

Termodinámica y evolución

Excmo Sr. Presidente, Autoridades, Excmo. Sras y Sres Académicos, señoras y señores, queridos amigos

A lo largo de estas líneas se invita a una reflexión sobre las dos ramas de la evolución: la espontánea de la materia en la biosfera y la cultural que surge del córtex humano y avanza a un ritmo millones de veces mas rápido que la evolución espontánea. La termodinámica es el lenguaje adecuado para intentar comprender las transformaciones energéticas que generando la evolución tienen como fuente la energía de alta calidad que nos llega continuamente del sol. Ambas evoluciones, darwiniana y cultural, son manifestaciones de la tendencia de la materia a conservar parte de la calidad de la energía que regala el sol sin convertirla inmediatamente en puro desorden.

Existe una aparente contradicción entre la perspectiva que nos ofrece el segundo principio de la termodinámica y la que señalan la biología y la sociología. Mientras el segundo principio indica que la evolución espontánea de los sistemas fluye hacia estados de desorden creciente, la evolución biológica nos muestra un ascenso progresivo de complejidad y orden. Citando a Miguel Angel Aguilar amigo físico y sobresaliente periodista, biznieto de D. Antonio Aguilar Vela a quien correspondió la medalla 32 de esta casa entre 1855 y 1882, a la pregunta: *¿Es posible conseguir una pequeña fortuna con un negocio ruinoso?* Se puede responder: *Si, siempre que al iniciarse la experiencia se cuente con una gran fortuna.* Esta verdad ilustra la enorme generalidad con la que las condiciones iniciales influyen en la evolución de los sistemas. Nuestra gran fortuna es la calidad de la energía que nos llega del sol, el negocio ruinoso

es el que describe el segundo principio de la termodinámica, y nuestra pequeña fortuna es la biosfera. Para conseguir no degradar toda la calidad de la energía entrante es preciso utilizar motores ó máquinas. El orden total de la biosfera, obtenido al sumar el de las islas ordenadas y el del mar de desorden, es siempre menor al orden que nos llega del sol.

Todo el proceso de evolución y progreso reposa sobre dos conceptos: la máquina y la información.

Evolución y progreso

Durante los siglos XVIII y XIX surgió un cambio fundamental en la concepción que los humanos tenían de la Naturaleza. En la nueva representación, la Naturaleza obedecía leyes universales que se podían expresar en lenguaje matemático, gracias a la experimentación y al estudio cuantitativo de las magnitudes físicas. La propagación de estos conocimientos se hizo posible mediante el uso de la imprenta. Un momento histórico de máxima relevancia social y científica por sus trascendentes y variadas implicaciones fue la Revolución Industrial. Con ella nació el capitalismo pero también la termodinámica y con ésta, quien lo hubiera dicho entonces, las bases sólidas de la química y la biología de nuestros días. Desde otra perspectiva el significado de la Revolución Industrial podría asociarse al momento de la historia de nuestro Planeta en la que se cruzan la evolución natural y la evolución cultural también conocida como progreso.

Resulta apasionante el descubrimiento de que la materia que conocemos en nuestro entorno, en la biosfera, es capaz de organizarse para generar vida. Fue la experimentación científica la causa del abandono del vitalismo como

marco conceptual de la biología. En 1895 Eduard Buchner puso de manifiesto que las levaduras no eran necesarias para producir fermentación sino que bastaba con la acción catalizadora de sustancias (enzimas) que aunque presentes en las levaduras pueden ejercer su acción cuando se separan de ellas. En los años 50 del siglo XX, Stanley Miller y Harold Urey, sintetizaron aminoácidos en el laboratorio, mediante descargas eléctricas en una atmósfera adecuada. Ambos experimentos no dejaron resquicio a la certeza de que la materia involucrada en los procesos biológicos y sus leyes químico-físicas son las mismas que rigen el comportamiento de los seres no vivos que se encuentran en nuestro entorno. La biología moderna como bien percibió y explicó Jacques Monod, hace mas de cincuenta años en su célebre ensayo “Le hasard et la nécessité”, al haber desvelado en una gran parte el “secreto de la vida” se convierte en la base inevitable de apoyo de cualquier reflexión especulativa sobre la naturaleza humana. Jesús Mosterín en el prólogo de su obra “La naturaleza humana” escribe: “sería anacrónico hablar de la naturaleza humana sin tener en cuenta los genes en los que se articula y codifica”.

La síntesis de las disciplinas actuales mas desarrolladas ha resucitado a Heráclito para establecer con rigor que “*Nada permanece excepto el cambio,.. todo fluye..*”

La evolución cósmica es el estudio de los cambios en el ensamblaje y la composición de la radiación, la materia y la vida a través de todo el tiempo. Se trata, por tanto, de todos los cambios físicos, biológicos y culturales que han conducido a la formación de nuestra galaxia, nuestro Sol, nuestra Tierra y de nosotros mismos. El resultado es una gran síntesis evolutiva que implica y correlaciona una amplia variedad de especialidades científicas. En palabras de Eric Chaisson: “*se requiere una nueva*

narrativa épica que se extienda desde el big-bang hasta el ser humano”. En este esfuerzo es imprescindible mantener con rigor la austeridad intelectual que evite tanto las simplificaciones como la influencia de la ideología en los aspectos puramente científicos.

Fruto singular del proceso evolutivo y de la complejidad biológica es el cerebro humano. Siendo hijo de la evolución es capaz de liberarse parcialmente de sus designios y, de imitarla consciente o inconscientemente. Un ejemplo de imitación inconsciente es el descubrimiento de la máquina de vapor que comparte mucha física con las nanomáquinas que constituyen la factoría celular de transformaciones energéticas. La diferencia esencial entre ambas se encuentra en su origen, unas fueron recientemente inventadas en el siglo XVIII mediante el cerebro de artesanos. Las otras, las máquinas biológicas como el propio cerebro de los científicos e inventores, lo fueron paulatinamente durante miles de millones de años mediante la dinámica de la evolución.

Cualquier descubrimiento, más si se trata de un nuevo instrumento, capacita el conocimiento de algo nuevo. Nos permite medir una magnitud, encontrar las reglas matemáticas o leyes que gobiernan los resultados de esas medidas y posteriormente encontrar el principio del cual puede derivarse esa ley como una mera consecuencia. El método científico permite al cerebro humano que vive en una escala de tiempos y espacios completamente despreciables frente a la escala cosmológica desafiar a la selección natural y defenderse del ciego fluir de la Naturaleza infinita.

Uno de los ejemplos mas ilustrativos de la capacidad de abstracción del cerebro lo podremos encontrar en los sutiles argumentos que utilizó un joven oficial francés, Nicolas-Leonard-Sadi Carnot (1796-1832), para

descubrir los principios generales en que se basan las máquinas térmicas. Y que se podrían resumir así: *Allí donde exista una diferencia de temperaturas se puede producir fuerza motora. La máxima eficiencia de una máquina trabajando entre dos focos a distinta temperatura se alcanza cuando los elementos que forman la máquina no sufren cambios de temperatura que pudieran no ser debidos a un cambio de volumen.* Esta última frase está entresacada del único escrito de Carnot, fechado en 1924, del que se publicaron seiscientas separatas sufragadas por el autor y titulado ***“Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu”***. La aparente dificultad de la frase se encuentra en que contiene implícitamente el concepto de proceso reversible.

La reversibilidad es una característica ideal de las transformaciones entre las diversas formas de energía y se alcanza cuando los gradientes de magnitudes intensivas que las generan (de temperatura, de concentración, de presión, de afinidad química ó de potencial eléctrico) son infinitesimales. En cada etapa del proceso el sistema se encuentra en equilibrio. Consecuentemente una reversibilidad absoluta es imposible en los cambios reales, ya que en perfecto equilibrio no existen transformaciones. Sin embargo podemos acercar los procesos reales a esa condición ideal. La contribución más importante de James Watt fue una lúcida modificación de la máquina de Thomas Newcomen que supuso una aproximación a la reversibilidad del mecanismo motor. La Naturaleza mediante la evolución también ha buscado en aras de la eficiencia de las transformaciones energéticas la reversibilidad de los procesos biológicos. La multiplicidad de etapas citocromáticas que constituyen el proceso de oxidación de la glucosa, en el complejo ciclo de Krebbs, refleja el afán de la selección natural por primar lo reversible. El amplio consenso sobre las ventajas de la reversibilidad supera al ámbito de la ciencia y la tecnología y

se manifiesta en múltiples reglas aceptadas en el marco de la vida política y social: ¿qué mejor razón podría justificar la limitación temporal de las legislaturas en los sistemas democráticos?

No existiría aumento alguno de desorden si células y máquinas funcionaran reversiblemente. Solo la reversibilidad de todos los procesos de transformación energética nos permitiría cimentar la deseada sostenibilidad. Releyendo a Carnot y a Clausius, uno estaría tentado de definir el progreso como la sucesión temporal de logros en la disminución de la irreversibilidad de los procesos tecnológicos.

Inspirado por las conclusiones de Carnot, Rudolf Clausius (1822-1888) introdujo el concepto matemático de entropía cuyo significado sería mas tarde explicado por Ludwig Boltzmann (1844-1906) en un marco estadístico. El concepto de entropía tan asociado al segundo principio de la termodinámica encierra una gran dificultad de comprensión. Pero es básico ya que gobierna no solo todos los procesos de transformación de la energía sino incluso también los de la información. En equilibrio un sistema aislado tiene entropía máxima lo que implica la existencia de una flecha del tiempo que se dirige hacia el desorden global.

La evolución darwiniana y el progreso tecnológico se comprenderán bien cuando se conozca con el rigor característico de la ciencia dura la fuerza motriz de esta tendencia a evolucionar en complejidad para aproximar los procesos a la reversibilidad. La materia de la biosfera bañada por un abundante y generoso flujo de muy rica energía, y sometida a la necesidad de degradarla según dicta el segundo principio, parece luchar para hacerlo de manera que conserve lo máximo posible su calidad. La vida sería en este contexto una vía que ha encontrado la materia para degradar reguladamente

la riqueza contenida en los fotones que nos llegan del sol. La fracción máxima de la energía de un fotón solar que puede convertirse, mediante un mecanismo o un catalizador, en energía química o mecánica es $(1-(T/T^*))$ donde T es la temperatura de la tierra y T^* la del sol. De cada fotón podríamos extraer como máximo un 95% de su energía como energía útil. Esta fracción es tan alta por lo alta que es la temperatura del sol, 6000K, comparada con la de la tierra, 300K. Por esta razón llamamos rica a la energía del sol: porque la tierra incrementa su energía libre en un 95% de la energía absorbida. No es la cantidad de energía sino su calidad la que permite la vida y la presencia de combustibles. Como implícitamente indicó Carnot si la temperatura del sol y la de la tierra se aproximaran la eficiencia de la conversión disminuiría. Para una cantidad de energía incidente constante, el incremento de energía libre de la tierra disminuiría al disminuir la temperatura de la fuente. La conversión de energía solar en energía útil requiere un motor o un catalizador. Un fotón que alcanza una gota de agua de la superficie de la Tierra es absorbido por ésta generando un aumento de su temperatura y no produce ningún trabajo. Debido a este proceso irreversible de absorción la entropía aumentaría de $40 \text{ mw m}^{-2} \text{ K}^{-1}$ a $561 \text{ mw .m}^{-2} \text{ K}^{-1}$. Por el contrario, si el fotón incide sobre una hoja de parra parte de su energía no se emplea en subir la temperatura de la hoja sino en formar una molécula de azúcar por la acción catalizadora de la clorofila. Si el proceso activado por la clorofila fuera reversible se utilizaría una fracción de la energía absorbida dada por $(1-(T/T^*))$ para producir azúcar y la entropía permanecería constante en el proceso. El orden de la radiación incidente se ha conservado en la molécula de azúcar. La evolución tiende a que la fracción de energía absorbida convertible en otra energía, ordenada -química, eléctrica o mecánica- sea la máxima posible. La evolución consiste en un intento continuo de aproximación al 95% de eficiencia en las transformaciones energéticas. Esto se consigue, entre otras posibilidades,

mediante el incremento de complejidad de las proteínas y, por tanto, de los genomas. La energía química almacenada en los enlaces de los átomos del azúcar se convierte en energía capaz de mantener el ritmo metabólico, pero también de crear poemas y sinfonías, demostrar teoremas o subir montañas en bicicleta. La creación continua de entropía durante los procesos bioquímicos reales y por tanto irreversibles y su exportación al medio es la causa del envejecimiento. Cuando ya no se puede exportar la entropía creada por el organismo se acumula progresivamente en él hasta inducir su muerte.

El origen de los gradientes que generan los flujos de energía libre hay que buscarlo en el momento en que el Universo primigenio se separó, durante su expansión, del equilibrio termodinámico. Cuando la temperatura del Universo fue del orden de 3000 K las partículas cargadas se combinaron formando átomos. Este momento indujo el cambio más grande e importante de todos los tiempos y en él la energía libre comenzó a fluir. La uniformidad cósmica desapareció, la simetría se rompió y el equilibrio termodinámico se perdió quizás para siempre.

No deja de ser sorprendente que la termodinámica clásica centrada en la comprensión del equilibrio y la reversibilidad encuentre tan amplio campo de aplicación en la mayoría de los procesos reales que son irreversibles. La razón de tan sorprendente éxito proviene de la aplicabilidad del concepto de equilibrio local en la mayoría de los casos de interés.

En 1949 Claude Shannon, trabajando para AT&T, cuantificó en el sistema binario la cantidad de “información perdida” antes de la realización de un experimento cuyo resultado es incierto. Mientras buscaba un nombre para la “información perdida” realizó una visita a su insigne colega John von

Neumann quien se interesó por la marcha de su investigación. Shannon le comentó que ya solo necesitaba un nombre para la “falta de información” y von Neumann le sugirió: “llámela usted entropía. En primer lugar Boltzmann ya ha desarrollado en mecánica estadística un modelo matemático similar al suyo y, en segundo lugar, casi nadie entiende el concepto de entropía lo que sin duda le otorgará a usted una posición de ventaja en cualquier discusión al respecto”. El concepto de entropía y el de información están indisolublemente asociados. Se entiende por información cualquier cosa que pueda romper la equi-probabilidad de los sucesos y es, por tanto, opuesta a la entropía. La energía libre alta que corresponde a estados de baja entropía pueden considerarse portadora de alta información.

Esencialmente la biosfera se nutre de dos flujos de alta energía libre y alta información: la primaria, que es la radiación solar de baja entropía y la elaborada, consistente en las moléculas orgánicas de alta energía libre que como la glucosa se producen a partir de la energía solar.

En total la potencia media recibida en toda la superficie de la Tierra corresponde a $1.5 \cdot 10^5$ terawatios. Una parte de esta energía es utilizada por los seres vivos para construir las moléculas de alta energía libre que necesitan para vivir. Tal fracción puede estimarse por la utilizada por las plantas y algas para fijar carbono. La cantidad de masa de carbono fijado en glucosa mediante la fotosíntesis, a partir del CO_2 de la atmósfera se estima del orden de 10^{11} gr por segundo. Lo que requiere una potencia de 100 terawatios, que corresponde a una milésima parte de la energía solar total que nos llega, pero que es un orden de magnitud superior a la que gasta toda la civilización para locomoción, calefacción e industria, aproximadamente 10 terawatios.

Conviene detallar el balance energético de un ser humano: el sol radia una potencia de $4 \cdot 10^{26}$ watios y su masa es $2 \cdot 10^{30}$ Kg. La potencia emitida por gramo de Sol es entonces 0.0002 miliwatios. Una persona de 70 Kg de peso y que come $3 \cdot 10^6$ calorías lo que equivale a $12.6 \cdot 10^6$ julios y supuesta una eficiencia de transformación energética del 30%, absorbe y transforma 2 miliwatios por gramo, es decir, diez mil veces la emisión del Sol, por gramo. En un día una persona de 70 Kg produce una entropía de $4 \cdot 10^4 \text{ J K}^{-1}$.

A lo largo del tiempo se han ido formando islas de orden y complejidad crecientes que se diferencian como sistema reales al estar separados por superficies de su entorno. Las galaxias y sus cúmulos generan zonas de gradientes máximos de masa a través de sus contornos. La gravitación genera el auto-ensamblaje del universo. Un momento de máxima transcendencia en la evolución fue aquel en que un auto-catalizador se rodeó de una membrana. Las membranas de la biología están íntimamente asociadas con el mecanismo de transformación de energía. Las islas de complejidad química creciente, átomos, moléculas, macromoléculas y cadenas poliméricas, son auto-ensambladas por la interacción electromagnética. Sus contornos están rodeados por mares de desorden.

Los enlaces covalentes estabilizan las moléculas básicas de la biosfera con energías del orden del electrón voltio; sin embargo los procesos químicos que gobiernan la vida, si bien hacen uso de moléculas unidas por covalencia, tienen lugar preferentemente mediante la acción catalizadoras de las proteínas cuya actividad química esta gobernada por enlaces mucho mas débiles y que pueden agruparse bajo el término de no covalentes. Estos enlaces como son los de hidrógeno y los de Van der Waals explican la importancia de la complementariedad molecular. Al ser enlaces débiles necesitan muchos puntos de contacto para establecer las uniones entre las

macromoléculas. El plegamiento espacial de las proteínas, que depende de la secuencia que sigan en la macromolécula los aminoácidos que la forman, determina una geometría espacial que permite ajustarse a la forma de otra macromolécula específica reactiva cuya transformación podrá catalizar.

Desde la perspectiva de la información el proceso evolutivo general está conducido por un flujo enorme de información contenido en la energía libre que atraviesa la biosfera. Una fracción de ella se preserva y estabiliza como información cibernética. Se entiende por información cibernética aquella asociada con la emisión y recepción de señales, con las comunicaciones, con códigos o idiomas y con la complejidad biológica y cultural.

En los sistemas vivos las señales se escriben y leen en escala molecular mediante la mencionada complementariedad que, combinada con la debilidad de los enlaces, forma la base de la complejidad permitiendo conservar información y generando la posibilidad de la evolución darwiniana por modificaciones aleatorias de los enlaces débiles entre las bases homólogas de las dobles hélices de ADN.

No es de extrañar que muy tempranamente Melvin Calvin, en su libro *Chemical Evolution; Molecular Evolution Towards the Origin of Living Systems*, de 1969, propusiera que la evolución química está en el origen de la vida sobre la Tierra.

Consideraciones finales sobre los ritmos temporales de la evolución y el progreso

En los dos ámbitos evolutivos, natural y cultural, se ha generado un proceso de aumento de la complejidad asociado a la información. La

información genética y la información entre moléculas biológicas se corresponden con los alfabetos, las lenguas, el solfeo, la imprenta e Internet que tan indisolublemente unidos al progreso han estado durante toda la historia del hombre.

Mientras los cambios genéticos son aleatorios y lentos los cambios culturales son rápidos y persiguen un objetivo. Por ejemplo, cuando nuestros antepasados decidieron salir de Africa y expandirse por Europa y Asia no se adaptaron al clima frío por transformaciones genéticas sino que directamente inventaron la ropa.

La información, por tanto, en el caso de los humanos tiene una doble naturaleza en lo que respecta a su origen: la genética que debido al ritmo de su evolución es muy parecida a la que tuvieron, por ejemplo, nuestros antepasados del Neolítico y la cultural que a diferencia de la genética cambia incluso durante la duración de la vida individual.

Si la Revolución Industrial marca el hito histórico de paso de la economía darwiniana a la economía cultural, la edad temprana en la que el niño empieza a hablar una lengua concreta marca la aparición de una vida cultural en la inicial vida darwiniana. La facilidad que tiene los niños para aprender cualquier lengua, hecho que ya fascinó a Darwin, muestra inequívocamente algo impreso en los genes; la lengua particular que se aprende es, al contrario, información cultural.

El hecho de que contemos con dos fuentes de información con ritmos de evolución tan extremadamente distantes puede generar en nuestro comportamiento todo tipo de reacciones alejadas del equilibrio. Las tendencias tribales, las pasiones tan poco razonables que mueven

arrolladoramente nuestra voluntad en muchas ocasiones, los celos, las envidias y vanidades constituyen todo un, moralmente poco edificante, conjunto de características que quizás podrían estar muy profundamente ancladas en nuestros genes desde miles de millones de años. Todos estos vergonzantes comportamientos tuvieron en su día y quizás tengan hoy capacidad de facilitar la adaptación al medio. Por el contrario, el descubrimiento de la imprenta y de la máquina de vapor, la invención de la democracia, el hallazgo de la universalidad de los problemas humanos, la búsqueda de solidaridad y sobre todo el descubrimiento y el uso del método científico podrían representar el fruto del progreso inducido por el cerebro. La trágica divergencia de las normativas que nos dictan ambos tipos de información no necesita, por obvia, ningún tipo de glosa.

Aunque nuestra información genética se resiste a armonizarse con la adquirida por la actividad cerebral no estamos abocados a un pesimismo total. La historia de la ciencia cuenta con excelentes ejemplos de ética que no necesitan ser buscados con excesivo detenimiento. Baste, para cerrar estas líneas recordar los casos de tres científicos cuyos descubrimientos están en el corazón mismo de lo que aquí hemos tratado. Carnot quien como he indicado publicó su magna obra en unas separatas que él mismo se costeó fue elegantemente reivindicado por Clapeyron y lord Kelvin quienes descubrieron la importancia de sus descubrimientos y los comunicaron a la sociedad científica. Los trabajos de Mendel que pueden considerarse la base de la genética fueron presentados en las reuniones de la Sociedad de Historia Natural de Brünn en 1866. El holandés Hugo de Vries al descubrir, en 1900, el comportamiento reproductivo de sus plantas buscó en la bibliografía por si alguien con anterioridad hubiera hallado resultados similares. Honra a de Vries que fuera capaz de encontrar la referencia de Mendel y que posteriormente le citara como el auténtico descubridor de las

reglas de transmisión de caracteres y concluyera modestamente que sus resultados no hacían mas que confirmar los hallazgos del agustino.

Josiah Willard Gibbs, contribuyó con máxima relevancia a la fundamentación de la termodinámica teórica. Doctorado por la Universidad de Yale en 1863, tras viajar por Europa, obtuvo la cátedra de Física Matemática de la misma Universidad en 1871. Autor de dos trabajos históricos, *Métodos gráficos en termodinámica de fluidos* y *Sobre el equilibrio de sustancias heterogéneas*, de importancia trascendental para la posterior evolución de la física y la química modernas, los publicó durante 1875 y 1876, en la poco difundida revista *Transaction of the Connecticut Academy of Sciences*. Los editores que reconocieron honestamente no entender el texto de Gibbs, lo publicaron basados exclusivamente en la confianza que les merecía el prestigio del autor. Posteriormente tanto el químico y filósofo alemán Friedrich Wilhelm Ostwald como el científico francés Louis-Henry Le Chatelier leyeron los trabajos de Gibbs y comprendiendo la riqueza e importancia de su contenido los tradujeron al alemán y al francés, respectivamente, contribuyendo a diseminarlo definitivamente entre la comunidad científica.

La cultura basada principalmente en el conocimiento científico e inicialmente en sus rudimentos, nos enseñó desde la temprana edad de nuestra evolución la noticia de que teníamos ineludiblemente que morir. Hoy sabemos que la vida al constituir un conjunto de transformaciones energéticas que disipan entropía al exterior conllevará un final anticipado de la habitabilidad de la biosfera y que mientras aumente el número de seres humanos y sus actividades tecnológicas a lo mas que podemos aspirar es a disminuir el ritmo del deterioro medio-ambiental. Como sucede con la termodinámica, sin duda una de las obras colectivas mas bellas realizadas

por el cerebro humano, la comprensión de esta terrible tensión entre información genética e información cultural aparece para nosotros como un problema de enorme dificultad de tratamiento. Entrever su existencia y estimar adecuadamente su importancia puede por ahora ser suficiente.

He dicho