

Información y entropía

Tom Stonier

Escuela de Ciencia y Sociedad, Universidad de Bradford, Bradford, West Yorkshire

Extracto y traducción: Luis C.A. Gutiérrez-Negrín (CFE)

Se presenta a continuación un extracto del artículo original Towards a general theory of information II: information and entropy, aparecido en el número 2, Vol. 41, de la revista Aslib Proceedings de febrero de 1989.

El desarrollo futuro de los sistemas computacionales estará restringido no tanto por las limitaciones del hardware, sino por nuestra falta de comprensión de los procesos de razonamiento humano. El desarrollo de chips tridimensionales, superconductividad criogénica o sistemas ópticos –y en su momento de computadoras biológicas– presagia que surgirán generaciones de procesadores de super-información cuya potencia empuñecerá a la generación actual de computadoras como estas, a su vez, lo hicieron con las computadoras de la época previa a los transistores. El uso efectivo de esas poderosas computadoras del futuro estará limitado por la ausencia de una base teórica adecuada para el procesado de la información. Gordon Scarrott (1986) ha insistido en la necesidad de una ‘ciencia de la información’ que debería investigar las “propiedades naturales de la información, tales como su función, estructura, comportamiento dinámico y características estadísticas...” Tal esfuerzo debería “llevar hacia un marco conceptual que dirija el diseño de sistemas.”

En la actualidad no sólo no sabemos cómo trabaja el cerebro, sino que tampoco comprendemos la inteligencia como un fenómeno general. Peor aun, no sabemos qué incluye la información –la materia prima con que trabajan las computadoras. Debe ser obvio que el futuro diseño de sistemas de procesado de información aun más complejos, en ausencia de una teoría general de la información, será cada vez más difícil. El objetivo de este trabajo es examinar la ‘información’ como un fenómeno físico. Se considera que este es uno de los primeros pasos de una serie de estudios que lleven a una teoría general de la información, y de ahí a una teoría de la inteligencia –sin cuyo conocimiento la ingeniería no puede surgir como una ciencia verdadera.

Information and entropy

Future developments of computer systems will be handicapped not by the limitations of hardware, but by our lack of understanding of the human reasoning processes. The development of three-dimensional chips, cryogenic superconducting, or optical systems –and in due course, biological computers– presages the emergence of generations of super information processors whose power will dwarf the present generation of devices as they, in turn, have dwarfed the capacity of the computers of the pre-transistor age. The effective application of such powerful future computers will be limited by the lack of an adequate theoretical basis for the processing of information. Gordon Scarrott (1986) has championed the need for a ‘science of information’ which should investigate the “natural properties of information such as function, structure, dynamic behavior and statistical features...” Such an effort should “...lead to a conceptual framework to guide systems design.”

At the moment, we not only do not understand how the brain works, we do not understand intelligence as a general phenomenon. Worse, we do not even know what comprises information –the very raw material upon which computers work. It must be obvious that the future design of ever more complex information

processing systems in the absence of a general theory of information is increasingly bound to run into difficulties. It is the function of the present paper to examine 'information' as a physical phenomenon. It is intended that this is among the first steps in a series of explorations leading to a general theory of information, and from there to a theory of intelligence –without which knowledge engineering cannot emerge as a true science.

Perspectiva histórica

Nuestra percepción del mundo es producto de nuestra experiencia histórica. Por ejemplo, no fue sino hasta que tuvimos una experiencia significativa con las máquinas del tiempo –los relojes mecánicos– que se desarrolló nuestro concepto del tiempo. Como el profesor Whitrow (1975) ha señalado, la mayoría de las sociedades previas a la sociedad occidental de las postrimerías del Siglo XVII tendían a considerar al tiempo de una manera bastante difusa y más de carácter cíclico que lineal. Los relojes disociaron al tiempo de los acontecimientos humanos. El invento de Christian Huygens de un reloj pendular exitoso a mediados del Siglo XVII le dio al mundo un aparato que pudo definir el tiempo en términos de unidades pequeñas, aisladas y repetitivas. Además, para efectos prácticos el abuelo de los relojes podía funcionar para siempre. Así permeó en la cultura occidental el sentido del paso del tiempo, minuto a minuto, adquiriendo el tiempo propiedades de homogeneidad y continuidad, es decir una fuerza por derecho propio. Recientemente G. Szamosi (1986) ha argumentado persuasivamente que el concepto occidental del tiempo derivó de los músicos medievales quienes, para desarrollar la polifonía, requirieron escribir la estructura temporal de las diversas melodías.

De manera similar, no fue sino hasta que tuvimos suficiente experiencia con aparatos de energía, en particular la máquina de vapor, que apareció la ciencia de la termodinámica. Fue la experiencia con una máquina de energía la que forzó a una definición mucho más clara del concepto 'energía'. Hoy estamos en una situación histórica paralela. Hasta hace poco habíamos tenido muy poca experiencia con máquinas de información. Tenemos ahora una nueva experiencia: la computadora –es decir, una máquina electrónica capaz de procesar información de una manera en la cual antes sólo podía realizarse dentro de nuestras cabezas. No sólo los especialistas (diseñadores de sistemas, científicos de la computación, bibliotecarios, etc.) se han venido preocupando cada vez más por la tecnología de la información, sino que nuestra actitud como civilización está siendo afectada por el advenimiento de las máquinas procesadoras de información.

La organización de la materia

Uno de los grandes logros alcanzado en las ciencias biológicas en las últimas décadas fue la decodificación del ADN (ácido desoxirribonucleico). No sólo ha sido posible establecer más allá de toda duda razonable que el ADN puede llevar información que se transmite de una generación a la siguiente, sino que ha sido posible decodificar la manera en la cual se comunican estos mensajes. Entre otros hallazgos interesantes, la historia del ADN descubrió el hecho de que los mensajes transmitidos por este sistema de información aparentemente son comprendidos por todas las formas de vida de este planeta –bacterias y girasoles, ratones y hombres. La cantidad y naturaleza de la información contenida en el ADN puede variar de un organismo al siguiente, pero el método de codificarla en una molécula de ADN es el mismo.



Conforme se dilucidó que la estructura del ADN contiene información capaz de ser transmitida, también se hizo claro que otras macromoléculas y estructuras celulares como el ARN (ácido ribonucleico), las proteínas celulares y las membranas, también poseen información transmisible. Es decir, estas sustancias pueden ser replicadas en la célula (y por lo tanto transferir la información a la siguiente generación de estructuras) o bien ser relevantes para su propio crecimiento actuando como formatos que moldean la organización futura de átomos y moléculas. No sólo los sistemas orgánicos pueden transmitir información, sino también los inorgánicos. Por ejemplo, la industria de los chips se basa en el hecho de que es posible obtener una forma de sílice altamente purificada dejando que los cristales de sílice ‘crezcan’ en las soluciones adecuadas. La organización, es decir el arreglo espacial de los átomos de tal cristal, actúa como un molde para los otros átomos que se van agregando, dando como resultado un arreglo no fortuito –trayendo orden al caos (Prigogine y Stengers, 1985). Esto nos lleva a una generalización amplia: todas las estructuras organizadas contienen información. Las estructuras no organizadas pueden existir sin contener alguna forma de información. Lo que es más, la adición de información a un sistema se manifiesta a sí misma provocando que el sistema se vuelva más organizado, o reorganizado.

La información tiene tanta realidad física como la materia y la energía: la organización es a la información lo que la masa es a la materia, o el momento a la energía mecánica (Stonier, 1986). El propósito de este trabajo es examinar con más detalle la relación entre información y entropía.

La segunda ley de la termodinámica

La segunda ley de la termodinámica establece que para cualquier sistema existe un estado de equilibrio hacia el cual ese sistema puede cambiar espontáneamente; en consecuencia, si hay un cambio en el sistema que lo aleje del equilibrio, tal cambio puede ocurrir sólo a expensas del desplazamiento de otro sistema hacia el equilibrio. Si tal sistema se mueve en una dirección determinada mientras se le opone continuamente una fuerza que tiende a frenarlo, puede lograrse que el sistema realice un trabajo útil. Es posible determinar el máximo trabajo útil obtenible de tal sistema: esta cantidad se denomina cambio de energía libre, y se denota por los símbolos ΔF o ΔG . La magnitud ΔG da la máxima cantidad de trabajo que puede obtenerse de un sistema bajo un determinado conjunto de condiciones.

La segunda ley de la termodinámica se expresa frecuentemente como la ecuación: $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, donde ΔH es el cambio en el contenido de calor a presión constante, o ‘entalpía’, T es la temperatura absoluta, y ΔS es el cambio en ‘entropía’.

La entropía es uno de los conceptos peor definidos de la ingeniería y las ciencias físicas. Para un estudiante principiante de ingeniería o ciencias, no hay mayor dificultad en comprender los conceptos asociados a ΔG , ΔH o T : el *cambio de energía libre* es representativo del máximo trabajo útil obtenible, el *cambio en el contenido de calor* del sistema es resultado de la energía agregada (o sustraída), y la *temperatura absoluta* es una medida del contenido absoluto de calor del sistema. Todo tiene sentido.

No para la entropía. Esta aparece como una cantidad matemática mística cuya realidad física se vuelve imposible de visualizar. El hecho de que los cambios de entropía puedan medirse con precisión no elimina el velo de misterio. A diferencia del calor, que también puede medirse precisamente, la entropía no es perceptible por nuestros sentidos físicos. La entropía está tan fuera del rango de la experiencia común como lo está la realidad de las abstracciones matemáticas para todos aquellos que no pueden o no quieren creer en ellas.

De hecho, la entropía es una expresión matemática que describe el desorden. *No* es una expresión directa del contenido de calor o de su medida –la temperatura–, aunque está relacionada con ambos.

Entropía e información

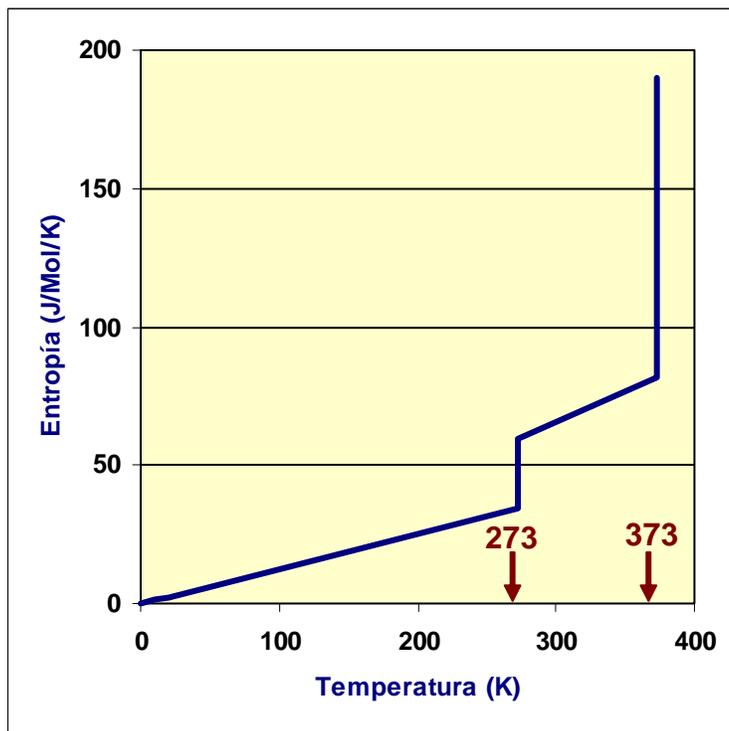


Fig. 1

La Figura 1 presenta la relación entre entropía y temperatura del agua, e ilustra que la entropía es una función de la organización de un sistema más que una mera función de su contenido de calor. Mientras la mayor parte de la curva demuestra una correlación general entre temperatura y entropía –es decir, conforme aumenta la temperatura lo hace la entropía–, hay dos discontinuidades mayores: una alrededor de los 273° K y otra a los 373° K. Por supuesto, estas son las temperaturas a las que el hielo se funde y el agua se convierte en vapor.

No puede ser una mera coincidencia que estos dramáticos incrementos en entropía, estas discontinuidades obvias, ocurran exactamente a las temperaturas donde podemos ver con nuestros propios ojos tan profundos cambios en la estructura de la materia (en este caso del agua).

Una lectura cuidadosa de la Figura 1 indica que la entropía debe de ser una función de la desorganización, o del desorden, puesto que se correlaciona con el movimiento crecientemente fortuito de las moléculas. Es este movimiento cada vez más azaroso el que ha llevado a veces a la percepción errónea de que la entropía es una función simple y directa del contenido de calor. La aplicación de calor a un cuerpo material ocasiona que las partículas del sistema vibren y se muevan al azar con velocidad creciente. Sin embargo, este proceso da por resultado no uno sino dos fenómenos: un aumento en el contenido energético del sistema –medurable como un incremento de temperatura–, y un decremento en la organización del sistema –medurable como un aumento de entropía. Aunque los dos, temperatura y entropía, van frecuentemente de la mano, representan procesos muy distintos. Esto se observa claramente siempre que uno compara los cambios de entropía con los cambios de temperatura en aquellas regiones donde ocurre un cambio mayor en la estructura de la materia: un gran cambio de entropía puede ocurrir sin cambio de temperatura.

De tal manera, un cambio de entropía puede ocurrir no sólo por un cambio en el contenido de calor del sistema, sino también por un cambio en su organización. Podemos desorganizar un sistema aplicando calor, como cuando un cubo de hielo se funde extrayendo calor de su derredor. Alternativamente, podemos desorganizar un sistema alterando su estructura, como al disolver un cubo de azúcar en agua. Nótese que en este segundo caso el cubo de azúcar que se disuelve realmente está emitiendo calor a su alrededor. De acuerdo con el postulado básico de que la organización es un reflejo del contenido de información de un sistema, podemos postular el teorema siguiente: la entropía de un sistema puede alterarse alterando su contenido de calor o su organización. En cualquier caso el resultado es un cambio en el contenido de información del sistema.

La ecuación de Schrödinger

Si un aumento de entropía representa una pérdida de organización, es decir una pérdida de información estructural, ¿cuál es entonces la relación precisa entre entropía e información? Para explorar este concepto empecemos con algunas ideas interesantes sugeridas hace más de 60 años por Erwin Schrödinger (1944). Partiendo de los trabajos de Boltzmann, Schrödinger estudió el significado estadístico de la entropía. La ecuación de Boltzmann, según Schrödinger, es: Entropía = $k \log D$, donde k es la constante de Boltzmann ($3,2983 \times 10^{-24}$ cal/° C) y D es “una medida cuantitativa del desorden atómico del cuerpo en cuestión”.

Schrödinger continúa indicando que el desorden (D) revela “... en parte el movimiento debido al calor, y en parte lo que es una mezcla de diferentes tipos de átomos y moléculas que se separan al azar en lugar de hacerlo ordenadamente, por ejemplo... azúcar y moléculas de agua...” Esto es, la difusión gradual del azúcar en un cuerpo líquido (como en una taza de te) representa un aumento del desorden (D). De manera similar, la adición de calor “...aumenta la confusión del movimiento debido al calor...”, y por tanto incrementa el desorden (D). Schrödinger enfatiza particularmente que cuando uno funde un cristal se “...destruye el arreglo ordenado y permanente de los átomos y moléculas y convierte el enrejado del cristal en una distribución fortuita continuamente cambiante.”

El subtítulo del libro de Schrödinger es *Aspectos físicos de la célula viva*. Entre otras cuestiones, se pregunta cómo expresar en términos estadísticos la tendencia de los sistemas vivientes a mantener tan bajos niveles de entropía. Sugiere que un organismo vivo “...se alimenta de entropía negativa...” Argumenta que si D es una medida del desorden, su recíproco $1/D$ puede ser considerado como una medida directa del orden. Por lo tanto, reformula la ecuación de Boltzmann de la manera siguiente: $-(\text{Entropía}) = k \log (1/D)$. En otras palabras, “la entropía, considerada con signo negativo, es por sí misma una medida del orden.” De esta manera, Schrödinger explica por qué un organismo mantiene bajos sus niveles de entropía. Lo hace “...extrayendo orden de su ambiente”.

La información como una función exponencial inversa de la entropía

La ecuación de Schrödinger es nuestro punto de partida. Empecemos con las dos consideraciones de Schrödinger: uno, que el desorden (D) es equivalente a la función de probabilidad de Boltzmann (W) tal como aparece expresada en su ecuación original $S = k \log (W)$, y dos, que el orden es el recíproco del desorden, esto es $Or = 1/D$, donde Or es una medida del orden del sistema.

Introduzcamos una tercera consideración. El contenido de información estructural de un sistema (Is) es una función del orden: $Is = f (Or)$

Para ser más precisos, la información estructural y la organización están directa y linealmente relacionadas. Así como a mayor contenido de materia de un sistema mayor es su masa, cuanto mayor información contiene tanto mayor es su estado de organización. Se podría argumentar, por ejemplo, que la cantidad de información contenida en un sistema está en función de las uniones que vinculan a las subunidades en un todo organizado (uniones que pueden romperse calentando el sistema). Sin embargo, hasta aquí es suficiente con asumir que la información estructural y la organización están directa y linealmente relacionadas, de modo que la ecuación $Is = f (Or)$ puede escribirse como $Is = c (Or)$, donde c es una constante a definir.

Como corolario, podemos considerar al orden como una función de la información, es decir: $Or = Is/c$, lo que significa $D = 1/Or = c/Is$. Como $D = W$, podemos sustituir en la ecuación original de Boltzmann el término c/Is para obtener (a) $S = k \log (c/Is)$. Despejando a Is se obtiene (b) $Is = c e^{-S/k}$.

Las ecuaciones (a) y (b) definen la relación fundamental entre la información estructural (Is) y la entropía (S). En la Figura 2 se presenta una gráfica de esta relación.

Entropía positiva

La Figura 2 muestra que mientras la entropía (S) aumenta, la información (I) decrece. Conforme la entropía se aproxima al infinito, la información se aproxima a cero. Puede ser difícil visualizar cómo un gas consistente de moléculas que se mueven al azar puede poseer alguna información. La curva que relaciona información con entropía debería caer rápidamente a cero (I) conforme uno se mueve a la derecha a lo largo del eje S , más que ser asíntótica a él.

No obstante, un gas consiste de moléculas y las moléculas contienen información estructural. La organización intrínseca de las moléculas afecta su comportamiento como gas. Esto es lo que explica que dos gases distintos, calentados igualmente bajo condiciones estándares, presenten cambios diferentes en los incrementos de entropía. Calentar un gas puede aumentar la velocidad a la cual se mueven las moléculas, pero tal aumento ocasiona sólo un incremento marginal de azar (desorden). Por lo tanto, la pérdida de organización a nivel intermolecular es mínima. A nivel intramolecular no se afecta la estructura interna de las moléculas. Por tanto, la pérdida total de información es escasa.

Pero si se sigue calentando el gas ocurrirán discontinuidades a las que pueden observarse grandes saltos de entropía asociados con la destrucción de la organización a niveles más fundamentales (véase la revisión de Greiner y Stocker, 1985). La primera de ellas implica la ionización de los gases conforme la intensidad de las colisiones moleculares ocasiona que los electrones salgan despedidos y los átomos se disocian. Por ejemplo, el vapor calentado a mil grados centígrados se vuelve un plasma de iones y electrones. A niveles de energía más altos, la propia integridad de los átomos queda en riesgo. En los estados normales de la materia el núcleo atómico es como una gota de líquido adentro de la cual los nucleones se mueven libremente pero raramente se aventuran más allá de su superficie. Aplicando energías suficientemente altas, la materia nuclear llega a 'hervir'. A temperaturas aun más altas, los nucleones mismos se desorganizan para dar lugar a un plasma de quarks y gluones (un *quagma*).

De particular interés es la relación de la entropía con esas transformaciones. Un grupo de la Universidad Estatal de Michigan ha utilizado el efecto de la entropía sobre el espectro de masa para medir la entropía producida en colisiones. El grupo encontró un aumento de la entropía producida en colisiones de partículas a energías intermedias considerablemente más alto que el que se esperaba a partir de cálculos basados en las propiedades de la materia nuclear normal. Lazlo P. Csernai de la Universidad de Minnesota sugirió que la entropía extra puede reflejar la transición de un líquido a vapor, y describió la secuencia de eventos que podrían conducir a tal observación.

El modelo hidrodinámico de colisiones de iones pesados descansa en conceptos termodinámicos. Estos asumen que las partículas en movimiento se mueven al azar. Es totalmente cierto que esta condición se cumple dentro de la materia del núcleo. Es decir, las partículas muy bien pueden interactuar entre sí. Sin embargo, las moléculas de gas en los sistemas termodinámicos clásicos se asumen ideales, esto es que no interactúan entre sí. Obviamente, este no es el caso en el mundo real. Por lo tanto, aun si las partículas nucleares interactúan ello no impide un análisis termodinámico. El aumento inexplicado de entropía en las reacciones nucleares probablemente está asociado con el rompimiento de cuerpos organizados.

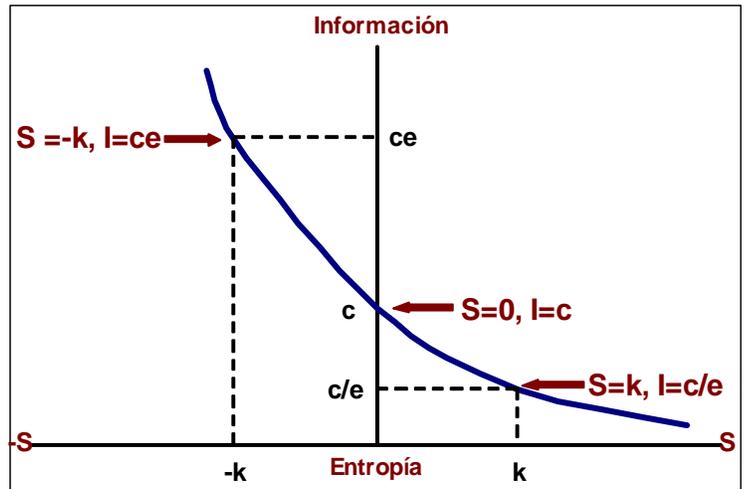


Fig. 2

El calor latente absorbido cuando el hielo se funde refleja el calor extra requerido para convertir una estructura cristalina en un líquido. Lo mismo es cierto cuando el agua líquida se evapora. Los puntos a lo largo de la curva calor-temperatura en los que se observa una discontinuidad en la relación entre la aplicación de calor, el aumento de temperatura (o la ausencia de ello) y el incremento de entropía, están siempre asociados con cambios básicos en la organización de la materia. Este principio es válido no sólo a cambios en la organización inter-molecular, sino también en la organización sub-molecular, sub-atómica y sub-nuclear.

A la luz de ello, uno esperaría que el estado de ‘cero información-entropía infinita’ se acerque cuando el sistema consiste de un plasma de partículas fundamentales puras que no contiene la menor organización (no sólo al nivel inter sino ni siquiera al nivel intra-partículas). El estado de ‘cero información-entropía infinita’ se alcanzaría cuando incluso las partículas fundamentales son transformadas (¿evaporadas?) en energía pura. En este punto la adición de más energía no tendría mayor impacto en la organización de la materia, dado que esta ya no existiría. En otras palabras, el estado de ‘entropía infinita’ no sólo comprendería el estado de información cero sino también el estado de cero materia.

Entropía negativa

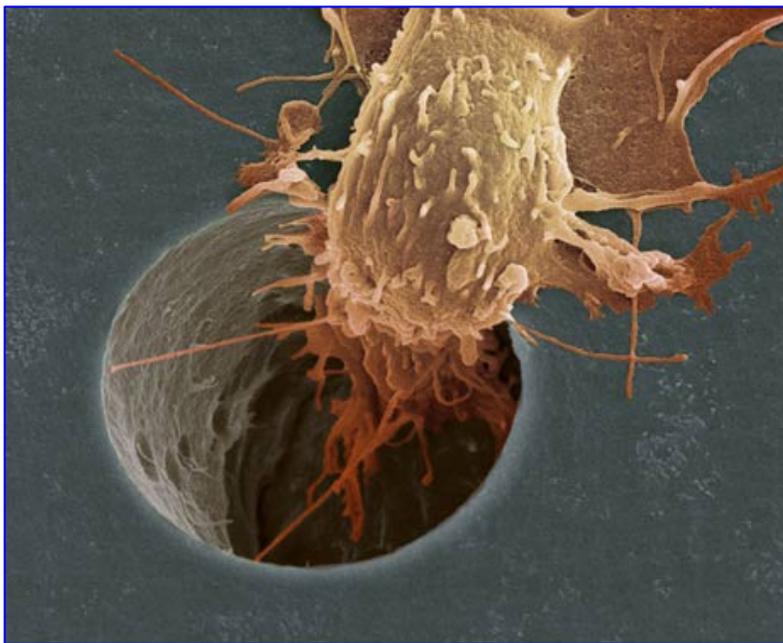
Las leyes de la termodinámica son tan aplicables a los sistemas químicos y biológicos como lo son a los sistemas físicos. Pero los sistemas biológicos son profundamente distintos de los físicos. Puesto que hay una entrada constante de energía en los sistemas biológicos desde una fuente distante (el sol), no resulta extraño que los científicos biólogos encuentren que en los sistemas que estudian hay con frecuencia reacciones en las que la entropía decrece continuamente. Al biólogo no le preocupa el hecho de que tal proceso ocurra solamente a expensas de la actividad solar (y por tanto aumentando la entropía total del universo). La experiencia rutinaria del biólogo con la acumulación de entropía negativa en el sistema que estudia, lo lleva obviamente a un concepto de la materia diferente del que tiene el físico o el ingeniero que casi nunca lo ve. No es por ello sorprendente para el biólogo que la curva que grafica la relación entre información y entropía indique que mientras la información siempre permanece positiva la entropía pueda volverse negativa. Esto lleva a la pregunta: ¿qué es la entropía negativa?

La entropía mide lo fortuito o desorganizado de la materia. La entropía contenida en la materia puede reducirse de una de estas dos maneras: extrayendo calor o agregando información. Si todo el calor posible pudiera ser extraído de un sistema, su temperatura sería de 0° K y, de acuerdo con W. Nernst, su entropía también sería cero. Esto se conoce como la Tercera Ley de la Termodinámica. La física de la información puede modificar esta ley. Si se acepta que la entropía es la medida de la organización, estando inversamente relacionadas, entonces a 0° K no hay nada que impida que el sistema se pueda volver aun más organizado agregando más información. Esto es, mientras que es imposible extraer más calor de un sistema que ya está a 0° K, volviendo así imposible reducir más la entropía (hacia un valor negativo) por la extracción de más calor, no hay ninguna razón teórica que impida que se reduzca la entropía agregando información. Y así como la temperatura puede descender de 0° F, punto que Fahrenheit seleccionó porque era lo más frío que se podía alcanzar en su época, la entropía puede seguir descendiendo del punto cero que Nerst seleccionó con base en sus estudios.

Hay otra manera de conceptualizar la posibilidad de que la entropía descienda de cero: visualizar una estructura aun más improbable que un cristal perfecto en el cero absoluto. ¿Qué podría ser más improbable que tal cristal? Un cristal perfecto a temperatura ambiente. Aunque la materia no ha sido investigada propiamente, las moléculas y sistemas orgánicos presentan propiedades que los cristales inorgánicos tienen cerca del cero absoluto. En primer lugar, los enlaces covalentes y de otro tipo –como los electrones pi resonantes–, estabilizan vínculos interatómicos de materia altamente organizada y compleja en estructuras fuertemente unidas. Es decir, a temperaturas bastante superiores a 0° K la restricción de libertad de movimiento de los

átomos en una molécula orgánica es igual a la de un cristal inorgánico a 0° K. Esta restricción de movimiento en un cristal orgánico organizado, tal como una molécula de proteína, es probablemente la causa de los grandes cambios de entropía cuando se desorganiza.

El segundo fenómeno que ocurre a 300° K en sistemas orgánicos y que sólo se encuentra cerca del cero absoluto en los inorgánicos, es la superconductividad. De nuevo, la materia no ha sido investigada apropiadamente, pero A. Szent-Gyorgyi (1968) sugirió hace buen tiempo que la función de una molécula como el caroteno es facilitar el movimiento de los electrones con una pérdida mínima de energía. Ciertamente, si se consideran las estructuras de resonancia electrónica no sólo de los carotenoides sino también de los fenoles, la clorofila, la hemoglobina, las membranas y otros sistemas similares, que se hallan en abundancia en todas las células, y se agregan a los hallazgos que los bioquímicos han alcanzado al dilucidar una miríada de sistemas metabólicos de transporte de electrones, se concluirá que es muy probable que muchas moléculas y sistemas orgánicos se comporten como superconductores.



Y aun más improbables y altamente organizadas que las moléculas y sistemas orgánicos son las células vivientes. Regresando a la Figura 2, conforme nos movemos en la curva de derecha a izquierda y atravesamos el eje I, nos movemos del reino de la termodinámica tradicional al reino de la biología y la física de la información. A medida que vamos hacia arriba de la curva en el cuadrante izquierdo estamos trazando la evolución de un arreglo de materia y energía aun más improbable y complejo. En la actualidad los sistemas biológicos, con pequeñas excepciones (como ciertas bacterias quimiosintéticas), obtienen su energía directa o indirectamente del sol. La luz, como hemos discutido en otro lado (Stonier, 1986), es una forma de energía con

un elevado componente de información. En general, los sistemas biológicos absorben calor –sea en forma de energía o de productos. Cuando generan calor, este es un subproducto de reacciones metabólicas y refleja usualmente una ineficiencia del sistema. La única excepción evidente es la producción de calor para mantener constante la temperatura en animales de sangre caliente. Esta necesidad de temperatura constante refleja sin duda un aumento de eficiencia de sistemas metabólicos avanzados que operan en un ambiente altamente organizado. Para mantener los muy elevados niveles de información estructural en el sistema, los cambios de entropía asociados con cambios de temperatura deben mantenerse al mínimo. El sistema de procesamiento de información más avanzado conocido es el cerebro de los mamíferos. Cuando la temperatura se eleva más allá de un límite crítico, así sea ligeramente (como en una fiebre alta), el sistema empieza a fallar y el individuo alucina. Por otro lado, un descenso relativamente pequeño de temperatura conduce a la narcosis. Así, incluso cambios relativamente menores de entropía (inducidos por el calor) cambian la delicada organización del sistema hasta interferir con el procesamiento efectivo de la información.

Por lo tanto, en la única excepción en la que los sistemas biológicos producen y utilizan calor, la función del calor agregado no es proporcionar energía sino mantener una temperatura estable para minimizar los cambios de entropía inducidos desde afuera. En otras palabras, el calor se utiliza para ayudar a estabilizar la organización –siendo un ejemplo donde la aplicación controlada de calor constituye una entrada de

información. Otro, que ocurre en un sistema físico inorgánico, es la inestabilidad de Benard y representa también un ejemplo en el que la energía se convierte en información. Esta inestabilidad aparece bajo ciertas circunstancias, cuando se calienta la superficie inferior de una capa líquida horizontal (como lo indican Prigogine y Stengers, 1985). Se forma un gradiente vertical de temperatura con un flujo permanente de calor de abajo hacia arriba. Si el gradiente no es demasiado grande, el calor se transmite sólo por conducción. Pero conforme el calor se aumenta ligeramente se alcanza un valor límite en el cual aparece la convección para transferir calor del fondo a la superficie. En la inestabilidad de Benard, este proceso puede implicar un movimiento de moléculas sumamente organizado. Prigogine y Stengers (1985) describen que “la inestabilidad de Benard es un fenómeno espectacular... Millones de moléculas se mueven coherentemente formando celdas hexagonales de convección de un tamaño característico.” En lugar de producir un mero aumento de desorganización por el aumento de calor, la inestabilidad de Benard crea estructuras que ayudan a transferir calor a través de la capa de líquido. Los autores también resaltan que “...la transferencia de calor era considerada como una especie de desperdicio en la termodinámica clásica. En la celda de Benard se vuelve una fuente de orden.”

Ese es, por tanto, un caso evidente en el que la aplicación de energía da por resultado un incremento en la organización del sistema. Esta forma particular de organización se mantiene sólo en la medida en que hay un flujo de calor de magnitud adecuada atravesando la capa horizontal de líquido. Cuando la energía se retira la estructura se colapsa –la información desaparece. (Por supuesto, si la aplicación de calor es demasiado grande, el líquido no puede transportarlo hacia arriba de manera suficientemente rápida y las corrientes de convección se vuelven más y más turbulentas conforme el líquido empieza a hervir.)

Mientras los físicos en el pasado han estado visualizando un universo que se dirige hacia un estado de completo azar sin ninguna estructura –que llevaría finalmente a su ‘muerte entrópica’–, los biólogos han venido observando lo opuesto: la evolución de sistemas crecientemente complejos. Para los biólogos, virtualmente todo sistema estudiado ha incrementado su complejidad conforme evoluciona. El proceso siempre es el mismo, sea que estudien el ADN y los sistemas genéticos relacionados, los sistemas metabólicos, las estructuras celulares, el desarrollo de órganos como el corazón o el cerebro, la evolución de los organismos, los ecosistemas o la biosfera. Sistemas simples se vuelven más complejos, más diferenciados, más integrados, tanto dentro de sí mismos como hacia afuera en su ambiente –en resumen, los sistemas biológicos evolucionan para volverse crecientemente improbables.

El resto del universo puede dirigirse a un estado de máxima entropía, pero en este planeta (con la ayuda del sol) la entropía está disminuyendo continuamente. Esto es cierto no sólo para los sistemas biológicos, sino que se vuelve más evidente cuando uno observa la evolución cultural, la cultura tecnológica y la evolución de los sistemas humanos de información.

Magnitudes de la información

El hecho de que (I) como función exponencial inversa de (S) pueda implicar magnitudes ridículas no debe detenernos. La probabilidad de que ocurran espontáneamente estructuras sumamente organizadas a temperaturas superiores a 0° K debe de ser infinitesimal. Los enormes números asociados con la improbabilidad de sistemas avanzados de información llevan a que uno se pregunte de entrada cómo tales sistemas pueden ser posibles. La respuesta está en las propiedades recurrentes de los sistemas de información. Los sistemas organizados tienen resonancias. Las resonancias conducen a oscilaciones. Las oscilaciones representan ciclos temporales en los cuales pueden ocurrir cambios. Estos cambios pueden disminuir o amplificar las oscilaciones existentes. O pueden crear nuevas resonancias y excitar nuevas series de oscilaciones. A mayor complejidad del sistema, mayor probabilidad de introducir cambios en él durante un ciclo determinado. De ahí el crecimiento exponencial de la información.

Poundstone (1985) ve al universo como “un objeto geométrico definido de manera recurrente”. Esto significa que puede construirse complejidad sobre la complejidad. La improbabilidad se alimenta de más improbabilidad. Uno no arranca de cero información y se atiene a que los proverbiales monos mecanografiando al azar lleguen a componer el Hamlet (Bennet, 1977). Por el contrario, un sistema de información sumamente avanzado llamado William Shakespeare nació en un sistema de información aun más avanzado llamado sociedad Isabelina –y en su momento agregó mayor información conforme el universo avanzaba otro ciclo.

Sumario y conclusión

Los sistemas futuros de computación tendrán que sustentarse cada vez más en los avances en la ingeniería del conocimiento para que puedan ser aplicados de manera efectiva. De momento, la ingeniería del conocimiento es un negocio fortuito que debe sustentarse en métodos empíricos de prueba y error, siendo aún la inteligencia artificial incapaz de cumplir las expectativas que levantó décadas atrás. Al menos una parte del problema, tal vez la mayor parte, es nuestra ignorancia. No sabemos cómo trabaja el cerebro, no entendemos el fenómeno de la ‘inteligencia’ y ni siquiera comprendemos qué es ‘información’. Esto último resulta particularmente irónico ya que la información es la materia prima con la que trabaja una computadora. Obviamente, una de las tareas mayores que enfrenta la ingeniería del conocimiento es bosquejar una teoría general de la información.

Este trabajo es un primer paso en una serie de estudios que, esperamos, llevarán a una auténtica teoría de la información. En síntesis, este trabajo propone que:

1. La información es una propiedad física del universo, tan ‘real’ como la materia y la energía. La existencia del ADN mucho antes de que apareciera el cerebro de los mamíferos, demuestra que la información no es una invención de la mente humana.
2. Todo sistema que presente organización contiene información. La organización es a la información lo que la masa a la materia o el momento a la energía mecánica.
3. A mayor organización de un sistema, mayor su contenido de información. Se asume que así como hay una correlación directa y lineal entre materia y masa, también existe una correlación directa y lineal entre información y organización: $I_s = c (Or)$.
4. La entropía de un sistema es una medida de su estado de desorganización. Entropía e información están inversamente relacionadas: $S = k \log (c/I_s)$.
5. A medida que se desarrolla una teoría de la información y se vuelve posible medir la entropía de sistemas de información avanzados, los ingenieros del conocimiento no deberían sorprenderse si encuentran que se viola la Tercera Ley de la Termodinámica. Los sistemas avanzados de información tendrán valores negativos de entropía, siendo estos valores negativos resultado no de extraer calor sino de agregar o acumular información.
6. Sea lo que la unidad básica de información física pruebe ser, los sistemas avanzados de información contendrán tales magnitudes de unidades básicas que requerirán notaciones matemáticas que habrán de empujarse las notaciones actualmente utilizadas por los astrónomos. Sólo se necesita reflexionar sobre la improbabilidad termodinámica de tener un universo físico e inorgánico que contenga a dos seres humanos discutiendo sobre la improbabilidad termodinámica de su discusión. Queda por ver si esas gigantescas magnitudes constituirán un problema para dilucidar el contenido verdadero de información de, por ejemplo, un sistema experto.

Referencias

- Bennet, W.R. (1977). How artificial is intelligence? *Amer. Scient.* 65, pp. 694-702.
- Greiner, W., and H. Stocker (1985). Hot nuclear matter. *Scientif. Amer.* 252(1), pp. 58-66.
- Poundstone, W. (1985). *The Recursive Universe*. Contemporary Books, Chicago.
- Prigogine, I., and I. Stengers (1985). *Order Out of Chaos*. Fontana, London.
- Scarrot, G. (1986). The need of a 'science' of information. *Jour. Inform. Technol.* 1(2), pp. 33-38.
- Schrödinger, E. (1944). *What is Life?* Cambridge University Press.
- Stonier, T. (1986). Towards a new theory of information. *Telecom. Policy* 10(4), pp. 278-281.
- Stonier, T. (1986). What is information?, in *Research and Development in Expert Systems III*. M.A. Bramer (Ed.), Cambridge University Press, pp. 217-230.
- Szamosi, G. (1986). *The Twin Dimensions: Inventing Time and Space*. McGraw-Hill, New York.
- Szent-Gyorgyi, A. (1968). *Bioelectronics*. Academic Press, New York.
- Whitrow, G.J. (1975). *The Nature of Time*. Penguin Books, Harmondsworth, Middlesex.

Nueva columna del Boletín del GRC ***Susan Hodgson***

Geothermal History, es una nueva columna regular del **Boletín** del GRC (*Geothermal Resources Council*), que está abierta a los historiadores de la geotermia en todo el mundo. Si usted es parte de la comunidad geotérmica, seguramente tiene guardado algo que es parte de la historia de la geotermia. Cada experiencia geotérmica merece ser publicada... desde antiguas creencias y usos que usted haya descubierto hasta desarrollos que haya observado que desembocaron en prácticas actuales. Todo es importante: herramientas, ideas, métodos operativos.

Las dimensiones de los asuntos históricos no importan. Pueden ser muy cortos o bastante largos, un párrafo o un ensayo, un dibujo o una foto. El objetivo es salvar nuestra herencia geotérmica y, por fortuna, la publicación es una buena manera de hacerlo. Mande sus ideas de publicación a cosmos@dcn.org (Necesitamos comentar sobre sus fotos antes de que las mande por correo electrónico debido a restricciones de descarga.)