**Preliminares termodinámicos**

**La termodinámica se aplica a todos los sistemas de trabajo y energía, incluyendo los sistemas de temperatura-volumen-presión clásicos, los sistemas cinéticos químicos y los sistemas electromagnéticos y cuánticos. Puede considerarse que la termodinámica aborda el comportamiento de los sistemas en tres situaciones distintas: (1) equilibrio (termodinámica clásica) como, por ejemplo, la acción de números grandes de moléculas en un sistema cerrado; (2) sistemas que están a cierta distancia del equilibrio y tienden a volver a él, como dos frascos conectados por una llave de paso, uno de los cuales contiene más moléculas de gas que el otro; al abrir la llave de paso el sistema se sitúa en su estado de equilibrio con igual número de moléculas en ambos frascos, y (3) sistemas que se mantienen a cierta distancia del equilibrio por causa de algún gradiente, como es el caso de dos frascos conectados con un gradiente de presión que obliga a que haya más moléculas en un frasco que en el otro.

El concepto de exergía es capital para nuestra discusión del orden a partir del desorden. La calidad de la energía, o su capacidad para producir trabajo útil, varía. Durante cualquier proceso químico o físico la capacidad de la energía para producir trabajo se pierde irremisiblemente. La exergía es una medida de la capacidad máxima de un sistema energético para producir trabajo útil a medida que procede a equilibrarse con su entorno (Brzustowski y Golem, 1978; Ahern, 1980).

La primera ley de la termodinámica surgió de los esfuerzos para comprender la relación entre calor y trabajo. La primera ley dice que la energía no se crea ni se destruye, y que la energía total dentro de un sistema aislado permanece invariable. Sin embargo, la calidad de la energía (es decir, el contenido de exergía) puede variar. La segunda ley de la termodinámica establece que, si en el sistema tiene lugar cualquier tipo de proceso, la calidad de la energía (la exergía) dentro del sistema tiene que degradarse. La segunda ley puede formularse también en términos de entropía, la medida cuantitativa de la irreversibilidad, cuyo incremento es siempre mayor que cero en cualquier proceso real. La segunda ley también puede enunciarse así: cualquier proceso real sólo puede proceder en una dirección que conduce a un incremento de entropía.

En 1908 la termodinámica avanzó un paso más gracias a la obra de Carathéodory (Kestin, 1976), quien demostró que la ley del «incremento de entropía» no era el enunciado más general de la segunda ley. El enunciado de Carathéodory reza así: «En la vecindad de cualquier estado de cualquier sistema cerrado existen estados inaccesibles a través de cualquier trayectoria adiabática reversible o irreversible». A diferencia de los enunciados anteriores, éste no depende de la naturaleza del sistema, ni de los conceptos de entropía o temperatura.

Más recientemente, Hatsopoulos y Keenan (1965) y Kestin (1968) han subsumido las leyes cero, primera y segunda en un Principio Unificado de la Termodinámica: «Cuando en un sistema aislado tiene lugar un proceso tras la eliminación de una serie de restricciones internas, el sistema alcanzará un estado único de equilibrio: este estado de equilibrio es independiente del orden en que se eliminan las restricciones». Este enunciado describe el comportamiento de la segunda clase de sistemas: los que están a cierta distancia del equilibrio pero no obligados a permanecer en un estado de no equilibrio. Su importancia es que dicta una dirección y un estado final para todo proceso real. Este enunciado nos dice que el sistema alcanzará el equilibrio que permitan las restricciones.**

**Sistemas disipativos**
 **Los principios antes reseñados se aplican a sistemas aislados. Hay, sin embargo, una tercera clase de fenómenos propios de los sistemas abiertos a flujos de energía y/o materia, los cuales residen en estados cuasiestables a cierta distancia del equilibrio (Nicolis y Prigogine, 1977, 1989). Los sistemas organizados no vivos (como las celulas de convección, los tornados y los láseres) y los sistemas vivos (de las células a los ecosistemas) dependen de flujos de energía externa para mantener su organización y para la disipación de gradientes energéticos asociada a los procesos autoorganizativos. Esta organización se mantiene al precio de un incremento de la entropía del sistema «global» en el que está inmersa la estructura. En estos sistemas disipativos el cambio de entropía total es la suma de la producción interna de entropía (que siempre es positiva o nula) más el intercambio de entropía con el entorno, que puede ser positivo, negativo o cero. Para que el sistema se mantenga en un estado estacionario de no equilibrio el intercambio de entropía debe ser negativo e igual a la entropía producida por procesos internos tales como el metabolismo.

Las estructuras disipativas que son estables para un rango finito de condiciones se representan mejor mediante ciclos autocatalíticos de retroacción positiva. Células de convección, huracanes, reacciones químicas autocatalíticas y sistemas vivos son ejemplos de estructuras disipativas lejos del equilibrio que exhiben un comportamiento coherente.
La transición en un fluido calentado de la conducción a la convección (células de Bénard) es un llamativo ejemplo de la emergencia de una organización coherente en respuesta a una entrada de energía externa (Chandrasekhar, 1961). En el experimento de Bénard se calienta la superficie inferior de un fluido mientras la superficie superior se mantiene más fría. El calor fluye inicialmente a través del sistema mediante la interacción molécula a molécula. Cuando el flujo de calor alcanza un valor crítico el sistema se vuelve inestable; la acción molecular del fluido adquiere coherencia y surge un movimiento convectivo que crea patrones superficiales hexagonales altamente estructurados (células de Bénard). Estas estructuras incrementan la tasa de transferencia de calor y de destrucción del gradiente de temperatura en el sistema. La transición hacia una estructura coherente es la respuesta del sistema a los intentos de desplazarlo del equilibrio (Schneider y Kay, 1994). Esta transición de una transferencia de calor no coherente molécula a molécula a una estructura coherente se traduce en el comportamiento altamente organizado de colectivos del orden de 1022 moléculas. Este hecho en apariencia improbable es el resultado directo del gradiente de temperatura aplicado y la dinámica del sistema a mano, y es la respuesta del sistema a los intentos de desplazarlo del equilibrio.

Para tratar esta clase de sistemas fuera del equilibrio proponemos un corolario del Principio Unificado de la Termodinámica de Kestin. Su demostración establece que el estado de equilibrio de un sistema es estable en el sentido de Lyapunov. Esta conclusión implica de manera implícita que el sistema se resistirá a abandonar el estado de equilibrio. El grado de desplazamiento del equilibrio se mide por los gradientes impuestos sobre el sistema.

Si un sistema es desplazado del equilibrio utilizará todas las vías disponibles para contrarrestar los gradientes aplicados. Conforme se incrementan estos gradientes,se incrementa también la capacidad del sistema para oponerse a un alejamiento ulterior del equilibrio.

Nos referiremos a este enunciado como la «segunda ley reformulada», y a los enunciados anteriores a Carathéodory como la segunda ley clásica. El principio de Le Chatelier en química es un ejemplo de la segunda ley reformulada.

Los sistemas termodinámicos que exhiben equilibrio térmico, barométrico y químico se resisten a abandonar estos estados de equilibrio. Cuando son desplazados de su estado
de equilibrio se sitúan en un estado estacionario que se opone a los gradientes aplicados e intenta que el sistema regrese a su atractor de equilibrio. Cuanto mayor es el gradiente aplicado mayor es el efecto del atractor de equilibrio sobre el sistema. Cuanto más se desplaza un sistema del equilibrio, más sofisticados son sus mecanismos para resistir un desplazamiento ulterior. Si las condiciones dinámicas y/o cinéticas lo permiten, surgirán procesos de autoorganización que contribuyen a la disipación de gradientes. Este comportamiento es ilógico desde el punto de vista clásico, pero es lo que cabe esperar de acuerdo con la segunda ley reformulada. La emergencia de estructuras coherentes autoorganizadas deja de ser una sorpresa para convertirse en la respuesta esperable de un sistema que intenta resistir y disipar gradientes aplicados externamente que alejarían al sistema del equilibrio. En la formación de estructuras disipativas tenemos, por lo tanto, orden que emerge del desorden.

Hasta aquí nuestra discusión se ha centrado en sistemas físicos simples y en la forma en que los gradientes termodinámicos impulsan la autoorganización. Los gradientes químicos también dan lugar a reacciones autocatalíticas disipativas, de las que son ejemplos algunos sistemas químicos inorgánicos simples, la síntesis de proteínas o las reacciones autocatalíticas de fosforilación, polimerización e hidrólisis. Los sistemas de reacciones autocatalíticas son un tipo de retroacción positiva donde la actividad del sistema o reacción se amplifica en la forma de reacciones autosostenidas. La autocatálisis estimula la actividad de agregación del ciclo entero. Dicha actividad autocatalítica autosostenida es también autoorganizadora, y contribuye de manera importante a incrementar la capacidad disipativa del sistema.

La concepción de los sistemas disipativos como disipadores de gradientes es aplicable a los sistemas físicos y químicos fuera del equilibrio y describe los procesos de emergencia y desarrollo de sistemas complejos. Estos procesos no sólo son consistentes con la segunda ley reformulada, sino que debería esperarse que tales sistemas emerjan siempre que las condiciones lo permitan y haya gradientes presentes. La idea de Schrödinger  del orden a partir del desorden se refiere a la emergencia de estos sistemas disipativos, un fenómeno que se observa en las tres clases consideradas de sistemas termodinámicos.

Los sistemas vivos como disipadores de gradientes

Boltzmann reconoció la contradicción aparente entre la muerte térmica del universo y la existencia de sistemas vivos que crecen, adquieren complejidad y evolucionan. Entrevió que el gradiente de energía solar impulsa los procesos de la vida, y sugirió una competencia seudodarwiniana por la entropía en los sistemas vivos:

«La lucha generalizada de los seres animados por la existencia no es una lucha por las materias primas (que para los organismos son el aire, el agua y el suelo, todo ello disponible en abundancia) ni por la energía, que cualquier cuerpo contiene de sobras en forma de calor (no transformable, por desgracia), sino una lucha por la entropía, que se hace accesible a través de la transición de energía del Sol caliente a la Tierra fría» (Boltzmann, 1886).

Las ideas de Boltzmann fueron luego exploradas por Schrödinger, quien observó que ciertos sistemas, en particular los vivos, parecían desafiar la segunda ley de la termodinámica clásica (Schrödinger, 1944). Sin embargo, reconoció que los sistemas vivos no son las cajas cerradas adiabáticas de la termodinámica clásica, sino sistemas abiertos. Un organismo se mantiene vivo en su estado altamente organizado a base de importar energía externa de alta calidad y degradarla para sostener la estructura organizativa del sistema. O como dijo Schrödinger, la única forma de que un sistema vivo se mantenga vivo, lejos del estado inerte de máxima entropía, es

«extrayendo continuamente entropía negativa de su medio ambiente... Por consiguiente, el mecanismo por el cual un organismo se mantiene a sí mismo a un nivel bastante elevado de orden (= un nivel bastante bajo de entropía) consiste realmente en absorber continuamente orden de su medio ambiente ... el suministro más importante de «entropía negativa» de las plantas es, evidentemente, la luz solar» (Schrödinger , 1944).

La vida puede contemplarse como una estructura disipativa lejos del equilibrio que mantiene su nivel de organización local a expensas de producir entropía en el entorno.

Si contemplamos la Tierra como un sistema termodinámico abierto con un intenso gradiente impuesto por el Sol, la segunda ley reformulada sugiere que el sistema reducirá este gradiente echando mano de todos los procesos físicos y químicos a su alcance. Nosotros sugerimos que la vida en la Tierra es una forma más de disipar el gradiente solar inducido y, como tal, una manifestación de la segunda ley reformulada. Los sistemas vivos son sistemas disipativos lejos del equilibrio con un gran potencial para reducir gradientes de radiación planetarios (Kay, 1984; Ulanowicz y Hannon, 1987).

El origen de la vida es el desarrollo de otra ruta para la disipación de gradientes de energía inducidos. La vida asegura la continuación de estas vías disipativas, y ha desarrollado estrategias para mantenerlas frente a un entorno físico fluctuante. Nosotros sugerimos que los sistemas vivos son sistemas dinámicos disipativos con memorias codificadas -los genes- que permiten la continuación de los procesos disipativos.**

 **Hemos argumentado que la vida es una respuesta al imperativo termodinámico de la disipación de gradientes (Kay, 1984; Schneider, 1988). El crecimiento biológico se da cuando el sistema adiciona vías disipativas de tipos ya existentes. El desarrollo biológico, en cambio, se da cuando en el sistema surgen vías disipativas nuevas. Este principio proporciona un criterio para evaluar el crecimiento y desarrollo de los sistemas vivos.

El crecimiento vegetal es un intento de captar energía solar y disipar gradientes aprovechables. Las plantas de muchas especies se disponen en conjuntos que incrementan la superficie foliar para optimizar la captura y degradación de energía. Los balances energéticos de las plantas terrestres muestran que la inmensa mayoría de su energía se destina a la evapotranspiración, con 200-500 gramos de agua transpirada por gramo de material fotosintético fijado. Este mecanismo es un proceso de degradación de energía muy efectivo, con un gasto de 2500 joules por gramo de agua transpirado (Gates, 1962). La evapotranspiración es la principal vía disipativa en los ecosistemas terrestres.

La distribución geográfica a gran escala de la riqueza de especies está fuertemente correlacionada con la evapotranspiración anual potencial (Currie, 1991). Esta estrecha relación entre riqueza de especies y exergía disponible sugiere un vínculo causal entre biodiversidad y procesos disipativos. Cuanta más exergía hay disponible para repartir entre las especies, más vías disponibles hay para la degradación de energía. Los niveles tróficos y cadenas alimentarias se basan en el material fotosintético fijado y la disipación ulterior de esos gradientes a través de la creación de más estructuras altamente ordenadas. Así, podemos esperar una mayor diversidad de especies allí donde haya más exergía disponible. La diversidad de especies y el número de niveles tróficos son mucho mayores en el ecuador, donde inciden 5/6 de la radiación solar que llega a la Tierra y hay más de un gradiente que reducir.

Un análisis termodinámico de los ecosistemas

Los ecosistemas son los componentes biótico, físico y químico de la naturaleza actuando juntos como procesos disipativos fuera del equilibrio. De acuerdo con la segunda ley reformulada, el desarrollo de ecosistemas debería incrementar la degradación de energía. Esta hipótesis puede contrastarse observando la energética del desarrollo de un ecosistema durante el proceso de la sucesión o en condiciones de estrés.

A medida que los ecosistemas se desarrollan o maduran debería incrementarse su disipación total y deberían desarrollarse estructuras más complejas con mayor diversidad y más niveles jerárquicos que contribuyan a la degradación energética (Schneider, 1988; Kay y Schneider, 1992). Las especies exitosas son aquéllas que canalizan energía para la producción y reproducción propias y contribuyen a los procesos autocatalíticos incrementando la disipación total del ecosistema.

Lotka (1922) y Odum y Pinkerton (1955) han sugerido que los sistemas biológicos que sobreviven son aquéllos que desarrollan la máxima potencia de entrada y la usan mejor para sus necesidades de supervivencia. Una descripción mejor de estas «leyes potenciales» puede ser que los sistemas biológicos se desarrollan de manera que incrementan su tasa de degradación de energía, y que el crecimiento biológico, el desarrollo ecosistémico y la evolución representan el desarrollo de nuevas vías disipativas. En otras palabras, los ecosistemas se desarrollan de manera que se incrementa la cantidad de energía captada y utilizada. En consecuencia, a medida que los ecosistemas se desarrollan la exergía de la energía saliente decrece. Es en este sentido en el que se puede decir que los ecosistemas desarrollan la máxima potencia, esto es, hacen un uso óptimo de la exergía contenida en la energía de entrada a la vez que incrementan la cantidad de energía que captan.

Esta teoría sugiere que el estrés desorganizador será causa de la regresión de los ecosistemas a configuraciones con menor potencial de degradación de energía. Los ecosistemas estresados a menudo semejan fases más tempranas de la sucesión ecológica y residen más cerca del equilibrio termodinámico.

Los ecólogos han construido modelos analíticos que permiten el análisis de los flujos de materia y energía a través de los ecosistemas (Kay, Graham y Ulanowicz, 1989). Con estos métodos es posible detallar cómo se distribuye la energía en el ecosistema. Recientemente hemos analizado un conjunto de datos de flujos de carbono y energía en dos ecosistemas de marisma adyacentes a una central nuclear en la región de Crystal River, Florida (Ulanowicz, 1986). Los ecosistemas en cuestión eran una marisma «estresada» y una marisma «control». El ecosistema «estresado» está expuesto a la efluencia de agua caliente procedente de la central. Por lo demás, las condiciones ambientales son las mismas que las del ecosistema «control». En el ecosistema estresado se observa una disminución general de las magnitudes de los flujos. La implicación es que el estrés se ha traducido en una reducción del ecosistema en términos de biomasa, consumo de recursos, reciclado material y energético, y capacidad para degradar y disipar la energía entrante.

El impacto general de la emisión de agua caliente por la central nuclear ha sido una disminución de tamaño y del consumo de recursos del ecosistema estresado, junto con una reducción de su capacidad para retener los recursos incorporados. Este análisis sugiere que la función y estructura de los ecosistemas sigue la pauta de desarrollo predicha por el comportamiento de las estructuras termodinámicas de no equilibrio cuando se aplica a la sucesión ecológica.

La energética de los ecosistemas terrestres proporciona otro contraste de la tesis de que el desarrollo de los ecosistemas obedece a una degradación más efectiva de la energía. Las estructuras disipativas más desarrolladas deberían degradar más energía. Es de esperar, pues, que un ecosistema maduro degrade el contenido de exergía de la energía que capta de forma más completa que un ecosistema más joven. La pérdida de exergía a través de un ecosistema se relaciona con la diferencia en cuanto a temperatura de cuerpo negro entre la energía solar captada y la energía irradiada de nuevo por el ecosistema. Si un grupo de ecosistemas recibe la misma energía incidente, es de esperar que el ecosistema más maduro sea el que irradie su energía a un nivel exergético más bajo; en otras palabras, el ecosistema más maduro sería también el que tendría una temperatura de cuerpo negro más baja.

Luvall y Holbo (1989, 1991) han medido las temperaturas superficiales de diversos ecosistemas empleando un escáner multiespectral infrarrojo. Sus datos muestran una tendencia inconfundible: cuando las demás variables son constantes, cuanto más desarrollado está el ecosistema más fría es su temperatura superficial y más degradada está la energía devuelta al entorno.

Las mediciones efectuadas sobre un bosque de coníferas al oeste de Oregón demostraron que la temperatura superficial varía con la madurez y el tipo de ecosistema. Las temperaturas más altas se registraron en un claro del bosque y sobre una cantera. El enclave más frío, con una temperatura de 299K (unos 26K más frío que el claro), era un bosque maduro de abetos de Douglas de 400 años de edad con una cubierta foliar de tres niveles. Mientras que la cantera degradaba el 62% de la radiación incidente neta, el bosque maduro degradaba el 90%. Los enclaves de edad intermedia se situaban entre estos dos extremos, con una degradación energética mayor cuanto más maduro o menos perturbado era el ecosistema. Estos datos únicos indican que los ecosistemas desarrollan estructuras y funciones que degradan de manera más efectiva los gradientes de energía impuestos (Schneider y Kay, 1994).

Nuestro estudio de la energética de los ecosistemas los trata como sistemas abiertos con un bombeo de energía de alta calidad. Este bombeo de energía de alta calidad puede desplazar al sistema del equilibrio termodinámico. Pero la naturaleza se resiste a abandonar el equilibrio. Como sistemas abiertos que son, los ecosistemas responden en la medida de lo posible con la emergencia espontánea de un comportamiento organizado que consume la energía de alta calidad en la construcción y mantenimiento de la estructura recién surgida, lo cual disipa la capacidad de la energía de alta calidad para alejar al sistema del equilibrio termodinámico. Este proceso de autoorganización se caracteriza por cambios abruptos asociados a la emergencia de un nuevo conjunto de interacciones y actividades dentro del sistema. Esta emergencia de comportamientos organizados, la esencia de la vida, es hoy esperable en el marco de la termodinámica. A medida que se bombea más energía de alta calidad en un ecosistema, más organización surge para disipar la energía. Tenemos aquí, pues, un orden que emerge del desorden al servicio de la producción de más desorden.

Orden a partir del desorden y orden a partir del orden**

**Los sistemas complejos pueden clasificarse dentro de un continuo que va desde la complejidad ordinaria (sistemas de Prigogine, tornados, células de Bénard, reacciones autocatalíticas) hasta la complejidad emergente, con la posible inclusión de los sistemas socioeconómicos humanos. Los sistemas vivos constituyen el extremo más sofisticado de este continuo. Los sistemas vivos deben funcionar en el contexto de sistema y entorno del que forman parte; si un sistema vivo no respeta las circunstancias del supersistema del que forma parte, será seleccionado negativamente. El supersistema impone un conjunto de restricciones de comportamiento, y los sistemas vivos evolutivamente exitosos son los que han aprendido a vivir con ellas. Cuando se genera un nuevo sistema vivo tras la extinción de uno preexistente, el proceso de autoorganización se hará más eficiente si la variación se restringe a aquella que tiene una alta probabilidad de éxito. Este papel restrictivo del proceso de autoorganización es desempeñado por los genes. Los genes son un registro de autoorganización exitosa. El mecanismo del desarrollo no son los genes, sino la autoorganización. Los genes acotan y constriñen el proceso autoorganizativo. A niveles jerárquicos superiores actúan otros mecanismos. La capacidad de regeneración de un ecosistema es una función de las especies disponibles.

Dado que los sistemas vivos describen un ciclo constante de nacimiento-desarrollo-regeneración-muerte, preservar información sobre lo que funciona y lo que no es crucial para la continuación de la vida (Kay, 1984). Este es el papel del gen y, a mayor escala, de la biodiversidad: constituir bases de datos sobre estrategias autoorganizativas que funcionan. Esta es la conexión entre los temas del orden a partir del orden y del orden a partir del desorden de Schrödinger. La vida surge porque la termodinámica dicta la generación de orden a partir del desorden allí donde haya gradientes termodinámicos suficientes y se den las condiciones adecuadas. Pero para que la vida continúe, las mismas leyes requieren que sea capaz de regenerarse, esto es, de crear orden a partir del orden. La vida no puede existir sin ambos procesos, el orden a partir del desorden para generar vida y el orden a partir del orden para asegurar la persistencia de la vida.

La vida representa un equilibrio entre los imperativos de supervivencia y degradación energética. Citando a Blum (1968):

«Me gusta comparar la evolución con la confección de un gran tapiz. La urdimbre inflexible de este tapiz está formada por la naturaleza esencial de la materia inerte elemental y la aglomeración de esta materia durante la evolución de nuestro planeta. En la construcción de esta urdimbre la segunda ley de la termodinámica ha tenido un papel protagonista. Me gusta pensar que la trama abigarrada que forma los detalles del tapiz ha sido tejida sobre la urdimbre principalmente por mutación y selección natural. La urdimbre establece las dimensiones y soporta el conjunto; la trama, en cambio, es lo que más interesa al sentido estético del estudioso de la evolución orgánica, al mostrar de la forma que lo hace la belleza y variedad de la adaptación de los organismos a su entorno. Ahora bien, ¿por qué prestamos tan poca atención a la urdimbre, siendo como es una parte básica de la estructura entera? Quizá la analogía sería más completa si se introdujera algo que ocasionalmente se ve en los tejidos: la participación activa de la urdimbre en el patrón mismo. Sólo entonces, pienso, puede uno entrever el significado pleno de la analogía».

Hemos querido mostrar la participación de la urdimbre en la confección del tapiz de la vida. Volviendo a Schrödinger, la vida comprende dos procesos: orden a partir del orden y orden a partir del desorden. Los trabajos de Watson y Crick y otros sirvieron para describir el gen y resolver el misterio del orden a partir del orden. La presente contribución respalda la premisa de Schrödinger  del orden a partir del desorden y conecta mejor la biología macroscópica con la física.**