

LOS SISTEMAS VIVOS: LA MATERIA Y LA ENERGÍA

OBJETIVOS

- Reflexionar sobre los niveles de organización de los sistemas materiales y sus propiedades emergentes, en especial los sistemas vivos.
- Conocer las leyes de la termodinámica desde su contexto histórico y comprobar teórica y prácticamente su aplicación a los sistemas vivos.
- Familiarizarse, de manera teórica y experimental, con el concepto de **estructura disipativa** característica de sistemas alejados del equilibrio como son los seres vivos (termodinámica del no equilibrio)

INTRODUCCIÓN

Los seres vivos presentan características sin duda particulares que los diferencian de la materia inerte. Desde la antigüedad, la sociedad occidental propuso diferentes explicaciones sobre su naturaleza, generalmente basadas en la creencia de que los organismos obedecían a leyes propias, diferentes de las que cumplen los objetos inanimados. Hoy en día, la ciencia moderna considera que los seres vivos siguen las mismas leyes de la física y de la química, válidos para cualquier porción de materia.

En este seminario veremos primero las características estructurales de los seres vivos. Es decir, cómo está organizada espacialmente la materia que los constituye. Explicitaremos el concepto de **sistema material** y conoceremos los distintos **niveles de organización** que puede adoptar la materia (especialmente en nivel de organización celular) y las **propiedades emergentes** propias de cada uno.

En la segunda parte del seminario nos ocuparemos de estudiar los principios que rigen los cambios o transformaciones de cualquier tipo de sistema material introduciendo el concepto de **energía**. Veremos cómo estos principios son válidos para explicar los fenómenos que se producen en los sistemas vivos. Estos conceptos nos permitirán comprender cómo la interacción entre materia y energía es la que permite que un sistema mantenga, por un tiempo, su estructura y dinámica propias.

I PARTE: LA MATERIA (NIVELES DE ORGANIZACIÓN DE LOS SISTEMAS MATERIALES)

Los organismos están constituidos por los mismos componentes químicos (átomos y moléculas) que las cosas inanimadas. Esto no significa sin embargo, que los organismos sean “solamente” los átomos y las moléculas de los cuales están compuestos. Existen diferencias importantes entre los sistemas vivos y no vivos, una de ellas, y quizás la principal, es que “los sistemas vivos están compuestos por células”, otro de los principios fundamentales de la Biología. Uno de los aspectos que este enunciado nos induce a pensar es el relacionado con la

ORGANIZACIÓN de los sistemas biológicos, esencial para la comprensión de la Biología como ciencias.

Por lo tanto para poder comprender cabalmente esta ciencia debemos estudiar la organización de la materia con la cual están compuestos los sistemas que estudia. Es decir, analizar sus componentes y las relaciones que entre ellos se establecen, desde las partículas subatómicas hasta la biosfera, pasando por los átomos, las moléculas, las macromoléculas, las organelas, las células, los tejidos, los órganos, los sistemas de órganos, los individuos, las poblaciones y las comunidades.

Noción preliminar de sistema

Llamaremos sistema a cualquier parte del Universo elegida para su estudio. Veamos algunos ejemplos: un litro de agua, el sistema planetario solar, la Luna, la Tierra, un roble.

En general un sistema es un conjunto de unidades que interaccionan y tienen alguna relación entre sí. Al llamarlo “conjunto” estamos suponiendo que esas unidades tienen alguna propiedad en común. En realidad, cuando nosotros escogemos un sistema es porque sus componentes tienen alguna peculiaridad que queremos estudiar, y porque en ese momento y para ese estudio queremos prestar atención a ese aspecto.

Como dijera Borges: “Un sistema no es más que la subordinación de todos los aspectos del Universo a cualquiera de esos aspectos”

Por otro lado, cuando decimos que interaccionan y tienen alguna relación suponemos que el estado de cada unidad que compone el sistema, depende, está influido, condicionado o restringido por el estado de las otras unidades.

Como nos ocuparemos de sistemas biológicos, veamos algunos ejemplos: las células del hígado, los peces del mar, las algas, las algas y los moluscos del mar, los ojos, etc. En cada caso uno define cual es la parte del universo biológico que constituirá el sistema de estudio. Llamaremos sistema biológico a cualquier sistema que está compuesto por cosas vivas: células, tejido, organismo, la comunidad de algas de una laguna, etc.

Es importante saber que de acuerdo con la Termodinámica, los sistemas se clasifican según el intercambio de materia y energía que tengan con el medio que los rodea. Los sistemas se dividen entonces en:

- **Abiertos;** aquellos que intercambian materia y energía con su medio (una estufa de gas)
- **Cerrados;** aquellos que solo intercambian energía con su medio (una bombita de luz)
- **Aislados;** aquello que no intercambian ni materia ni energía con su medio (un termo ideal)

Un sistema biológico es un sistema abierto, pues no solo intercambia energía (ve luz, emite calor, martilla) sino que además intercambia materia (come, transpira, absorbe sales de la tierra).

Noción preliminar de estructura

La estructura de un sistema consiste en la disposición espacial que tienen sus partes, componentes o subsistemas en un momento dado. Se suele llamar “configuración” a la disposición instantánea y “estructura” a la disposición estable y duradera, o a lo que tienen en común esas configuraciones. Así un muñeco articulado puede adoptar varias poses (configuraciones) sin cambiar su estructura, y una cinta de seda tiene una estructura molecular dada y puede adoptar muchas configuraciones (moños, nudos lazos, etc.) sin alterar sus estructuras.

Las estructuras materiales siempre cambian con el tiempo. Basta tomar escalas de tiempo geológicas o astronómicas y veremos cuán fugaces son las estructuras “estables” de los puentes, los palacios, las montañas y los continentes. Además, aun durante los periodos en que consideramos que una estructura permanece estable, los átomos que la constituyen no se quedan quietos jamás, siempre están por lo menos vibrando de modo que las microestructuras están fluctuando continuamente.

Nociones de proceso y de función

Se llama proceso a cualquier cambio en la materia o energía de un sistema. Un proceso es la secuencia temporal de las estructuras que el sistema adopta. El proceso más obvio es la función del sistema: el reloj marca el tiempo, la radio transmite un noticiero, el ojo ve. Pero es importante recordar que, funcione o no, el reloj se gasta y se oxida, la radio se puede apagar por años y aún así sufrir desgastes y arruinarse, el ojo cumple procesos químicos complejos y costosos para seguir siendo ojo y ver. Más aún: el organismo al que pertenece puede morir y el ojo empezar a descomponerse, deshidratarse, momificarse o pulverizarse, dependiendo de las condiciones del medio y de la escala temporal en que estudiemos los procesos. Podríamos decir que mientras proceso es cualquier cambio de estructura, función es un cambio que tiene cierta coherencia u orden. Pero es necesario tener en cuenta que solemos llamar “orden” a lo que nosotros entendemos por orden, de modo que la diferencia entre proceso y función desde el punto de vista del sistema, puede no tener sentido.

Comentarios sobre estructuras y procesos de los sistemas vivos

En una época se consideró estructura biológica a aquellas macroscópicas: los órganos anatómicos, el esqueleto, etc. La introducción del microscópico óptico y luego el electrónico permitió reconocer la estructura biológica a niveles tisular, celular y subcelular (mitocondria, cromosomas, ribosomas, etc.).

Es sorprendente que los electrones y protones de los átomos de hidrógeno (H), un gas leve y altamente reactivo en estado puro sean iguales a los del mercurio (Hg), un líquido muy denso y a los del carbono (C) un elemento que en estado puro forma el grafito, el carbón y el diamante y que puede combinarse con hasta cuatro átomos (distintos o no) de diversas maneras y formar las moléculas de miles de átomos (macromoléculas) sobre las que se basa la vida.

Las partículas formadas por dos o más átomos, distintos o no, se denominan moléculas. Los átomos que las constituyen están relacionados mediante uniones químicas, que pueden ser de distintos tipos.

Como ya dijimos los seres vivos están constituidos por los mismos componentes químicos que las cosas sin vida y obedecen a las mismas leyes físicas y químicas. La materia viva está formada principalmente (en un 99%) por seis elementos: carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S). Los átomos de estos elementos son pequeños y forman enlaces covalentes, estables y fuertes. A excepción del hidrógeno, todos pueden unirse a dos o más átomos, dando lugar a las moléculas complejas que caracterizan a los seres vivos. Estas pueden ser de cuatro tipos principales: hidratos de carbono, lípidos, proteínas y ácidos nucleicos.

En resumen, el primer nivel de organización de la materia es el subatómico (las partículas que forman los átomos). La organización de estas partículas en átomos representa el segundo nivel, y la organización de los átomos en moléculas representa un tercer nivel. Aunque cada nivel está formado por componentes del nivel precedente, la nueva organización de los componentes en un nivel dado, origina como resultado la aparición de propiedades nuevas que son diferentes o inexistentes a las del nivel precedente llamadas “**propiedades emergentes**”. Por ejemplo, a temperatura normal, el hidrógeno y el oxígeno son gases, son embargo la combinación de ambos en un relación de 1:2 (H₂O) origina el agua, líquida y con propiedades muy distintas a las de cada uno de estos gases.

La organización de la materia viva (nivel por nivel)

Los niveles inanimados

La materia está compuesta por átomos, que son las unidades más pequeñas de los elementos químicos. A su vez los átomos están constituidos por partículas más pequeñas: los protones, los electrones y los neutrones. Todas las partículas subatómicas del mismo tipo que constituyen los distintos átomos son iguales entre sí. Es decir: todos los electrones son indistintos, provengan de uno u otro átomo.

Por lo tanto, las propiedades de una molécula dependen tanto de los átomos que la componen como de su organización dentro de la molécula. Del mismo modo, las propiedades de una célula dependen de la organización de las moléculas y estructuras macromoleculares (membranas, ribosomas, cromosomas, organelas, etc.) dentro de la célula y las propiedades de un organismo multicelular dependen de la organización de las células (tejidos, órganos y sistema de órganos) que formen su cuerpo.

Aparece la vida

En el nivel de organización celular surge la propiedad más relevante y notable, y que define, da nombre y sentido a la Biología: la vida. Otras propiedades surgen cuando las células individuales, especializadas, se organizan en otros niveles: tisular, órganos y sistema de órganos y

finalmente en un organismo multicelular. Diferenciadas y organizadas de cierta manera, las células forman un hígado, de otras, el floema y de otras, el cerebro de los mamíferos, que representa un nivel extraordinario de complejidad organizadora. Con todo, es sólo parte de una entidad mayor, cuyas características son diferentes a aquellas del cerebro aunque dependen de las de éste.

El organismo individual tampoco es el último nivel de organización biológica. Los organismos vivos interactúan y los grupos mismos de organismos constituyen parte de sistemas más vastos de organización.

Niveles supraorganísmicos

Al grupo de organismos de la misma especie que ocupan un área dada y en el mismo tiempo, se lo denomina población. En términos genéticos representa la unidad evolutiva, es decir un conjunto de individuos capaces de reproducirse entre sí.

Como ilustración imaginemos un campo o la ribera de un arroyo, algún lugar al que regresemos de vez en cuando, que tal vez nuestros padres y abuelos visitaron y dónde, con suerte, nuestros hijos podrán caminar un día. Si usted va allí en primavera verá, por citar algunos ejemplos: aves, flores silvestres e insectos, las mismas especies que vio la primavera pasada y que espera ver las siguientes. Sin embargo es poco probable que vea año tras año, los mismos individuos de esas especies, es decir: la misma ave, la misma planta silvestre con flor o que sea la misma hormiga la que lo pica todos los años. El individuo es transitorio, la población perdura más, tienen otra escala de tiempo aunque como dijéramos previamente, tampoco son permanentes estrictamente hablando.

Una población tiene propiedades muy diferentes de las de los individuos que la componen. Entre las propiedades emergentes del nivel de organización de las poblaciones, es decir, que no se encuentran en sus componentes (los organismos individuales), figuran: la densidad, la distribución, las estructuras de edades y de sexos, las tasas de nacimiento y de mortalidad, representadas en la tasa de crecimiento.

Las poblaciones están constituidas por organismos individuales. Las comunidades por poblaciones. Una comunidad comprende todas las poblaciones que habitan un ambiente común en el mismo tiempo y que se encuentran, por ende, en interacción recíproca. Estas interacciones, influyen sobre el número de individuos de cada población y sobre la estructura de la comunidad, es decir, el número y tipo de poblaciones presentes. Las interacciones entre las distintas poblaciones son extremadamente variadas y complejas, pero en general pueden ser clasificadas como: competitivas, depredadoras y simbióticas.

Otra propiedad de las comunidades, de muchísima importancia para su estructuración, es la existencia de flujos de energía y de materia en su interior, que determinan las relaciones alimentarias entre los componentes de la comunidad.

Resumen y conclusiones

Diferentes propiedades emergen en diferentes niveles de organización: los átomos tienen propiedades distintas de las de las partículas por las que están compuestos; una molécula tiene propiedades diferentes de los átomos que la componen; una célula tiene propiedades distintas de sus moléculas constitutivas; un organismo multicelular, propiedades distintas de sus células;.... Y así una población, luego una comunidad y finalmente la biósfera.

Este último nivel de organización, la biósfera, comprende no solamente la gran diversidad de plantas, animales y microorganismos y sus interacciones mutuas, sino también las características físicas del ambiente del propio planeta Tierra.

II PARTE: LA ENERGÍA

Distintas formas de energía

Los dos conceptos más básicos de las ciencias naturales son el de materia y el de energía.

Definimos materia como cualquier cosa que tiene masa y ocupa espacio. Sin embargo, el concepto de energía es más abstracto y solo puede ser definido y medido a través de cómo la energía afecta a la materia. No se puede percibir la energía que permite que se de vuelta la hoja de este apunte a no ser por el movimiento resultante de la materia (la hoja).

La energía puede manifestarse de muchas formas que parecen no tener relación. La mayoría de ellas nos resultan familiares. Usamos energía eléctrica en nuestros hogares. Obtenemos energía química de los alimentos o de los combustibles que utilizamos para nuestros motores. Las cintas elásticas, los trampolines, etc. almacenan energía elástica. La energía radiante se obtiene del Sol, bombitas de luz, etc. Preparamos los alimentos con energía térmica. Las rocas ruedan montaña abajo pues tienen energía gravitacional. Los autos se mueven porque tienen energía cinética. Finalmente la materia, por su propia existencia tiene energía de masa (energía nuclear). Vamos a ver que estas diferentes formas en que conocemos la energía son convertibles unas en otras.

Medimos la energía por sus efectos sobre la materia y esto significa cambios tangibles en la condición o estado de un objeto material (por ejemplo cambios en la temperatura, en la velocidad, etc.). Así, para los propósitos de las ciencias naturales más que definir "qué es la energía" (definición teórica), los científicos se ocupan de "cómo medirla" (definiciones operacionales).

El físico contemporáneo Richard Phillips Feynman (premio nobel de física 1965) dijo;

"Es importante constatar que en la física de hoy, no sabemos lo que es la energía"

La termodinámica

La historia de nuestro conocimiento acerca de los principios que rigen las transformaciones energéticas está íntimamente relacionada con la historia del desarrollo de las máquinas: a medida que se propagó su uso, se fueron fabricando nuevas máquinas que ganaron complejidad. Poco a poco, fue necesario obtener mejores rendimientos. Por esta razón, fue preciso medir la eficiencia de la conversión de un tipo de energía en otro. Así se fue conformando la TERMODINAMICA: ciencia que estudia las transformaciones de energía.

Energía térmica, calor y temperatura:

Podemos comenzar haciendo una distinción entre la **energía mecánica** de un cuerpo y su **energía térmica**. Llamamos **mecánica** a la energía de un cuerpo que se comporta como un todo - **energía cinética, energía potencial gravitacional, energía potencial elástica** de un cuerpo, entendiendo que todos los átomos que constituyen el cuerpo actúan de manera conjunta (energía organizada). Sin embargo, es posible impartir a los átomos individuales un movimiento desorganizado, un movimiento que no es del cuerpo como un todo, sino de su interior. La física actual llama a la energía interna de un objeto a la asociada puramente con el movimiento aleatorio de sus átomos y moléculas, **energía térmica**₁. Los átomos en el interior de cada cuerpo están siempre agitándose de forma más o menos desordenada. Así la energía térmica es energía cinética en el micromundo.

La energía térmica en tránsito se define como **calor**. Es la energía del movimiento aleatorio transferida por medio del contacto de un objeto con otro, de un grupo de átomos con otro. En otras palabras el calor es la energía térmica ganada, perdida o transferida por medio del efecto acumulativo de colisiones atómicas individuales. Un cuerpo contiene o almacena energía térmica, no calor. Este último es energía térmica que se transfiere al, dentro de, o fuera del cuerpo. Una vez transmitida la energía no se llama calor₁.

La energía térmica de un objeto puede ser aumentada o disminuida (hacerlo más caliente o frío) en formas muy diferentes. Puede aumentarse la energía térmica golpeando el objeto con un martillo, frotándolo o doblándolo (mediante trabajo). También se consigue el mismo efecto poniendo el objeto en contacto con algo que tenga una temperatura más alta, como una llama, donde el objeto adquirirá energía por medio de choques atómicos (mediante calor). También puede irradiarse con radiación electromagnética (mediante radiación). Resumiendo: **todo lo que agite los átomos producirá un aumento de energía térmica**.

Para complicar más el asunto vamos a tratar de definir lo que es la **temperatura** (que no es un sinónimo ni del calor ni de la energía térmica). Al menos en el caso más simple de un gas podemos decir que la temperatura es una medida de la energía cinética promedio de las moléculas (mas rápido se mueven las moléculas, más alta es la temperatura). Considerando dos cuerpos de la misma sustancia con igual cantidad de energía térmica cada uno, el que tenga la mitad de la masa tendrá el doble de temperatura que el otro (en la escala Celsius). Simétricamente, en dos cuerpos de la misma sustancia a la misma temperatura, el que tenga la

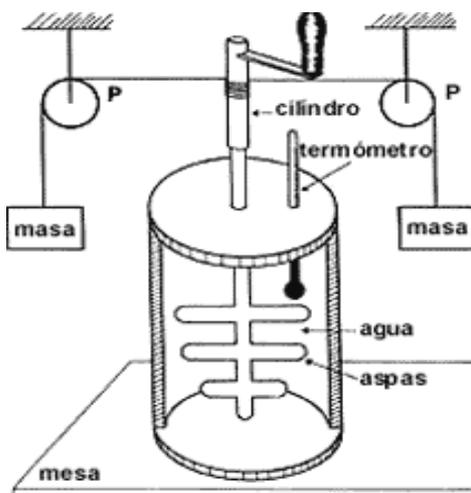
mitad de la masa tendrá la mitad de la energía térmica. Es decir, la temperatura de un objeto no depende de su masa (la temperatura es una propiedad intensiva del sistema).

El camino hacia la primera ley de la termodinámica: las transformaciones de la energía

La idea de que la energía (esa capacidad de transformar la materia) puede convertirse de una forma en otra, comenzó a tomar importancia en el mundo de la ciencia moderna a principios del siglo XIX. Una serie de observaciones experimentales y reflexiones teóricas indicaban la existencia de una relación entre la energía térmica y otras formas de energía.

En 1798, Benjamín Thompson, conde de Rumford, observando los procesos que ocurrían en la fabricación de cañones, llegó a conclusiones muy importantes que contradecían lo que en ese momento los científicos pensaban sobre la naturaleza del calor. La idea que prevalecía en esa época era que el calor era un fluido ingrávido llamado calórico y que como tal fluía de un cuerpo a otro. Un cuerpo con mucho calórico cedía parte de él a otro cuerpo con menos calórico hasta llegar a la misma temperatura, es decir al equilibrio térmico. Sin embargo, Rumford observó que cuando se agujereaba una pieza de bronce con un taladro para hacer un cañón, se producía una gran cantidad de calor (el agua, provista continuamente, que se empleaba para refrigerar el proceso aumentaba su temperatura hasta hervir, de manera constante). Mientras se mantenía el movimiento del taladro, se producía calor. Propuso entonces que la energía que tenían los caballos que movían el taladro y que habían conseguido comiendo pasto, producía el movimiento del mismo contra la pieza de bronce y este rozamiento producía calor. Esta manera de interpretar el proceso que se le llamó “el círculo de la energía”, contradecía la teoría del calórico pero no tuvo ninguna aceptación y quedó en el olvido durante unos 50 años. Hasta que, en el año 1842, un joven y desconocido médico alemán, Julius Robert Mayer, propuso en un ensayo lo siguiente: “Las distintas formas de energía son cuantitativamente indestructibles y cualitativamente convertibles. Todas las manifestaciones de la energía son transformables unas en otras y la energía como un todo se conserva.” Su trabajo, si bien muy importante, no fue considerado seriamente, en parte debido a que no se basaba en resultados experimentales y en parte porque, en el mundo científico, Mayer estaba considerado como un aficionado.

Sin embargo un año después de este escrito de Mayer, se hizo pública la primera información del importante trabajo experimental de James Prescott Joule. Este genial científico amateur₃ realizó muchos experimentos en los cuales utilizaba distintos medios para generar calor. El más famoso fue el que se muestra en la siguiente figura.



Aparato empleado por Joule en la medición de equivalente mecánico del calor. Las pesas se enrollan por medio de la manivela sobre el cilindro. La cuerda pasa por las poleas. La altura de las pesas sobre el suelo es conocida y la temperatura del agua se controla mediante el termómetro. Las pesas al caer, hacen girar las aspas. Este movimiento produce un aumento de la energía cinética del agua lo cual se traduce en un cambio de temperatura registrado por el termómetro

Los experimentos realizados por Joule permitieron concluir que cuando a un sistema aislado de su exterior, es decir, que no intercambia ni materia ni energía con el ambiente, se le suministra trabajo mecánico, sin importar la forma en que se haga, se obtiene una cantidad equivalente de energía térmica (el equivalente mecánico del calor) que se cuantifica por el aumento de temperatura del agua. Esta afirmación avala el principio de conservación de la energía.

Entonces las evidencias experimentales sugerían que el calor no era un fluido que pasaba de un cuerpo a otro sino otra cosa y en los últimos años de la década de 1860 la teoría del “calórico” estaba totalmente en decadencia.

Hoy se acepta como una ley general y empírica que cuando las transformaciones energéticas ocurren en un sistema aislado, la energía total del sistema permanece constante. En el Universo, el único sistema realmente aislado, se cumple lo que se denomina la **Primera Ley de la Termodinámica: “La energía del universo permanece constante: la energía puede ser transferida y transformada pero nunca puede ser creada ni destruida”.**

La historia de nuestro conocimiento acerca de los principios que rigen las transformaciones energéticas, la historia de **la termodinámica**, está íntimamente relacionada con la del desarrollo de las máquinas. Sin embargo, muy pronto los físicos comprendieron que las reglas formuladas por los principios termodinámicos no solo permitían describir las transformaciones energéticas producidas en máquinas fabricadas por el hombre, sino que también eran útiles para comprender todos los procesos naturales. Más tarde los biólogos, que aspiraban a dar explicaciones físicas sobre los sistemas vivos, incorporaron en sus interpretaciones los principios fundamentales derivados de esta disciplina.

La primera ley de la termodinámica y los sistemas vivos

A diferencia del aparato diseñado por Joule, los sistemas biológicos son abiertos, es decir que pueden intercambiar libremente materia y energía con su entorno. Aun así, en los sistemas

abiertos, el principio de conservación de la energía continúa cumpliéndose. La diferencia radica en donde se establecen los límites del sistema en estudio. En un organismo la energía perdida o disipada por éste es igual a la ganada por su entorno y viceversa.

Sin embargo, el primer principio de la termodinámica se refiere a la conservación de una cantidad total de energía y no aclara que, cada vez que se realiza un proceso, parte de la energía involucrada se transforma de energía “útil” en energía que no puede ser aprovechada de nuevo. Esta observación incontrovertible modificó la escena del pensamiento en aquellos científicos que estaban estudiando los balances energéticos de las máquinas térmicas. Una forma de energía, el calor, no era completamente transformable en otras formas de energía. Esto es el resultado de un hecho de validez universal en la naturaleza: *“el trabajo puede transformarse en calor, sin restricciones, pero el calor no puede transformarse en trabajo sin restricciones*

En rigor cada vez que se utilice cualquier tipo de energía para conducir un proceso, de manera inevitable, parte de ella se pierde como calor. Este hecho generó la aparición de nuevos conceptos, como el de “eficiencia” en la transferencia de energía. La eficiencia depende del tipo de transformación y fundamentalmente del dispositivo que vincule los diferentes tipos de energía. Las viejas locomotoras de vapor tenían una eficiencia de menos de 10%, en los motores que utilizan combustibles fósiles la eficiencia real es de poco más del 50% y en las celdas solares, la eficiencia alcanza el 30%.

Los organismos pueden ser considerados dispositivos altamente eficientes en las transformaciones energéticas. Existen ejemplos muy notables como los organismos bioluminiscentes, que emiten una luz verdosa y “fría” sin producir calor alguno. La eficiencia energética de este mecanismo (cerca del 100%) sigue siendo un misterio para los investigadores. Pero, de manera mucho más general, la gran mayoría de las células funcionan como máquinas que transforman la energía química de moléculas como la glucosa en energía útil para su metabolismo mediante su oxidación con el O₂. Este proceso llamado respiración celular, desde el punto de vista químico, se asemeja con los procesos de combustión, proceso rápido en el que generalmente un compuesto que contiene carbono se oxida, liberándose dióxido de carbono, agua y calor. Sin embargo cuando los seres vivos oxidan carbohidratos, convierten en forma controlada (mediante pasos intermedios) gran parte de la energía almacenada en los enlaces químicos en otras formas de energía útil para el metabolismo.

GLUCOSA + OXÍGENO = DIÓXIDO DE CARBONO + AGUA+ENERGÍA

Según la primera ley de la termodinámica, la suma de la energía de los productos más la energía perdida (disipada) durante la reacción es igual a la energía inicial contenida en las sustancias que reaccionan. Independientemente de la cantidad de pasos involucrados para llegar desde glucosa y oxígeno a dióxido de carbono y agua, la energía liberada por el proceso será siempre la misma. Entonces, en la oxidación de la glucosa, la energía liberada está compuesta por una fracción útil y otra que se disipa como inútil (energía degradada, como por ejemplo calor).

ENERGÍA TOTAL LIBERADA = ENERGÍA ÚTIL + ENERGÍA DISIPADA

Cada vez que se emplea una cantidad de energía, inevitablemente una fracción de ella se disipa como calor. Pero la energía total del Universo es siempre la misma y dado que la energía no se crea ni se destruye, la energía térmica aumenta constantemente, en detrimento de otras formas de energía.

Dirección del los procesos naturales: la segunda ley de la termodinámica

Cuando observamos los procesos que ocurren en la naturaleza, sin saber nada de termodinámica, en muchos casos, podemos predecir la dirección en que van a ocurrir. Una roca sólo rodará cuesta abajo, el calor sólo fluirá de un objeto caliente a otro frío, una pelota que se dejó caer rebotará pero nunca llegará hasta la misma altura desde la que cayó. Para que ocurran procesos que transformen energía es necesario que existan desniveles o gradientes. Estos procesos tienden a homogeneizar el sistema disipando los gradientes hasta alcanzar un estado de equilibrio.

La **segunda ley de la termodinámica** establece la noción de que existe una dirección hacia la cual cualquier sistema que esté fuera del equilibrio tiende a desplazarse. Al hacerlo se disipa energía. Cuando toda la energía útil se haya disipado, en el sistema no podrán ocurrir más procesos.

En términos energéticos, podemos pensar en los desequilibrios y heterogeneidades como almacenamientos de energía útil que permiten que se lleven a cabo los procesos. Como mencionamos, la cantidad de energía útil será:

$$\text{ENERGIA ÚTIL} = \text{ENERGÍA TOTAL} - \text{ENERGÍA DISIPADA}$$

En la década de 1850, el físico alemán Rudolf Clausius (1822-1888) formalizó esta ecuación al estudiar el importante papel de esa energía inevitablemente disipada. Expresó esta fracción energética como el producto de la temperatura (T) por un factor al que llamó entropía (del griego tropos que significa cambio, transformación) y lo simbolizó con la letra S.

$$\text{ENERGÍA DISIPADA} = T \times S$$

Supongamos que disponemos de una baraja de naipes: una mitad se utiliza para construir un castillo (sistema 1) y la mitad restante se deja de manera desordenada al lado del castillo (sistema 2). Tenemos así dos sistemas contruidos con el mismo tipo y número de componentes pero que tienen dos configuraciones o estados diferentes. Si los abandonamos a su suerte, es fácil suponer que después de transcurrido cierto tiempo. La probabilidad de encontrarlos en sus configuraciones iniciales será mucho menor para el primer sistema que para el segundo. La condición de equilibrio es el estado más probable de un sistema. Desde el punto de vista de la energía gravitacional de sus componentes, el estado o configuración del castillo es más ordenado, menos probable y menos uniforme. Cualquiera de los estados desordenados es más probable y más uniforme. Un sencillo experimento para demostrar esto consiste en arrojar los naipes al aire y verificar cuantas veces debemos repetir la experiencia para que un grupo de cartas quede dispuesta

en la configuración de castillo. Sin duda la manera más efectiva de construir un castillo de naipes será utilizar información que describa la estructura y utilizar energía para producir orden. Resulta claro que, librado a su suerte y sin un ingreso constante de energía invertido en mantener esta estructura (castillo de naipes) el sistema se derrumbará, disipando la energía potencial gravitacional almacenada. Durante esta transformación, el sistema disipa energía útil y la entropía aumenta. En el estado final de equilibrio las heterogeneidades iniciales desaparecen y el sistema se homogeniza y pierde información. Así, el estado más probable es del de mayor desorden o bien de mayor entropía.

En cualquier sistema aislado, los procesos no serán causados por agentes externos a él. Estos procesos internos, que serán considerados espontáneos, ocurren porque en el sistema hay heterogeneidades: si una porción o parte del sistema está más caliente que el resto, esa porción se enfriará hasta que todo el sistema tenga una temperatura uniforme; si existen diferencias de cargas, se producirán corrientes eléctricas que las compensarán; si existen regiones donde el potencial químico es mayor, éste se disipará hasta homogeneizarse. Cuando todos estos procesos hayan compensado los desniveles o gradientes que los originaron, el sistema habrá alcanzado un equilibrio y toda la energía útil se habrá disipado. Entonces, la entropía del sistema habrá llegado a un máximo.

Así, en los sistemas aislados, la entropía nos permite predecir la dirección de los procesos espontáneos.

En síntesis: los dos principios fundamentales de la termodinámica, formulados a principios de la segunda mitad del siglo XIX por Clausius, se enuncian como sigue:

Dado que el Universo es un sistema completamente aislado:

Primera ley: la energía del Universo es constante

Segunda ley: la entropía del Universo tiende a un máximo

Los sistemas biológicos y la segunda ley de la termodinámica

Podemos establecer una analogía entre el castillo de naipes y un sistema vivo: ambos sistemas son estructuras complejas, muy ordenadas y muy alejadas del equilibrio termodinámico. Entonces ¿Cómo consiguen mantenerse (por un determinado tiempo) estas estructuras tan ordenadas en un Universo en el que la entropía tiende a aumentar? y ¿Cómo se originaron los sistemas vivos?

El concepto de entropía es fundamental para responder a estas preguntas desde el punto de vista de la termodinámica. Según sus leyes, la entropía funciona como una especie de cuenta regresiva. Dado que todos los procesos llevan de manera inevitable a la disipación de gradientes, tarde o temprano estos desaparecerán. Entonces cuando no haya desniveles, ni gradientes, ni heterogeneidades, ni ocurra ningún proceso neto, el sistema habrá alcanzado el equilibrio. Toda

la energía útil se habrá disipado, la entropía habrá alcanzado un máximo. La uniformidad habrá reemplazado a las heterogeneidades.

En la misma época, principios del siglo XX, que los físicos concebían el Universo evolucionando hacia la uniformidad, los biólogos presentaban la historia de la vida planteando que la materia se había auto-organizado espontánea y progresivamente, formando primero células simples, luego organismos pluricelulares en los que más tarde las células se especializaron y se organizaron en organismos más sofisticados y complejos.

Por lo menos para los físicos de la época el fenómeno de la vida estaba en franca discrepancia con los principios establecidos por la termodinámica ya que la probabilidad de que moléculas de mayor o menor complejidad se hubieran asociado en forma espontánea formando estructuras tan complejas como una célula, era un suceso de probabilidad muy baja (recordar los naipes). Frente a esta contradicción, sus trabajos se restringieron al estudio del comportamiento de sistemas materiales no vivos.

Sin embargo, a mediados del siglo XX, el físico austríaco Erwin Schrödinger (1887-1961), una figura central en la ciencia de esa época, aportó la solución a este problema que parecía insalvable. En un pequeño libro titulado *¿Qué es la vida?* (1944) en el cual utilizó conceptos de la física, la química y la biología, hizo notar que en los organismos conviven dos procesos esenciales:

- la generación de orden a partir del orden y
- la generación de orden a partir del desorden

Con el **“orden a partir del orden”**, intentó explicar la capacidad de los organismos de producir réplicas de sí mismos e incluso de la aparición de variaciones genéticas al azar y heredables. Schrödinger creía que el gran orden que reina en la materia viva estaba regido por información almacenada en un microcódigo. Suponía que algún tipo de cristal aperiódico era el sustrato físico que permitía almacenar esa información y sobre el que podían tallarse las pequeñas variaciones que posteriormente resultarían heredables. Como verán más adelante, una década más tarde Watson y Crick describieron la estructura del ADN, una macromolécula que reúne muchas de las condiciones anticipadas por Schrödinger, necesaria para almacenar la información genética. La otra idea, **“orden a partir de desorden”** aunque igualmente anticipadora, no fue bien comprendida.

Estas reflexiones dieron lugar al inicio de una serie de investigaciones centradas en la comprensión de los balances energéticos de los sistemas abiertos, alejados del equilibrio, como los sistemas vivos (**la termodinámica del no equilibrio**).

Las células vivas no solo no están en equilibrio sino que están muy alejadas de él. Dentro de una célula las heterogeneidades son la norma y están atravesadas constantemente por flujos de materia y energía. Por lo tanto, para comprender los balances energéticos que existen en ellas (sistemas abiertos alejados del equilibrio) se debe considerar un sistema más amplio: *“el sistema biológico debe considerarse juntamente con su entorno”*

Un organismo se mantiene vivo, organizado, tomando energía del ambiente y procesándola a través de su eficiente maquinaria química. Éste utiliza las transformaciones energéticas para las diferentes funciones celulares y mantener así su organización interna. Durante estos procesos, las células aumentan la entropía (desorden) de su entorno ya sea entregando calor al medio o materia más desordenada (por ejemplo moléculas más simples a partir de moléculas más complejas).

Entonces la ecuación para predecir los procesos espontáneos en sistemas aislados:

$$S_{final} - S_{inicial} > 0$$

Debe replantearse para los sistemas abiertos:

$$(S_{final\ del\ sistema} + S_{final\ del\ entorno}) - (S_{inicial\ del\ sistema} + S_{inicial\ del\ entorno}) > 0$$

De esta forma el segundo principio de la termodinámica también se cumple en el caso de los sistemas biológicos, dado que la entropía del conjunto (organismo vivo + entorno) está en permanente aumento.

Estos conceptos que acabamos de formular sirven para explicar como un sistema ordenado, con información, se mantiene en el tiempo pero no dice nada sobre la manera en que estas estructuras tan improbables pudieron aparecer por primera vez (el origen de la vida).

Sin embargo, la otra intuición de Schrödinger: **“orden a partir del desorden”** se relaciona más directamente con esa problemática. Esta concepción fue formalizada por el físico Ilya Prigogine (1917-2003), la figura más trascendente de esta nueva línea de investigación conocida como la termodinámica del no equilibrio, quien demostró que lejos del equilibrio, **un sistema caótico (desordenado) puede auto-organizarse.**

Llamó **estructuras disipativas** a aquellos sistemas alejados del equilibrio que en su evolución hacia un nuevo estado de equilibrio, sufren procesos de **auto-organización.**

Ejemplos de estructuras disipativas:

Celdas de Bernard

Uno de los ejemplos clásicos para ilustrar este concepto es la llamada “Inestabilidad o celdas de Bernard”. Este fenómeno ocurre cuando se calienta una olla de agua o cuando el calor levanta en el desierto pequeñas partículas de arena en el aire nocturno.

Si el agua se calienta lentamente, el calor inicialmente se mueve hacia el agua fría a través de la conducción. Al principio del calentamiento ninguna parte del líquido está lejos del equilibrio térmico y la superficie superior no presenta ninguna perturbación. Sin embargo, cuando el agua del fondo se calienta suficientemente, y por lo tanto es menos densa, tiende a subir mientras que, al mismo tiempo, el agua más fría desciende. Bajo estos flujos contrarios, el agua ahora está lejos del equilibrio y contiene una mezcla de flujos, remolinos y espirales, a pequeña escala, no visibles. En determinado momento el sistema agua alcanza un **punto crítico** en el que, como un todo, pasa del **desorden al orden.** Esto ocurre cuando el calor ya no se dispersa lo suficientemente rápido sólo a través de movimientos moleculares fortuitos (conducción), y los pequeños remolinos de repente se transforman en flujos a gran escala. Casi mágicamente, el movimiento del líquido se

convierte en una serie de corrientes estables de convección que producen un patrón ordenado en forma de celdas hexagonales o espirales, observables en la superficie del líquido. Cuando esto ocurre el gradiente antes formado desaparece: la mencionada turbulencia anula las diferencias térmicas en el agua. Estas celdas de Bernard se pueden ver a veces en la superficie de una taza de café que se enfría cuando se observa desde un determinado ángulo. Patrones similares se pueden observar si uno sobrevuela el desierto por la noche. Este fenómeno aparentemente improbable es el resultado directo del gradiente de temperatura aplicado y de la dinámica del sistema en juego, y es la respuesta del sistema a su desplazamiento lejos del equilibrio.

La reacción de Belousov-Zhabotinsky

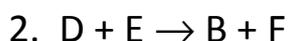
Ya hemos discutido sobre cómo los gradientes térmicos en un sistema físico simple pueden llevar a la auto-organización, ahora veremos cómo los gradientes químicos también pueden producir reacciones autocatalíticas disipativas. Un ejemplo muy conocido es la reacción química de Belousov-Zhabotinsky.

Recordemos que una reacción química uno o más compuestos químicos, denominados reactivos interactúan entre sí y se transforman en otros compuestos químicos denominados productos. La conversión de reactivos en productos no es una transformación instantánea, sino que se produce con una cierta velocidad. En muchos casos es posible percibir a simple vista el avance de la reacción si los reactivos y productos difieren en alguna propiedad fácilmente observable, como en el caso de tener distinto color.

La reacción BZ se distingue de muchas otras reacciones químicas en que una vez mezclados los reactivos en una solución acuosa, luego de uno minutos se observa que la solución comienza a cambiar de color de manera periódica.

El cambio periódico en la coloración de la solución dejó perplejo a B. P. Belousov, el descubridor de la reacción, y también a sus colegas, ya que las reacciones conocidas hasta entonces no mostraban un comportamiento similar, y se atribuyó la rareza a un error experimental. No fue sino hasta la década de los años 70 que el investigador Zhabotinsky confirmó los resultados de Belousov, y la reacción fue aceptada como un hecho científico.

Con el estudio del mecanismo de la reacción BZ se descubrió que a pesar de que los reactivos que se mezclan originalmente son muy pocos (apenas 3 compuestos), al reaccionar estas sustancias se producen otras, que reaccionan a su vez entre sí, originando un sistema de reacciones químicas acopladas, denominado así porque los productos de una reacción actúan como los reactivos de otra reacción química. Se estableció que el sistema de reacciones químicas es el siguiente:



3. $F \rightarrow E$

Debe tenerse en cuenta que las reacciones 1, 2, y 3 se producen simultáneamente para conformar este sistema de reacciones. Por eso es posible que por ejemplo en la reacción 1 intervengan como catalizadores o inhibidores compuestos de las reacciones 2 o 3.

Los reactivos que se mezclan al inicio de la reacción son el A, con una cantidad baja de B y E. La reacción finaliza cuando todo el reactivo A se ha convertido en el producto C. A diferencia de lo que ocurre en las reacciones químicas comúnmente conocidas, en BZ la concentración de ciertos compuestos aumenta y disminuye cíclicamente a medida que avanza la reacción. Los cambios en la coloración se producen por cambios en las concentraciones de los compuestos B y D, que tienen distinto color.

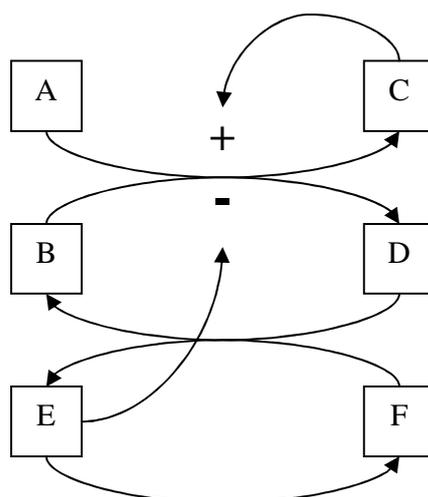


Figura 3. Diagrama del sistema de reacciones de Belousov – Zhabotinsky que incluye la representación de la catálisis de la reacción 1 por el compuesto C y su inhibición por el compuesto E (ver explicación en el texto).

El comportamiento oscilante del sistema BZ se puede comprender al conocer cómo interactúan las sustancias entre sí, más allá de la naturaleza química de los compuestos involucrados. Las oscilaciones en este sistema se producen por la presencia de dos procesos particulares: una **retroalimentación positiva** y una **retroalimentación negativa**.

La **retroalimentación positiva** se da cuando en un sistema uno de los componentes favorece directa o indirectamente su propia formación o incremento. Un ejemplo de este fenómeno es el de los incendios, en los que la combustión de un elemento produce calor, y de esta manera favorece la combustión de nuevos materiales, lo que a su vez produce más calor,

siendo esta la razón por la cual los incendios son muy difíciles de controlar una vez que se han expandido lo suficiente. Esta relación entre los componentes de un sistema produce efectos que podríamos llamar explosivos, que se extienden hasta que las entradas de los componentes del sistema son agotadas. En nuestro ejemplo, un incendio se detiene cuando se ha agotado todo el material inflamable.

La **retroalimentación negativa**, en cambio, se da cuando un componente inhibe directa o indirectamente su propia formación o crecimiento. Un ejemplo de esta clase de interacción entre la muy bien conocida sensación de hambre y el alimento ingerido: cuando no comemos por algunas horas comenzamos a sentir hambre, pero al ingerir alimento dejamos de tener esa sensación, por lo que dejamos de comer. Este fenómeno tiende a regular el nivel de los componentes en un cierto rango, como podemos apreciar en el ejemplo anterior. En la figura 4 podemos observar cómo se pueden representar los ciclos de retroalimentación.

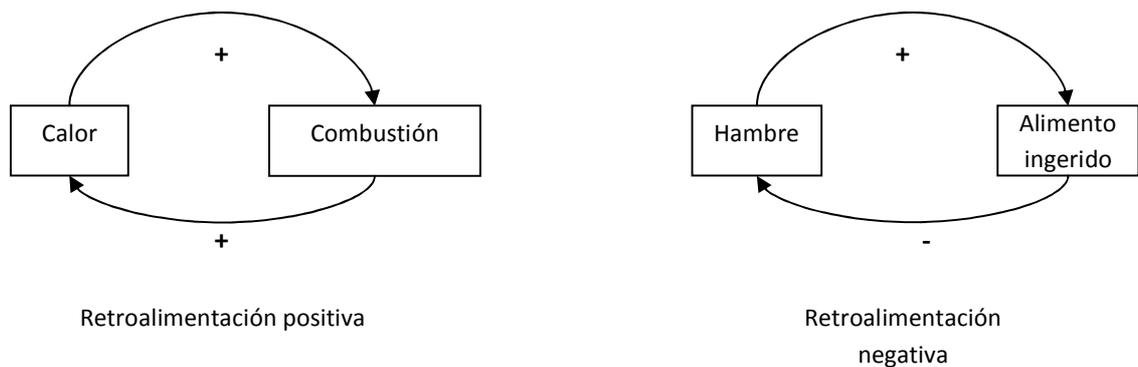


Figura 4. Representación de los ciclos de retroalimentación.

Volviendo al sistema BZ, podemos entender ahora donde se originan los ciclos de retroalimentación: el compuesto C favorece su propia formación, generando una retroalimentación positiva, mientras que el compuesto F inhibe (de manera indirecta) su propia formación, produciendo una retroalimentación negativa.

Los sistemas vivos como estructuras disipativas

El metabolismo celular es el conjunto de complejas reacciones químicas interrelacionadas entre sí y en donde son muy frecuentes los procesos de retroalimentación positiva y negativa. En estas condiciones los procesos de auto-organización son muy probables. Son ejemplos de esto las reacciones de la síntesis proteica, las reacciones auto catalíticas de fosforilación, polimerización e hidrólisis (sistemas de reacción autocatalíticos).

En la última década se ha comprobado la existencia de este tipo de mecanismos de auto-organización en niveles de organización superiores al nivel celular, como por ejemplo, en la

dinámica de la agregación de hongos y bacterias, o en los patrones de las manchas de la piel de diversos mamíferos y peces. Al decir de Strier (2002); “El hecho de que los seres vivos no sean solo exitosas adaptaciones a las restricciones físicas impuestas, sino también hábiles usufructuadores de sus elementos creadores de estructura y complejidad, abre una nueva perspectiva desde donde pensar los sistemas biológicos y su evolución”.

A modo de reflexión final diremos que a partir del **surgimiento** de los primeros seres vivos (el origen de la vida), acontecimiento en el cual los procesos de tipo **orden a partir del desorden** fueron fundamentales, su **continuidad** se basa no solo en procesos de tipo **orden a partir de orden** (los genes) sino también en procesos de tipo **orden a partir de desorden** (estructuras disipativas).

BIBLIOGRAFÍA

Cerejido M. 1970. “Orden, equilibrio y desequilibrio. Una introducción a la Biología”. Ed. Nueva Imagen, México.

Curtis, Helena y Barnes, N. Sue. 1998. Biología. Sexta Edición. Editorial Médica Panamericana, Buenos Aires.

Flos, Jordi. 1998. Ecología. Entre la magia y el tópico. Ediciones Omega, Barcelona.

Maturana H. y Varela F. 1992. “ El árbol del conocimiento”. 8ª Edición. Ed. Universitaria, Sgo de Chile.

Morowitz, Harold J. 1971. Entropía para biólogos. H. Blume Ediciones

Murphy, Michael P. y O'Neill, Luke A.J. (editores). 1999. La biología del futuro. ¿Qué es la vida? Cincuenta años después. Tusquets Editores, Barcelona.

Odum, Howard T. y Odum, Elisabeth C. 1981. Hombre y Naturaleza. Bases Energéticas. Omega. Prigogine, Ilya. 1997. El fin de las certidumbres. Editorial Taurus, Madrid.

Schrödinger E. 1985. “¿Qué es la vida? “. Ed. Hispamérica, Buenos Aires.

Strier, Damián. 2002. Procesos de autoorganización en sistemas biológicos. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas. Universidad de Buenos Aires. 133 pp.

Von Bertalanffy L. 1976. “Teoría general de los sistemas”. Fondo de Cultura Económica. México.