

## Capítulo 7. El flujo de energía

Los sistemas vivos convierten la energía de una forma en otra a medida que cumplen funciones esenciales de mantenimiento, crecimiento y reproducción. En estas conversiones energéticas, como en todas las demás, parte de la energía útil se pierde en el ambiente en cada paso.

Las leyes de la termodinámica gobiernan las transformaciones de energía. La primera ley establece que la energía puede convertirse de una forma a otra, pero no puede crearse ni destruirse. La segunda ley establece que en el curso de las conversiones energéticas, el potencial termodinámico -o energía potencial termodinámica- de un sistema en el estado final siempre será menor que el potencial termodinámico del mismo sistema en el estado inicial. Otra manera de enunciar la segunda ley de la termodinámica es que todos los procesos naturales tienden a ocurrir en una dirección tal que la entropía (la medida del "grado de desorden" o de "aleatoriedad") del Universo se incrementa. Para mantener la organización de la cual depende la vida, los sistemas vivos deben tener un suministro constante de energía que les permita superar la tendencia hacia el desorden creciente. El Sol es la fuente original de esta energía.

Las transformaciones energéticas en las células vivas implican el movimiento de electrones de un nivel energético a otro y, frecuentemente, de un átomo o molécula a otro. Las reacciones de oxidación-reducción implican movimiento de electrones de un átomo a otro. Un átomo o molécula que pierde electrones se oxida; el que los gana se reduce.

El total de las reacciones químicas que ocurren en las células constituyen el metabolismo. Las reacciones metabólicas ocurren en series, llamadas vías, cada una de las cuales sirve a una función determinada en la célula. Cada paso en una vía es controlado por una enzima específica. Las reacciones escalonadas de las vías enzimáticas les permiten a las células llevar a cabo sus actividades químicas con una notable eficiencia, en lo que concierne a la energía y a los materiales.

Las enzimas funcionan como catalizadores biológicos. Así, disminuyen la energía de activación e incrementan enormemente la velocidad a la que se producen las reacciones químicas. Las reacciones catalizadas por enzimas están bajo un estricto control celular. Los principales factores que influyen sobre la velocidad de las reacciones enzimáticas son las concentraciones de enzima y de sustrato y la disponibilidad de los cofactores requeridos. Muchas enzimas son sintetizadas por las células o activadas sólo cuando son necesarias.

El ATP es el principal transportador de energía en la mayoría de las reacciones que tienen lugar en los sistemas vivos. Las células son capaces de llevar a cabo procesos y reacciones endergónicas (tales como reacciones biosintéticas, transporte activo o el movimiento de microtúbulos) acoplándolas a reacciones exergónicas que suministran un exceso de energía. Estas reacciones acopladas generalmente involucran a compuestos trifosfato como el ATP u otros. Las familias de enzimas denominadas quinasas y fosforilasas adicionan o remueven un grupo fosfato a otra molécula respectivamente. La transferencia de grupos fosfato -o fosforilación- cumple un papel importante en la regulación de muchas reacciones químicas de la célula.

### Las leyes de la termodinámica

La primera ley de la termodinámica establece que la energía puede convertirse de una forma a otra, pero no puede crearse ni destruirse. La energía puede almacenarse en varias formas y luego transformarse en otras. Cuando los organismos oxidan carbohidratos, convierten la energía almacenada en los enlaces químicos en otras formas de energía. En una noche de verano, por ejemplo, una luciérnaga convierte la energía química en energía cinética, en calor, en destellos de luz y en impulsos eléctricos que se desplazan a lo largo de los nervios de su cuerpo. Las aves y los mamíferos convierten la energía química en la energía térmica necesaria para mantener su temperatura corporal, así como en energía mecánica, energía eléctrica y otras formas de energía química. En el caso de las reacciones químicas, esto significa que la suma de la energía de los productos de la reacción y la de la energía liberada en la reacción misma es igual a la energía inicial de las sustancias que reaccionan.

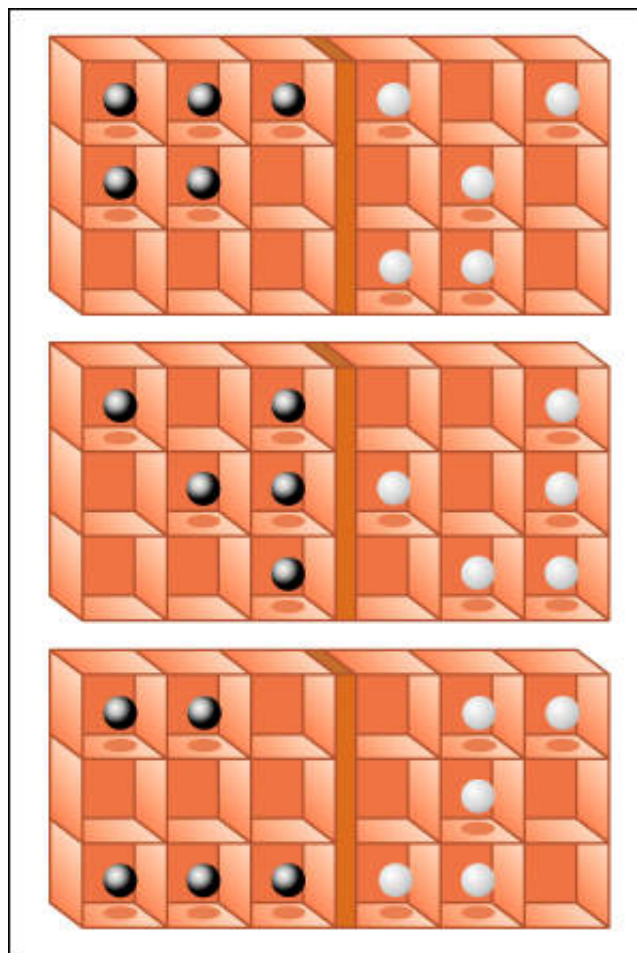
La segunda ley establece que en el curso de las conversiones energéticas, el potencial termodinámico -o energía potencial termodinámica- de un sistema en el estado final siempre será menor que el potencial termodinámico del mismo sistema en el estado inicial. La diferencia entre los potenciales termodinámicos de los estados inicial y final se conoce como cambio en la energía libre (o de Gibbs)  $\Delta G$  del sistema y se simboliza como  $\Delta G$ .

Las reacciones exergónicas (que liberan energía) tienen un  $\Delta G$  negativo y las reacciones

endergónicas (que requieren de energía) tienen un DG positivo. Los factores que determinan el DG incluyen DH, el cambio en el contenido de calor, y DS, el cambio en la entropía, que es una medida del comportamiento aleatorio o desorden del sistema. Estos factores se relacionan según la siguiente fórmula:  $DG=DH - TDS$ .

La entropía de un sistema es una medida del "grado de desorden" o "grado de aleatoriedad" de ese sistema. Supongamos que dividimos el espacio contenido en una caja en pequeños compartimientos y queremos distribuir moléculas de dos gases -a las que llamaremos moléculas "blancas" y moléculas "negras"- en esos compartimientos. Hay muchas más maneras de disponer las moléculas dentro de la caja si no establecemos ninguna restricción que si pedimos, por ejemplo, que todas las moléculas "blancas" estén de un lado de la caja y todas las "negras" del otro. Decimos que el sistema de moléculas está más "ordenado" en el último caso. Pero, ¿qué significa esto? Si representamos el "orden" del sistema con el número de maneras de disponer sus elementos internamente, un número mayor de maneras de disponer los elementos implica un sistema menos ordenado, o bien, más desordenado. Diremos que la entropía del sistema está asociada al número de maneras mencionado, de forma que un sistema más desordenado posee mayor entropía.

Entonces, otra manera de enunciar la segunda ley de la termodinámica es que todos los procesos naturales tienden a ocurrir en una dirección tal que la entropía del Universo se incrementa. Para mantener la organización de la cual depende la vida, los sistemas vivos deben tener un suministro constante de energía que les permita superar la tendencia hacia el desorden creciente. El Sol es la fuente original de esta energía.



En la figura se muestran tres maneras distintas de disponer moléculas de dos gases diferentes en una caja con una restricción: las "moléculas blancas" se colocan de un lado y las "moléculas negras" del otro. Cuanto más restricciones pongamos, más ordenado está el sistema.

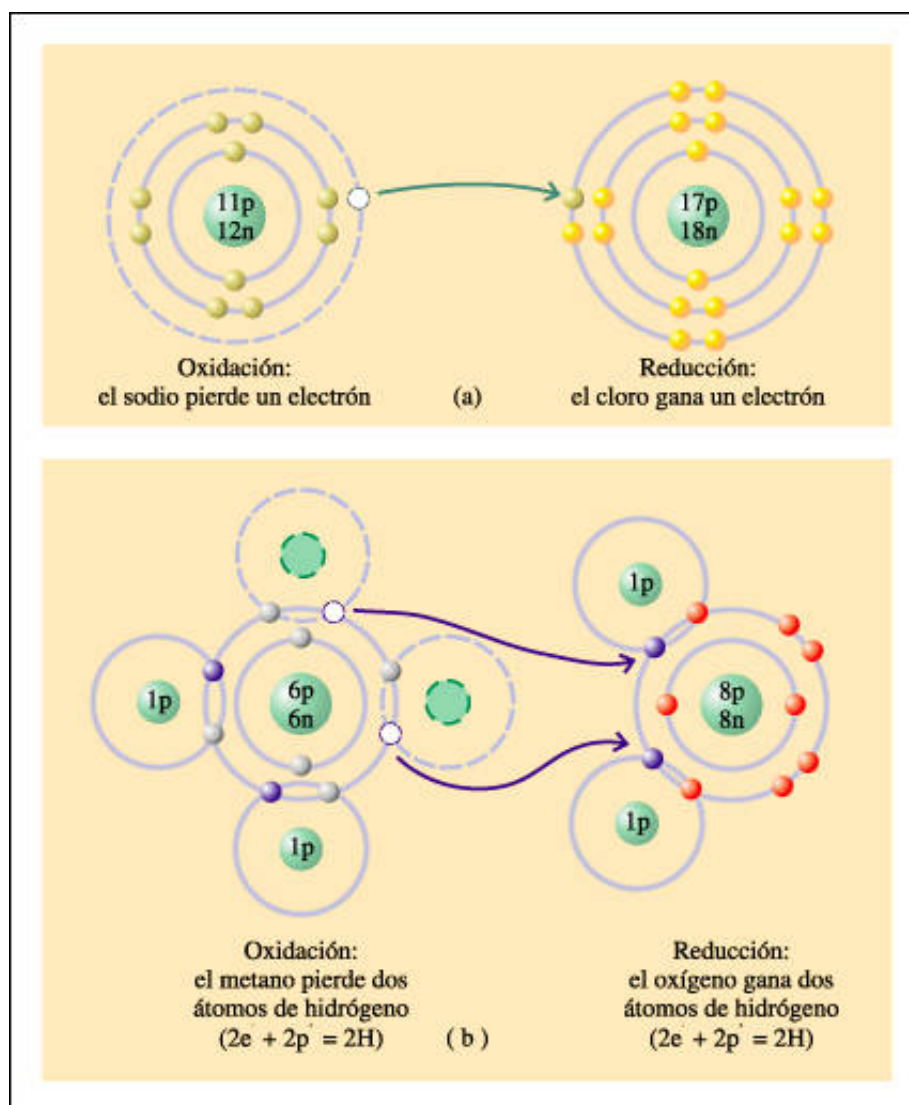
## Reacciones de oxidación-reducción

Los electrones poseen diferentes cantidades de energía potencial dependiendo de su distancia al

núcleo del átomo y de la atracción ejercida por el núcleo sobre ellos. Un ingreso de energía lanzará a un electrón a un nivel energético más alto, pero si no se añade energía, el electrón permanecerá en el nivel energético más bajo que encuentre disponible.

Las reacciones químicas son, esencialmente, transformaciones de energía en virtud de las cuales la energía almacenada en los enlaces químicos se transfiere a otros enlaces químicos recién formados. En estas transferencias, los electrones se desplazan de un nivel de energía a otro. En muchas reacciones, los electrones pasan de un átomo o molécula a otro. Estas reacciones, que son de gran importancia en los sistemas vivos, se conocen como de oxidación-reducción -o redox-. La pérdida de un electrón se denomina oxidación y el átomo o molécula que pierde el electrón se dice que se ha oxidado. La razón de que la pérdida de electrones se conozca como oxidación es que el oxígeno, que atrae muy fuertemente a los electrones, es el que por lo general actúa como aceptor de electrones.

La reducción es, por el contrario, la ganancia de un electrón. La oxidación y la reducción siempre ocurren simultáneamente, porque el electrón que pierde el átomo oxidado es aceptado por otro átomo que se reduce en el proceso. En las reacciones de oxidación-reducción se produce un movimiento de electrones de un átomo a otro. Un átomo o molécula que pierde electrones se oxida; el que los gana se reduce.



Una reacción de oxidación-reducción.

- La oxidación del sodio y la reducción del cloro.
- Otra reacción de oxidación-reducción; oxidación parcial del metano ( $CH_4$ ).

En algunas reacciones de oxidación-reducción, como la oxidación del sodio y la reducción del cloro, se transfiere únicamente un electrón de un átomo a otro. Estas simples reacciones son típicas de los elementos o de las moléculas inorgánicas. En otras reacciones de oxidación-reducción, como esta oxidación parcial del metano ( $CH_4$ ), electrones y protones van juntos. En estas reacciones -muy comunes entre moléculas orgánicas- la oxidación es la pérdida de

átomos de hidrógeno y la reducción es la ganancia de átomos de hidrógeno. Cuando un átomo de oxígeno gana dos átomos de hidrógeno, como se muestra en la figura, evidentemente el producto es una molécula de agua.

En los sistemas vivos, las reacciones que capturan energía (fotosíntesis) y las reacciones que liberan energía (glucólisis y respiración), son reacciones de oxidación-reducción. La oxidación completa de un mol de glucosa libera 686 kilocalorías de energía libre; de modo inverso, la reducción del dióxido de carbono para formar un mol de glucosa almacena 686 kilocalorías de energía libre en los enlaces químicos de la glucosa. Si esta energía fuera liberada de una sola vez, la mayor parte se disiparía como calor. Esto no solamente no sería útil para la célula, sino que la alta temperatura resultante sería letal. Sin embargo, la vida ha evolucionado adquiriendo mecanismos que regulan la marcha de estas reacciones químicas y una multitud de otras, de modo tal que la energía se almacena en enlaces químicos particulares de los que puede ser liberada en pequeñas cantidades cuando la célula lo necesite. Estos mecanismos, con la aparición de nuevos tipos de moléculas, permiten un aprovechamiento eficaz de la energía sin alterar el delicado equilibrio que caracteriza a los sistemas biológicos. Implican generalmente secuencias de reacciones, algunas de las cuales son reacciones de oxidación-reducción. Aunque cada reacción en la secuencia representa solamente un pequeño cambio en la energía libre, el cambio global de energía libre para la secuencia puede ser considerable.

## El metabolismo

En cualquier sistema vivo el intercambio de energía ocurren a través de miles de reacciones químicas diferentes, muchas de las cuales se producen simultáneamente. La suma de todas estas reacciones se conoce como metabolismo (del griego *metabole*, que significa "cambio"). Si nos limitáramos meramente a enumerar la lista de las reacciones químicas individuales, sería difícil, en verdad, entender el flujo de energía a través de una célula. Afortunadamente, hay algunos principios que nos guían por el laberinto del metabolismo celular. Primero, virtualmente todas las reacciones químicas que tienen lugar en una célula involucran enzimas, grandes moléculas de proteína que desempeñan papeles muy específicos. Segundo, los bioquímicos son capaces de agrupar estas reacciones en una serie ordenada de pasos, que comúnmente se llama vía; una vía puede tener una docena o más de reacciones o pasos secuenciales. Cada vía sirve a una función en la vida global de la célula o del organismo. Más aun, ciertas vías tienen muchos pasos en común, por ejemplo, las que están vinculadas con la síntesis de los aminoácidos o de las distintas bases nitrogenadas. Algunas vías convergen; por ejemplo, la vía por la cual se degradan las grasas para producir energía conduce a la vía por la cual se degrada la glucosa para producir energía. La mayor parte del metabolismo es notablemente similar aun en los organismos más diversos; las diferencias en muchas de las vías metabólicas de los seres humanos, los robles, los hongos y las medusas son muy leves. Algunas vías, por ejemplo la glucólisis y la respiración están en casi todos los sistemas vivos.

El total de las reacciones químicas involucradas en la síntesis se llama anabolismo. Las células también están constantemente involucradas en la ruptura de moléculas de mayor tamaño; estas actividades se conocen colectivamente como catabolismo. El catabolismo cumple con dos propósitos:

1. Liberar la energía que será usada por el anabolismo y otros trabajos de la célula y
2. Suministrar la materia prima que será usada en los procesos anabólicos.

La presencia de las enzimas es fundamental para que las reacciones químicas puedan ocurrir dentro de una célula viva.

## Las enzimas

Para reaccionar, las moléculas deben poseer suficiente energía, la energía de activación, a fin de chocar con suficiente fuerza para superar su repulsión mutua y debilitar los enlaces químicos existentes. Las enzimas actúan como catalizadores; disminuyen la energía de activación incrementando enormemente la velocidad a la que se producen las reacciones químicas en las células. Una reacción no catalizada requiere más energía de activación que una catalizada, como una reacción enzimática. La menor energía de activación en presencia del catalizador frecuentemente está dentro del intervalo de energía que poseen las moléculas, de tal modo que la reacción puede ocurrir rápidamente, sin adición o con poca adición de energía.

Las enzimas son grandes moléculas de proteínas globulares cuyo modo de plegamiento asegura que grupos particulares de aminoácidos formen un sitio activo. Cuando las enzimas pierden su estructura tridimensional característica, se dice que están desnaturalizadas. Las moléculas reactivas, conocidas como sustrato, se ajustan con precisión a este sitio activo. Aunque la conformación de una enzima puede cambiar temporalmente en el curso de una reacción, no se altera permanentemente.

La velocidad de las reacciones enzimáticas también se ve influida por la temperatura y por el pH, que afectan la atracción entre los aminoácidos de la molécula proteica y también entre el sitio activo y el sustrato. Muchas enzimas requieren de cofactores, que pueden ser iones simples, tales como  $Mg^{2+}$  o  $Ca^{2+}$ , o como moléculas orgánicas no proteicas conocidas como coenzimas. Muchas coenzimas, como el NAD, funcionan como transportadores de electrones, y diferentes coenzimas mantienen a los electrones en niveles energéticos ligeramente distintos. Muchas vitaminas son parte de coenzimas.

En la interacción entre la enzima y el sustrato, el sitio activo de la enzima se ajusta a la superficie enfrentada de la molécula de sacarosa. El ajuste es tan exacto, que una molécula compuesta, por ejemplo, de dos subunidades de glucosa, no se vería afectada por la acción de esta enzima. Una forma precisa de control enzimático es la interacción alostérica. La interacción alostérica ocurre cuando una molécula distinta del sustrato se combina con una enzima en un sitio diferente del sitio activo y, al hacer esto, altera la conformación del sitio activo tornándolo funcional o no funcional. La inhibición por retroalimentación ocurre cuando el producto de una reacción enzimática, ya sea al final o en una bifurcación de una vía determinada, actúa como efector alostérico, inhibiendo temporalmente la actividad de una enzima, en un paso anterior de la vía. De esta manera, el efector alostérico detiene temporalmente la serie de reacciones químicas. Las enzimas también pueden estar reguladas por inhibición competitiva, en la cual una molécula, semejante al sustrato normal, compite por el sitio activo. La inhibición competitiva puede ser revertida aumentando las concentraciones de sustrato. Los inhibidores no competitivos se unen en otro sitio de la molécula, alterando la estructura terciaria, de modo que la enzima ya no puede funcionar. La inhibición no competitiva habitualmente es reversible, pero no por el incremento en la concentración de sustrato. Los inhibidores irreversibles se unen permanentemente al sitio activo o desorganizan irreparablemente la estructura terciaria.

## El ATP

Todas las actividades biosintéticas de la célula, muchos de sus procesos de transporte y una diversidad de otras actividades requieren de energía. Una gran proporción de esta energía es suministrada por una sola sustancia: el adenosín trifosfato o ATP. La glucosa y otros carbohidratos son formas de almacenamiento de energía y también formas en las que se transfiere energía de célula a célula y de organismo a organismo. En cierto sentido, son como el dinero depositado en un banco. Sin embargo, el ATP es como el cambio de bolsillo: es la moneda energética de la célula que puede gastarse de inmediato.

La molécula de ATP está formada por la base nitrogenada adenina, el azúcar de cinco carbonos ribosa y tres grupos fosfato. Los tres grupos fosfato están unidos por dos enlaces covalentes que se rompen con facilidad, produciendo cada uno aproximadamente 7 kilocalorías de energía por mol. En los sistemas biológicos, las reacciones endergónicas, como las de biosíntesis, se producen gracias a la energía liberada en las reacciones exergónicas con las que están acopladas. En la mayoría de las reacciones acopladas, el ATP es el intermediario que conduce la energía de una reacción a otra.

La estructura interna de la molécula de ATP la hace inusualmente adecuada para este papel en los sistemas vivos. En el laboratorio, la energía se libera de la molécula de ATP cuando se elimina el tercer fosfato por hidrólisis dejando ADP (adenosín difosfato) y un fosfato:



En el curso de esta reacción, se liberan unas 7 kilocalorías de energía por mol de ATP. La eliminación del segundo fosfato produce AMP (adenosín monofosfato) y libera una cantidad equivalente de energía:



Los enlaces covalentes que unen a estos dos fosfatos al resto de la molécula se simbolizan con el

signo  $\sim$ , y durante muchos años se llamaron enlaces de "alta energía", término incorrecto y confuso. Estos enlaces no son fuertes, como los enlaces covalentes entre el carbono y el hidrógeno, que tienen una energía de enlace de 98,8 kcal/mol. Al contrario, son enlaces que se rompen fácilmente y liberan, como vimos, una cantidad de energía, aproximadamente 7 kcal/mol, adecuada para impulsar muchas de las reacciones endergónicas esenciales de la célula. Además, la energía liberada no surge totalmente del movimiento de los electrones de enlace hacia niveles energéticos más bajos. Es también el resultado de un reordenamiento de los electrones en otros orbitales de las moléculas de ADP o de ATP. Cada uno de los grupos fosfato lleva cargas negativas y, por eso, tienden a repelerse. Cuando se elimina un grupo fosfato, la molécula sufre un cambio en la configuración electrónica, lo cual da como resultado una estructura con menos energía.

---



---

### **El cuarto Blanco - Biblioteca Web**