la salida sea un 0, las entradas pueden tener cualquier valor salvo 111, por lo cual esta operación lógica AND produjo pérdida de información.

Allá por el año 1961, el físico Rolf Landauer, trabajando en los laboratorios de IBM, se preguntó si, así como la disipación de calor en un sistema termodinámico produce pérdida de información, debería la pérdida de información en un sistema de cómputo, en particular al borrar un bit, producir disipación de calor.

Landauer planteó que debería existir una mínima cantidad teórica de calor disipado, asociado al borrado de un bit en un sistema de computación y para determinar este valor acudió al concepto de entropía, como veremos a continuación.

Supongamos que tenemos un sistema compuesto por un bit de información a temperatura T . Este sistema puede encontrarse en alguno de dos estados posibles ("0" o "1"), por lo cual, desde el punto de vista de Boltzmann tendrá asociada una entropía $S = k \ln(2)$.

Imaginemos ahora que queremos "borrar" ese bit pasándolo al estado "0". La entropía del sistema de un bit en estado "0" valdrá $S = k \ln(1) = 0$. Por lo tanto al borrar el bit, la entropía disminuirá en una cantidad

$$\Delta S = k \ln(2)$$

Esta disminución de entropía en el sistema de un bit debe, necesariamente, ir acompañada por un aumento de entropía del medio (equipo de computación) de al menos la misma cantidad, para no violar el segundo principio de la termodinámica. Esto ocurrirá a partir de la disipación de calor que, usando la definición clásica de entropía, podemos calcular como

$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

Igualando ahora estas dos últimas ecuaciones, Landauer planteó que la cantidad mínima de calor disipada al borrar un bit de información debía ser

$$Q = k T \ln(2)$$

donde k es la constante de Boltzmann y T es la temperatura absoluta del sistema (a temperatura de 300 K la cantidad de calor es sumamente pequeña, de aproximadamente $2,9 \times 10^{-21}$ Joule).

Es decir que, independientemente del sistema de cómputo y del hardware que pueda implementarse, la termodinámica establece un límite mínimo en cuanto a la disipación de calor que se producirá al ejecutar esta operación lógica elemental. La disipación de calor es inherente a todo sistema de cómputo y, en principio, al borrar un bit no habría forma de reducir esta emisión de calor a valores inferiores al establecido por Landauer. Los sistemas de cómputo que usan compuertas irreversibles deben necesariamente disipar calor para realizar su tarea.

Este planteo resultó el disparador de una serie de investigaciones que dieron por resultado en el año 2012 (más de cincuenta años después de haber sido postulada) la medición precisa de esta cantidad de calor, a través de un trabajo experimental llevado a cabo por Eric Lutz de la Universidad de Berlín, y los físicos Berut y Ciliberto del French National Center for Scientific Research en Lyon, Francia.

Por otro lado, investigadores como Edward Fredkin del MIT, plantearon la posibilidad de utilizar compuertas lógicas reversibles (Fredkin gates) que reemplacen a las clásicas compuertas irreversibles AND, OR, etc., y puedan evitar la pérdida de información y la consecuente disipación de calor al realizar las operaciones con esta lógica reversible. Sin embargo este tipo de compuertas podrían resultar muy lentas y, por otra parte, acumularían enorme cantidad de información innecesaria al realizar las operaciones lógicas, para poder garantizar la reversibilidad del sistema de cómputo, requiriendo memorias inmensas.

Para terminar con esta historia, la mecánica cuántica tampoco podía estar ausente en el tema. Un grupo de investigación dirigido por Vlatko Vedral del Centre for Quantum Technologies de Suiza, publicó en 2011 un trabajo sobre sistemas de cómputo en el cual hacen uso del fenómeno de entrelazamiento cuántico (entanglement). En tales sistemas, los autores sostienen que es posible borrar el estado de un sistema de partículas entrelazadas de manera que la variación de entropía del universo, aún siendo mayor o igual que cero, puede realizarse de modo tal que disminuya la entropía en una parte del sistema en tanto que aumente en la otra. Así esta última parte disiparía calor, en tanto que su contrapartida absorbería calor, enfriándose. De esta forma podría absorberse calor localmente al borrar información, sin contradecir las leyes de la termodinámica.

Los autores de este trabajo indican que si se pudiera manipular el entrelazamiento cuántico entre el microprocesador y la memoria de la computadora, entonces podrían borrarse bits para hacer lugar para otros nuevos, manteniendo además frío el entorno, aunque reconocen que esto es actualmente muy difícil y nos llevaría al límite de lo físicamente permitido.

Sin embargo la tecnología continúa su avance inexorable, haciendo uso de todas las herramientas disponibles. La termodinámica y la mecánica cuántica, dos disciplinas con orígenes separados por casi un siglo, confluyen en auxilio de la informática, a partir de teorías básicas que seguramente veremos en poco tiempo plasmadas en nuevos dispositivos de cómputo, cada vez más sofisticados.

Referencias

Bennet, C., Landauer, R. (1985). The fundamental physical limits of computation. Scientific American, July, 1985.

Berut, A. et al. (2012). Experimental verification of Landauer's principle linking information and thermodynamics. Nature, Vol. 483, March 8, 2012.

Landauer, R. (1961). Irreversibility and heat generation in the computing process. IBM Journal, Vol. 5, July, 1961.

Vedral, V. (2011). Does quantum mechanics flout the laws of thermodynamics? Scientific American, June, 2011.