


UNIVERSIDAD CENTROCCIDENTAL LISANDRO ALVARADO
DECANATO DE MEDICINA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FUNCIONALES
SECCION DE FISIOLÓGIA
BARQUISIMETO



Organización de los Seres Vivos en Función de los
Conceptos de Materia y Energía

Elaborado por Prof. Gregorio Tiskow D. Ph.D

Formato Electrónico
Barquisimeto, Enero de 2006

Presentación

Estimado Lector:

El presente material instruccional de Biofísica es tan sólo una guía introductoria para el uso de los terminos y conceptos fundamentales en biofísica, y que servirán de base a los conocimientos de la fisiología general de sistemas. No es un manual completo sobre biofísica, pero si está estructurado en base al contenido programático y los objetivos específicos de la asignatura Fisiología I del cuarto semestre del Programa de Medicina., y servirá de ayuda rápida, donde los estudiantes pueden hacer una primera consulta sobre los tópicos en cuestión.

Este manual es el primero que se edita en la sección de fisiología de la Escuela de Medicina de la UCLA, en lo referente a aspectos concretos de la biofísica. El material está organizado por temas y secciones, basados en los aspectos que necesita saber el estudiante a este nivel de las ciencias básicas. Cualquier estudio profundo de la materia deberá ser realizado a través de los textos especializados del área y recomendados por el docente.

Tenemos la esperanza de recibir las críticas constructivas que nos permitan mejorarlo, y no el silencio bondadoso que nos haga creer que no tiene correcciones y posibles mejoras, o peor aún, que no es útil.



El Autor.

ORGANIZACION DE LOS SERES VIVOS EN FUNCION DE LOS
CONCEPTOS DE MATERIA Y ENERGIA

Parte I: Contenido: Materia: Concepto. Propiedades. Características. Estructura de la Materia. Estados de la Materia. Funciones Dentro del Organismo Vivo. Niveles de Organización de la Materia en los Organismos Vivos.

¿Qué es la Materia? ¿Qué papel desempeña en la física y la química de los organismos vivos?

Son interrogantes que hoy día aún continúan explorándose con sumo interés. La materia como tal, desempeña un rol esencial en el mundo viviente, y por ello el estudio de sus propiedades y características son cruciales para el estudiante de Biología o de Medicina. Como premisa inicial debemos señalar que todos los seres vivos están compuestos de materia.

La exteriorización de la producción y el consumo de energía, por parte de la materia viva, es lo que se denomina "La Vida". Cuando cesa la liberación y la utilización de energía, se dice que ha ocurrido la muerte del organismo (1).

1.1.- Definición:

La materia se puede definir como todo aquello que posee masa y ocupa un lugar en el espacio; además, impresiona nuestros sentidos y es interconvertible en energía.

El agua, los gases, las rocas, las plantas, los animales, el hombre, todos están compuestos de materia. Cuando la materia se presenta provista de forma y tamaño, se le denomina Cuerpo. Ejemplos: un anillo, una moneda, un vaso, un libro, etc. El cuerpo es entonces, toda porción limitada de materia en el espacio.

1.2.- Características:

Una de las características fundamentales de la materia es que posee Masa. Puesto que las definiciones de masa y peso son importantes para la comprensión y estudio de la materia, es interesante analizar tales conceptos.

Cuando se coloca un objeto en una balanza, demuestra tener un Peso. El peso, que es otra de las características de la materia, mide la fuerza que se ejerce entre él y la tierra; es decir, la acción de la gravedad, la atracción que ejerce la tierra sobre la masa del cuerpo, constituye el peso del objeto o del cuerpo. Para cualquier objeto, el peso viene dado por el producto de su masa (m) por la aceleración de la gravedad (g):

$$P = m \times g$$

El grado de atracción se mide mediante el descenso de la plataforma de la balanza. Mientras mayor sea la atracción entre el objeto y la tierra, mayor será el peso del objeto. El peso puede ser medido en unidades: kilogramos, toneladas, onzas, etc.

El uso común del concepto de peso, tiene sus limitaciones para la investigación biomédica. El problema de usar el peso como característica, es que varía dependiendo de la distancia a que se encuentra un cuerpo con respecto a la superficie del cuerpo celeste que lo atrae, y ello a su vez depende del tamaño del cuerpo celeste. De igual manera, un hombre en el espacio no sufre el efecto de la gravedad, y ni él ni los objetos que lo rodean parecen tener peso. Un organismo o un objeto pueden flotar libremente bajo tales condiciones, si no son sujetos apropiadamente.

Un hombre que pese unos 45 kg. en la Tierra, pesará solamente 9 kg. en la Luna, y unos 16 kg. en la superficie de Marte. Aquí está influyendo la cantidad de materia que posee el cuerpo celeste.

En resumen, el peso que posea una determinada porción de materia, está directamente relacionada a la fuerza de gravedad en el lugar donde se realiza la medición (1). Motivado a tales inconvenientes, el biólogo desea describir la materia en términos independientes de la localización del cuerpo u objeto. Por lo tanto, se ha convenido en aplicar el concepto de Masa. En efecto, las características físicas y químicas de los objetos que se hallan en el interior del transbordador o una nave espacial no se modifican al hallarse el cuerpo u objeto en estado de ingravidez (1). Los objetos siguen siendo los mismos, ocupan la misma cantidad de espacio y tomarán la misma forma que aquella que poseían en la Tierra (1). El peso ha de variar, pero la cantidad de materia presente será la misma.

Por lo tanto, la cantidad de materia que posee un cuerpo u objeto, se denomina MASA. La masa se expresa en las mismas unidades con las que se expresa el peso, es decir, gramos (g). La masa de un objeto siempre permanece constante; la masa conserva todas sus características en cualquier punto del espacio.

La masa de un objeto no está necesariamente relacionada con el tamaño del mismo; una pelota de hierro de 10 cm de diámetro, tendrá menos masa que una pelota de hierro de 21 cm de diámetro. Pero, una pelota de hierro de 10 cm de diámetro contendrá mayor cantidad de masa que una bola de aluminio de las mismas dimensiones. Entra en juego, una tercera característica de la materia que permite especificar más el término de masa, y es el concepto de Densidad. La densidad es la medida de la cantidad de materia (masa) presente en una unidad de volumen determinada:

$$D= m / v$$

Así, mientras mayor sea la cantidad de masa presente en un objeto en un espacio dado, mayor será la densidad del mismo. Consideremos las pelotas de cobre en estado natural y puro, una de 30 cm de diámetro y la otra de 3 cm de diámetro. Como es de suponer, la cantidad de masa será mayor en la esfera mayor; la densidad sin embargo, es la misma en una y otra.

Así mismo, cuerpos de distinta naturaleza a pesar de que tengan el mismo tamaño, tendrán diferente densidad por estar conformados de materia distinta. La diferencia de densidad nos habla de cantidad (de masa), lo cual nos refleja la cantidad de materia presente. En nuestro organismo poseemos materia que tiene diferentes densidades; así el hueso posee mayor densidad que el tejido muscular y éste a su vez mayor densidad que el tejido sanguíneo o el agua.

Una de las grandes aplicaciones de los conceptos aquí discutidos, se reflejan en las investigaciones que se han desarrollado en el campo de la medicina aeroespacial, y en los estudios biomédicos en el espacio, y del efecto de la ingravidez sobre los fenómenos fisiológicos de los organismos animales y claro está, del hombre mismo. Otra de las utilidades prácticas de conocer y aplicar los conceptos de densidades, es en la radiología. Como ejemplo, el tejido óseo posee mayor densidad que los tejidos magros por lo cual en una placa radiográfica veremos claramente porciones óseas en una forma bien diferenciada del tejido muscular o ciertos órganos anexos como el hígado, intestinos, bazo, etc.

1.3.- Propiedades:

Las cualidades que uno puede distinguir en la materia con el nombre de propiedades, y se distinguen las siguientes:

- a.-Impresiona a los órganos de los sentidos.
- b.-Ocupa un lugar en el espacio. Esta propiedad se conoce con el nombre de Extensión.
- c.-Es Ponderable, o sea, puede pesarse.
- d.-Es Inerte, esto es, la materia no puede modificar por sí misma el estado de reposo o de movimiento en que se encuentra.
- e.-Es Transformable, pero jamás se destruye.
- f.-Es Impenetrable, es decir que el lugar que ocupa realmente un objeto en el espacio no puede ser ocupado en el mismo momento por ningún otro.

1.4.- Estructura de la Materia:

Desde la misma antigüedad hasta finales del siglo XIX, los hombres debatían un problema aparentemente sin respuesta: ¿en qué forma se encuentra la materia?

Existían dos corrientes de opinión: Un grupo pensaba que la materia se podía dividir infinitamente en dos partes, cada una a su vez más pequeña, sin cambiar sus propiedades. El otro grupo pensaba que existía un límite más allá del cual la materia no podía dividirse sin variar o cambiar sus propiedades (1). Esas unidades elementales a las cuales podía medirse la materia se denominó posteriormente átomos.

Una vez conocidas las propiedades y características de la materia en general, podemos hacer una clasificación de la materia en tres grandes categorías:

Elementos, Compuestos y Mezclas.

Si se acepta la teoría atómica, entonces se puede definir a un *elemento* como la materia que está compuesta de átomos idénticos. El oxígeno, el carbono, el hidrógeno, el nitrógeno, el azufre son ejemplos de elementos. Nuestro organismo tiene dentro de su composición, varios de los elementos de la tabla periódica, existiendo sólo o combinados. Ahora bien, cuando los átomos de dos o más elementos se combinan químicamente, el producto resultante es un *compuesto*. Por ejemplo, átomos de carbono e hidrógeno se unen para conformar hidrocarburos; dos átomos de hidrógeno se unen con uno de oxígeno para formar el compuesto agua, fundamental en nuestras vidas.

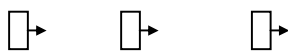
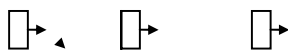
La unidad básica en un compuesto es la *molécula*. Una molécula, es una partícula físicamente diferenciada de una sustancia que existe libremente conservando las propiedades de la sustancia de la que forma parte, y está formada por átomos iguales en los elementos y por átomos distintos en los compuestos. Como puede observarse, las moléculas no siempre necesitan formarse entre distintos tipos de átomos. Por ejemplo, el elemento oxígeno existe en forma de dos átomos unidos para formar una molécula diatómica: los átomos de oxígeno van a estar unidos mediante un enlace químico.

Otros elementos existen en moléculas de más de dos átomos; por ejemplo el azufre se encuentra en moléculas de ocho átomos unidos entre sí para formar la molécula S₈.

Las combinaciones de dos o más sustancias, no unidas químicamente y, en consecuencia sin relación definida de pesos se denomina *mezcla*. Una solución, tal como azúcar o sal disuelta en agua, es un tipo de mezcla. Los granos de sal o de azúcar no forman enlaces químicos con las moléculas de agua. Una de las propiedades de las mezclas, es que las partes que las componen pueden separarse mediante procesos físicos comunes; la sal y el agua pueden separarse por evaporación del agua; otras mezclas se pueden separar por filtrado, por ionización u otros procedimientos físicos. Las mezclas son de importancia primordial en los procesos biológicos; muchas partes fundamentales de las células existen en este estado. De hecho la materia viva es la mezcla más compleja de todas las mezclas (1).



Elementos



Compuestos



Mezclas

Representación esquemática de las diferencias entre elementos, compuestos y mezclas.

a.-Elemento: todos los átomos son iguales. b.- Compuesto: formado de moléculas de dos átomos químicamente unidos de diferentes elementos. c.- Una mezcla de dos sustancias diferentes. Véase que no existe una relación numérica definida entre las partes de la mezcla {tomado y modificado de (1)}.

1.5.- Los Estados de la Materia:

La materia existe en tres estados fundamentales: Sólido, Líquido o Gaseoso.

El estado sólido se caracteriza porque:

- a.- Poseen forma propia y gran capacidad para conservarla.
- b.- Poseen un volumen determinado.
- c.- Oponen resistencia a la deformación.
- d.- Sus moléculas presentan alto grado de organización.

Ejemplos: hierro, vidrio, madera, rocas; en nuestro organismo: el sistema óseo, el cartílago, el pelo, las uñas, los dientes.

El estado líquido está caracterizado por:

- a.- Tienen volumen propio y determinado que depende de su masa.
- b.- Carecen de forma propia y adoptan la del recipiente que los contiene, con la superficie libre horizontal.
- c.- Son incompresibles.
- d.- Presentan un grado moderado de organización molecular.

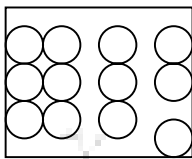
Ejemplos: al agua, el mercurio, el vino, la leche, alcohol, etc. En nuestro organismo la sangre existe en este estado, así como muchos otros fluidos orgánicos, como el jugo gástrico, el líquido articular, el líquido cefalorraquídeo, entre otros.

El estado gaseoso presenta como características:

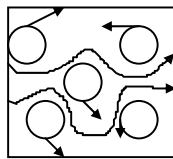
- a.- No presentan superficie libre de separación.
 - b.- No poseen forma ni volumen propio.
 - c.- Son expandibles, pues tienden a extenderse por todo el espacio que le es accesible uniformemente.
 - d.- Son compresibles, pues disminuyen de volumen sin que esto implique una reducción en el tamaño de sus moléculas, sino de las distancias intermoleculares.
- Ejemplos: el aire, el humo, el nitrógeno, el oxígeno. El aire que respiramos está compuesto de varios gases, como el oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono y otros en mínimas proporciones.

Estas propiedades de los tres estados de la materia son consecuencia del predominio de la fuerza de cohesión en los sólidos, de un equilibrio entre las fuerzas de cohesión y repulsión en los líquidos y del predominio de la fuerza de repulsión en los gases. Por ello, la materia puede adoptar cualquiera de los tres estados, dependiendo en cada caso de la adopción del estado energético en que se encuentre.

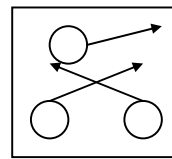
Representación esquemática de los tres estados de la materia:



Sólido



Líquido



Gaseoso

El estado de la materia puede ser modificado elevando o disminuyendo la temperatura o variando la presión. Si aplicamos calor el agua hierve, se evapora y por tanto, pasa del estado líquido al gaseoso. Cuando el agua pierde calor, pasa del estado sólido (que es el hielo), al líquido. Estos cambios no implican la formación o ruptura de enlaces químicos.

Por ello, cualquier cambio del estado de la materia representa un cambio físico y no un cambio químico.

Ya que hablamos de cambios físicos y de cambios químicos debemos precisar su definición. Todos los tipos de cambios que puede experimentar la materia en los seres vivos, se agrupan en cambios físicos y cambios químicos. Cuando sucede un cambio físico ocurren cambios en la forma de la materia en sus propiedades físicas, más no en sus propiedades químicas. Cuando se derrite un cubo de hielo, cuando se disuelve sal en agua, o cuando se congela una muestra de sangre en la nevera, esos son ejemplos de cambios físicos. Por lo general, los cambios físicos pueden revertirse mediante procedimientos físicos. Por ejemplo, el hielo derretido puede congelarse de nuevo, mediante recongelación, la sangre puede descongelarse a temperatura ambiente.

Entre las propiedades físicas de una sustancia, podemos considerar el punto de congelación, el punto de ebullición, la densidad es color, textura, cuyos cambios pueden observarse aun cuando no se acompañen de una modificación significativa en la composición química de la sustancia.

En los cambios químicos por el contrario, hay interacciones entre los elementos de los átomos de los elementos, y hay formación de enlaces químicos,

por lo que los cambios químicos de una sustancia implican cambios profundos en la misma, se modifican las propiedades químicas de la materia. Por ejemplo, la oxidación del hierro implica una propiedad química del mismo, ya que su composición química cambia a la del óxido de hierro.

Hay que considerar también que las propiedades químicas de un compuesto son muy diferentes con respecto a aquellas de los elementos que las componen. El sodio por ejemplo es un metal peligroso debido a su alta actividad química, y el cloro es un gas muy venenoso, sin embargo el cloruro de sodio es un compuesto esencial de nuestra dieta y parte fundamental de la composición de los líquidos orgánicos. Las propiedades químicas cambian al efectuarse la interacción electrónica entre los átomos de Na y Cl. También se modificaron las características físicas de los componentes, puesto que el NaCl no posee ninguna de las propiedades físicas del Na o del Cl.

Cuando ocurre un cambio químico, las propiedades químicas pueden restablecerse solamente mediante procedimientos químicos.

Para el biólogo, el médico, los cambios químicos de la materia son los más cruciales; todas las reacciones bioquímicas resultan en cambios químicos.

1.6.- Funciones de la materia entro del organismo vivo: La materia en los organismos vivos cumple dos papeles fundamentales:

- a.- Sirve de estructura.
- b.- Interviene en el proceso de transporte y almacenamiento de energía.

El ser vivo está constituido por materia orgánica e inorgánica, pero la materia dentro de los organismos está dispuesta de una determinada manera, con cierta forma y precisión, y ello es lo que conocemos como Estructura. Recuérdese que la estructura es estudiada por anatomistas e histólogos. Por ello, cuando se estudian los procesos fisiológicos siempre habrá que asociar una determinada función a una estructura dada. Hay que tener en cuenta a veces, que estructuras diferentes pueden realizar una misma función.

1.6.1.- Sustancias Inorgánicas de la Materia Viva:

El agua es el compuesto inorgánico fundamental y prevalente en los organismos vivos. La vida depende prácticamente de este compuesto. El agua cumple variadas funciones dentro del organismo. Es el medio en el cual muchas sustancias se disuelven. En estado de solución muchas sales se ionizan y se vuelven químicamente activas. Por otro lado, las moléculas orgánicas grandes pueden permanecer en el agua en suspensión y dispersas uniformemente. Así, pueden estar en contacto con mayor facilidad con otros iones y compuestos e intercalar con ellos químicamente.

Puesto que el agua es el solvente universal por excelencia, es utilizada también como un agente de transporte. Los nutrientes en solución, son extraídos de las células; por ejemplo, la orina no es otra cosa que agua y desechos disueltos y concentrados en ella.

El agua también facilita al organismo la habilidad de resistir cambios bruscos de temperatura que de otra manera podrían ser mortales. El agua tiene la gran capacidad de absorber y liberar calor lentamente.

El agua sirve también como lubricante en el organismo. No solo los huesos, ligamentos y tendones se rozan constantemente unos contra otros cuando realizan movimientos, sino también los órganos internos se tocan y deslizan unos sobre otros, como en el caso de los intestinos. La humedad constante de los órganos y de las membranas que los envuelven facilitan tales procesos.

Asimismo, el cuerpo contiene miles de glándulas mucosas las cuales segregan moco. El moco contiene gran cantidad de agua; el moco se produce también en grandes cantidades en los conductos respiratorios. La respiración a nivel pulmonar también depende de la presencia del agua; la superficie de los alvéolos está constantemente humedecidas, facilitando la disolución del oxígeno. Los organismos vivos utilizan el agua como reactivo en muchos procesos químicos celulares.

Fuera del agua todos los demás componentes inorgánicos que forman parte de la materia viva pertenecen al grupo de los ácidos, bases o las sales. Dentro de las sales más abundantes en el organismos humano son aquellas que contienen fósforo (componente de los ácidos nucleicos, así como fuente importante de energía, el ATP). Elementos como el azufre, el sodio, cloro, magnesio y el hierro entre otros, se presentan en cantidades menores.

1.6.2.- Sustancias Orgánicas de la Materia Viva:

Dentro de los elementos orgánicos, el fundamental es el carbono. Característica única del carbono es la formación de moléculas en forma de cadenas largas mediante el compartimiento de electrones con otros átomos de carbono. No es objetivo de la biofísica el estudio detallado de este elemento, ya que ello pertenece a la química del carbono o química orgánica. Otro compuesto importante en la biología es el nitrógeno, que interviene en la composición química de aminoácidos y las proteínas.

Respecto a la segunda función, transporte y almacenamiento de energía, para que la materia cumpla tal función dentro de los seres vivos, debe sufrir primero cambios estructurales y luego cambios energéticos. Al ocurrir cambios estructurales, deben haber cambios en la constitución molecular de la materia. Ejemplos : la Glucosa ($C_6 H_{12} O_6$) al desdoblarse en CO_2 y agua con liberación de energía, en ella ocurren cambios estructurales, y de ello se encarga de estudiarlo la bioquímica y la bioenergética.

En todo caso, hay que tener en cuenta que cualquier tipo de actividad implica consumo o intercambio de energía, y ese intercambio se asocia a cambios estructurales.

1.7.- Niveles de Organización de la Materia en los Organismos Vivos :

Si detallamos un organismo vivo y complejo como lo es un mamífero, observamos un creciente grado de complejidad en la estructura, que va acompañado de un aumento en la versatilidad de las funciones que cada sistema puede cumplir. Sin embargo, desde el principio hasta el final de la serie organizativa ninguno de los sistemas deja de ajustarse a las mismas leyes fisicoquímicas válidas para cualquier sistema material (2).

Ya hemos visto como un conjunto de átomos conforman un elemento o un compuesto, y la unidad básica en un elemento o compuesto es la molécula. La agrupación de moléculas adecuadamente ordenadas condujo a través de evolución a la formación de estructuras más complejas como los aminoácidos, las proteínas, los ácidos nucleicos, los lípidos y carbohidratos.

De lo dicho hasta ahora, se podría inferir teóricamente que la agrupación adecuada de las moléculas de proteínas, lípidos, carbohidratos y ácidos nucleicos puede constituir un sistema fisicoquímico con la propiedad de Reproducirse.

En algún paso de la evolución, la agrupación de las diversas moléculas y estructuras citadas condujo a la aparición de la unidad funcional básica de la vida, la cual es la Célula. La célula constituye un sistema de estructuras enormemente complejas, con la habilidad de realizar la infinidad de funciones que la caracterizan, que a su vez depende de la distribución espacial de las estructuras menores que la constituyen (2).

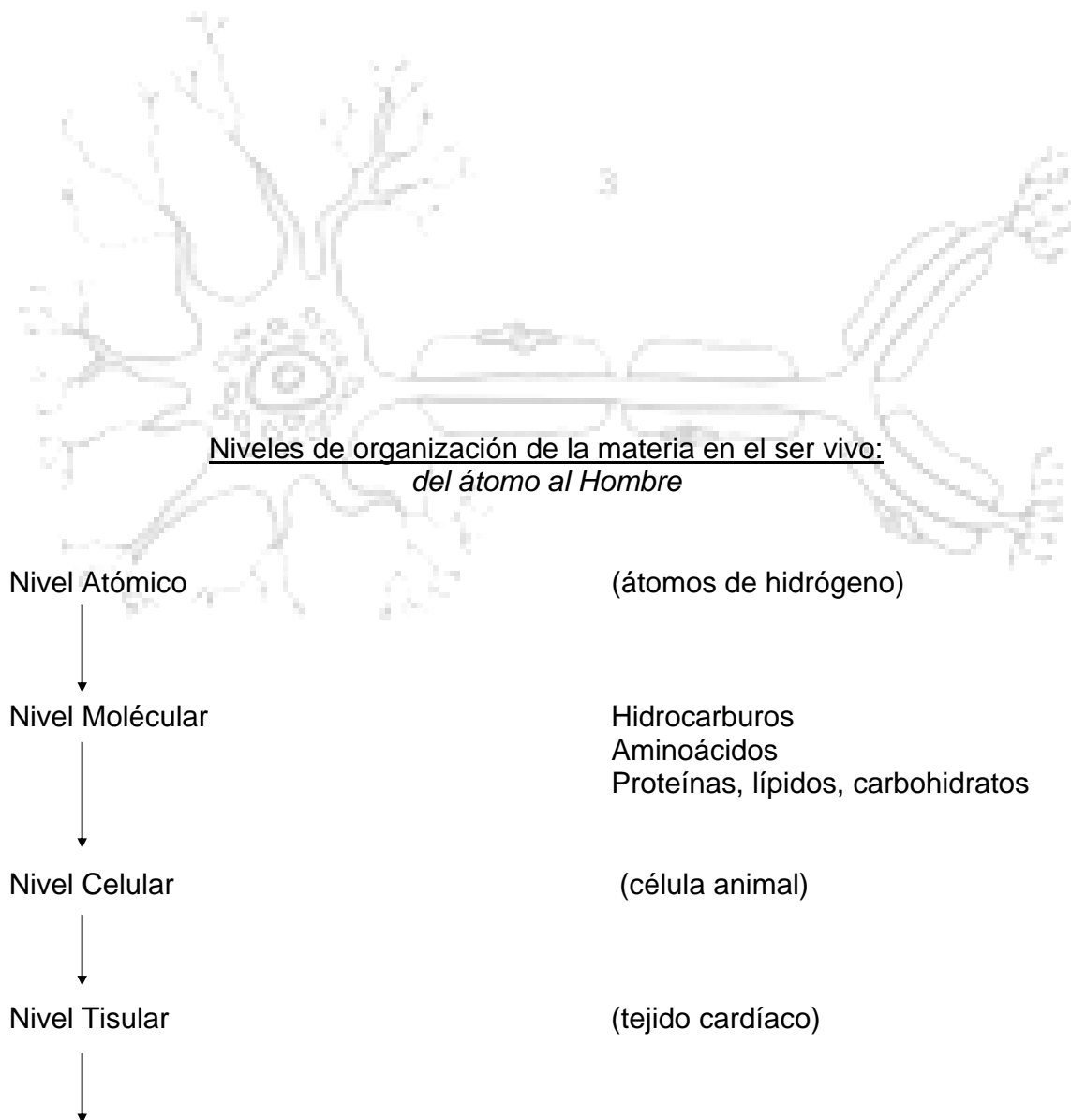
Por encima del nivel celular ya aparecen las infinitamente más complejas. Jerarquías de organización y función que caracterizan a los seres vivos con el *Homo Sapiens* al tope de la lista por sus habilidades neocorticales.

La agrupación de células con funciones semejantes constituyen lo que se llama un Tejido. La agrupación de tejidos que van a realizar una determinada función constituyen un órgano. Las funciones que un órgano puede ejecutar, depende de la adecuada ordenación y disposición de los tejidos que lo componen.

Una agrupación de órganos especializados para una función determinada, importante en su propia magnitud constituyen un Sistema, que coordina adecuadamente sus funciones entre sí.

Un conjunto de sistemas orgánicos van a conformar estructuralmente un Organismo, tal como una planta, un gusano, o un animal tan complicado como un mamífero cualquiera, entre ellos el hombre (ver figura 2).

En la mayoría de los animales hay un tejido muy especializado, el nervioso, que les infiere la posibilidad de correlacionar las funciones de sus diferentes partes integrantes o ponerse su comunicación con el medio ambiente externo, del cual recolectan información y la procesan.



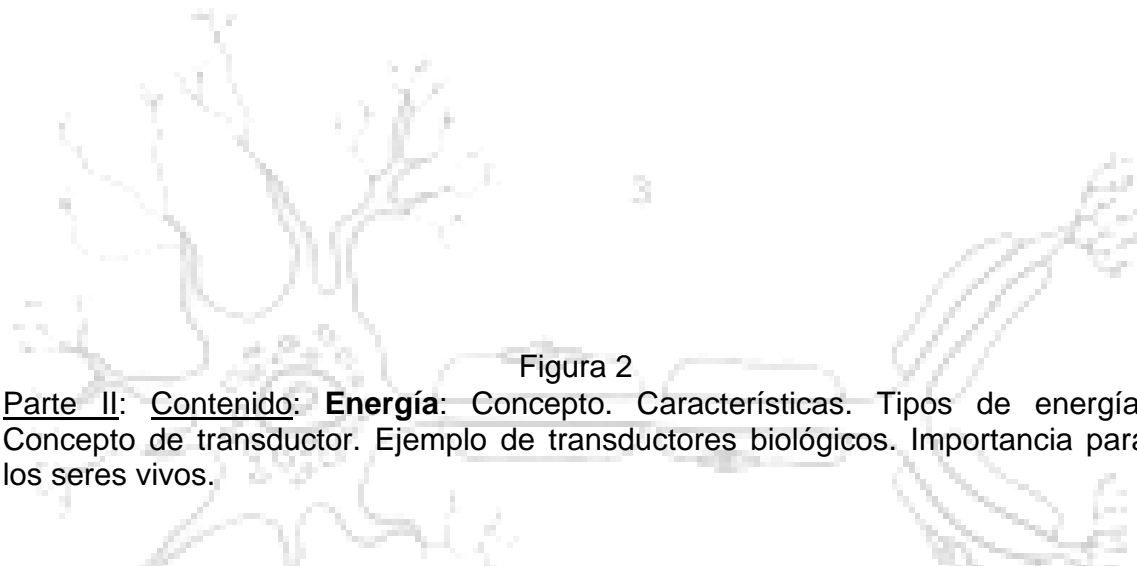


Figura 2

Parte II: Contenido: **Energía:** Concepto. Características. Tipos de energía. Concepto de transductor. Ejemplo de transductores biológicos. Importancia para los seres vivos.

En el lenguaje popular el término energía se utiliza como sinónimo de fuerza, vitalidad, actividad, movimiento, trabajo. Cuando se habla de alimentos de gran “contenido energético” se desea expresar que proporcionan fuerza y vitalidad.

De todas estas interpretaciones populares del término energía las que más se relacionan con el concepto científico, son aquellas que conducen a la idea de atribuir a la energía ciertas características como que: puede cambiar de una forma a otra, se puede transferir y puede ser aprovechada para realizar un trabajo (3).

El bioquímico está interesado no sólo en la composición de la materia, sino también en los cambios de energía que acompañan a todos los cambios químicos y físicos. El biofísico no puede escapar a esta realidad.

La energía no se define con facilidad sino que el científico se contenta con medirla en términos de su capacidad para efectuar trabajo o su equivalente. La energía es un concepto entendible si se aplica a las máquinas y plantas de poder.

Al considerar la energía asociada con un enlace químico (como el caso de la molécula de ATP) y las reacciones químicas intracelulares, el concepto de trabajo y energía se vuelven menos intuitivos. Pero, la célula requiere energía para producir trabajo y así cumplir sus funciones vitales: al sintetizar glucosa a partir de CO_2 y H_2O en la fotosíntesis, cuando se acopla a reacciones envueltas en el proceso de contracción muscular o cuando se replica el ADN celular.

2.1.- Definición:

Llegados a este punto podemos definir a la energía como la capacidad que tiene un objeto o un cuerpo para realizar un trabajo. La energía se puede medir siempre por el efecto que ella puede producir sobre la materia. Entre mayor el efecto, mayor será la cantidad de energía empleada. Entre mayor sea la cantidad de materia que tenga que desplazarse, mayor será la cantidad de energía que tendrá que aplicarse.

Cuando se desplazan a través de distancias iguales, por ejemplo, un animal muy grande (un elefante) y otro pequeño (gato), el primero consume más energía. Es por ello que los animales más grandes son menos activos que los más pequeños. Esto contribuye también a explicar porque el corazón de un humano con exceso de peso (obesidad) se fatiga más que aquel con peso corporal normal (1).

2.2.- Características:

Las principales características que exhibe la energía en cualquiera de sus formas son:

- Puede cambiar de una forma a otra: es intercambiable.
- Puede ser transferida.
- Puede ser aprovechada para realizar trabajo.

2.3.- Tipos de Energía:

La energía puede existir en uno de estos dos tipos, a saber:

- .- Energía Cinética
- .- Energía Potencial

2.3.1.- Energía Cinética:

Es la energía en movimiento, la energía en acción. Es la que se utiliza para producir un trabajo determinado. Es el proceso que causa un efecto sobre la materia. Ejemplo: las moléculas en movimiento constante. La energía cinética puede medirse determinando cuanta materia puede ser desplazada en un tiempo

dado, a qué distancia, y a qué velocidad se realiza tal desplazamiento, de forma que la energía cinética se resume en la siguiente expresión matemática:

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot V^2$$

en donde:

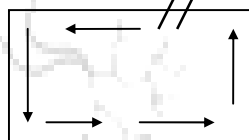
m: es la masa.

V: velocidad.

Ciertos autores describen subtipos de energía cinética y que se pueden denominar de la siguiente manera:

2.3.1.1.- Energía cinética de tipo mecánica: cuando tenemos por ejemplo un objeto a una cierta altura (h_2) y luego lo hacemos caer; durante el momento en que el objeto se este moviendo, en la altura (h_1) esa energía cinética será de tipo mecánica.

2.3.1.2.- Energía cinética de tipo eléctrica: Imaginemos un circuito eléctrico por el cual los electrones se mueven en determinado sentido a lo largo de un conductor; ello constituye el mejor ejemplo representativo de energía de este tipo.



2.3.1.3.- Energía cinética de tipo radiante: donde la luz y el calor tienen importancia fundamental. La radiación electromagnética se asocia al movimiento de campos eléctrico y magnéticos oscilantes y lleva consigo energía cinética radiante. Los rayos X tienen importancia desde el punto de vista médico; los rayos γ (gamma), y los ultravioleta son más bien perjudiciales a nuestro organismo, pero todas son tipo de energía cinética radiante.

2.3.2.- Energía Potencial: es la energía almacenada en un cuerpo o un objeto, es la energía inactiva o en reserva que posee ese objeto o cuerpo. Tiene como característica que no está siendo utilizada para producir trabajo. La energía potencial al ser liberada es capaz de causar un efecto sobre la materia. Pero cuando ello ocurre deja de ser potencial y se convierte en energía cinética.

La expresión matemática de la energía potencial viene dada por:

$$E_p = m \cdot g \cdot h$$

en donde:

m:masa

h:altura

g:constante de gravitación universal: 9.81 m / seg²

Al igual que para la energía cinética, se describen subtipos de energía potencial; la potencial química, mecánica, eléctrica y atómica que son las cuatro de interés biológico existiendo desde el punto de vista físico la potencial gravitatoria, la potencial elástica, entre otras.

2.3.2.1.- **Potencial química:** en biofísica y fisiología la que tiene gran significado es la potencial de tipo química. Es la que contienen en su interior las diferentes moléculas, y que reside en el interior de los enlaces que se establecen entre los diferentes átomos que las conforman.

Por ejemplo, la glucosa tiene una elevada energía potencial química; también los lípidos y muchas proteínas tienen un alto contenido energético. Otros compuestos como el CO₂, el H₂O conservan cierta cantidad de energía química, pero no es aprovechada por el organismo puesto que es una energía difícil de obtener, se requiere para ello de una alta energía de activación para poder obtenerla.

Aún con todo ello, los organismos vivos no utilizan directamente la energía contenida en la glucosa, sino que prefieren construir otro tipo de molécula, que acumula energía en sus enlaces, como lo es el ATP, y que puede ser almacenada y utilizada en los momentos necesarios. El ATP por lo tanto es, el transportador universal de energía. La molécula de ATP posee energía potencial acumulada en sus enlaces químicos y que se convierte en energía cinética cuando es utilizada.

La energía química puede describirse también en términos de la construcción de compuestos químicos a partir de otros más simples. Como ejemplo, la luz del sol (energía de tipo radiante) es utilizada por las hojas de las plantas verdes para construir moléculas de azúcar y otros compuestos a partir de H₂O y CO₂. El resultado final es la energía potencial almacenada en las moléculas de azúcar (1).

2.3.2.2.- **Potencial Mecánica:** es la energía directamente producida por la materia en movimiento. Un objeto colocado a cierta altura posee energía potencial de tipo mecánica; máquinas sencillas, como la polea o la palanca son sistemas diseñados

para conservar la energía mecánica. La energía almacenada en el resorte, en las cuerdas de un reloj, son de tipo mecánica.

En los seres vivos existe una habilidad característica, que es la de movimiento autónomo. Tal movimiento implica conversión de la energía potencial química en energía cinética de tipo química, la cual a su vez produce la contracción muscular que a la larga es un fenómeno mecánico; los músculos actúan sobre los huesos, los cuales funcionan a manera de palanca.

2.3.2.3.- Potencial Eléctrica: la energía eléctrica es el resultado del flujo de electrones a lo largo de un conductor. Existe energía potencial eléctrica dondequiera que se origine un flujo de electrones.

La energía eléctrica es de suma importancia para la vida actual del hombre, por cuanto puede convertirse en otras formas más útiles. Por ejemplo, al interponerse una resistencia al flujo de corriente o electrones se produce calor, como en el caso de las cocinas eléctricas, las duchas, tostadoras, planchas etc.

Al hacer pasar corriente eléctrica a través de un filamento de tungsteno por ejemplo, la energía eléctrica se convierte en luz y calor como en las bombillas.

La energía eléctrica es de particular importancia en los seres vivos. En los sistemas biológicos los electrones no se desplazan como lo hacen por un conductor eléctrico como hemos visto. Sin embargo; los electrones juegan un papel fundamental en los cambios energéticos que ocurren en el interior celular. Los electrones se mueven en los sistemas biológicos con los átomos, o sea, se mueven electrones con el movimiento de materia, y por ende son fenómenos que se estudian desde el punto de vista electroquímico. Las reacciones electroquímicas juegan un papel primordial en el funcionamiento del sistema nervioso central.

Un punto interesante a considerar es la *Interconvertibilidad* de los diferentes tipos de energía y la interrelación masa-energía. Todos los tipos de energía están interrelacionadas entre sí, son interconvertibles y ello ocurre en forma continua.

Los procesos vitales que ocurren en las células vivas se realizan mediante la liberación de energía mecánica para ejecutar movimiento, o ser utilizada en la construcción de otros compuestos químicos. La energía es constantemente liberada y almacenada en los sistemas vivos (1).

De igual manera, materia y energía no son conceptos separados, sino que están relacionados por el Principio de Equivalencia entre Materia y Energía, que expresa que si "la energía de un objeto material cambia en la cantidad ΔE , la masa del objeto cambia en la cantidad Δm " verificándose que:

$$\Delta m = \Delta E / C^2$$

en donde:

C: cuadrado de la velocidad de la luz.

y de la cual: $E = m \cdot C^2$

La fórmula anterior constituye la teoría relativista de Einstein, que expresa que la materia puede ser convertida en energía, y viceversa.

2.4.- Concepto de Transductor Biológico y ejemplos:

Ahora bien, teniendo en mente el concepto de interconvertibilidad de la energía, podemos introducir el concepto de transductor energético. Cualquier dispositivo electrónico u órgano biológico capaz de transformar un tipo de energía en otro, se denomina Transductor. A nivel biológico lo podemos apreciar a nivel del ojo, donde la energía luminosa radiante que incide en la retina, se transforma en energía eléctrica que luego se propaga por el nervio óptico correspondiente. En la retina se produjo una transformación de un tipo de energía en otra; la retina por lo tanto actúa como un transductor biológico, especialmente un fototransductor.

Los músculos, convierten la energía potencial química almacenada, en energía cinética química, y los músculos por lo tanto son también transductores biológicos.

La membrana plasmática celular transforma energía química en energía cinética de tipo eléctrica, como en las neuronas; la membrana celular es otro ejemplo de transductor biológico.

Las mitocondrias, los cloroplastos son también transductores biológicos

2.5.- Importancia de la Energía para los Seres Vivos:

Una característica esencial de todos los seres vivos es que para poder mantenerse como tales, necesitan un flujo constante de materia y energía. Esos dos elementos, materia y energía interaccionan dentro del ser vivo en una serie de reacciones englobadas como el Metabolismo.

Por otro lado, el organismo vivo requiere ejecutar un trabajo biológico, y ese trabajo requiere energía que será proporcionada por el metabolismo. Gracias a los estudios bioquímicos se conoce la forma de como la materia interactúa dentro de los procesos metabólicos, de qué manera se utiliza la energía, y de cómo ella fluye a través de las rutas metabólicas, además de como se integran las reacciones junto a los cambios que ocurren a nivel de la materia.

Constantemente la energía es convertida de energía potencial en cinética y viceversa. En el organismo vivo ello ocurre cada instante. La energía es

independiente de la vida. La vida, en cambio, depende por completo de la energía (1).

Parte III. Contenido: La Célula como un Sistema de Compartimientos. Relación Estructura-Función.

3.1.- La Célula como un sistema de compartimientos:

Todas las criaturas vivientes están constituidas por células, pequeños compartimientos que están rodeados por una membrana muy delgada, llenas con una solución acuosa concentrada de numerosos compuestos químicos. Uno de los eventos críticos en la formación de la primera célula debe haber sido con toda seguridad, el desarrollo de la membrana externa. En los orígenes de la vida, las proteínas sintetizadas bajo el control de ciertas especies de ARN no debieron facilitar la reproducción de aquellas especies de ARN a menos que ellas permanecieran en las proximidades del ARN; más aún, como esas proteínas eran libres para difundir entre la población de moléculas de ARN replicantes, ellas pudieron beneficiar igualmente a algunas especies de ARN que pudieran estar presentes. Así, si una variante de ARN surgía, y que hacía un tipo superior de energía, la nueva enzima sintetizada pudo no contribuir selectivamente a la sobrevivencia del ARN variante en su competencia con su propia pareja.

La selección de moléculas de ARN de acuerdo a la calidad de las proteínas sintetizadas por ellas, no pudo comenzar hasta que alguna forma de Compartimiento evolucionó para contener las proteínas elaboradas por una molécula de ARN, y por lo tanto, haciéndola disponible sólo al ARN que ella había generado.

La necesidad de formar un compartimiento, es fácilmente llenada por otras clases de moléculas, las cuales tienen la simple propiedad fisicoquímica de ser Anfipáticas, esto es, consistiendo de una porción hidrofóbica o insoluble en agua, y otra porción hidrofílica o soluble en agua. Cuando tales moléculas anfipáticas se encuentran en una solución acuosa, se agregan, con sus porciones hidrofóbicas alejadas del agua, en contacto unas con las otras, y con la porción hidrofílica en contacto directo con el agua. Las moléculas anfipáticas de forma apropiada espontáneamente se agregan para formar Bicapas, creando así pequeñas vesículas cerradas cuyo contenido acuoso está aislado del medio externo.

Hoy día, todas las células se rodean de una membrana plasmática, consistiendo de moléculas anfipáticas, principalmente fosfolípidos en esa configuración citada.

Ahora bien, para formar y mantener una estructura tan ordenada como el comportamiento celular se requiere energía por lo tanto la célula debe cumplir la vital función de *transferencia y transformación de la materia*. La energía potencial química contenida en las sustancias alimenticias se encuentra como se describió, en las diversas uniones covalentes entre los átomos de las diferentes moléculas.

En el caso de la glucosa, existe entre los átomos de C, H, y O una energía potencial química de 686.000 calorías por mol (es decir, por 180g. de glucosa), que se puede liberar por combustión. Dentro de la célula viva ésta enorme cantidad de energía no se libera súbitamente, sino de modo global y controlado mediante la interacción de enzimas que convierten el combustible en CO₂ y H₂O.

No todas las reacciones metabólicas celulares dentro del mismo compartimiento subcelular. Debido a que las diferentes energías se encuentran en diferentes partes y compartimientos de la célula, el flujo de componentes químicos es canalizado físicamente así como también químicamente.

La forma más sencilla en la que ocurre la *segregación espacial*, es cuando dos enzimas que catalizan reacciones secundarias forman un complejo enzimático, y el producto de la primera enzima no tiene que difundir a través del citoplasma para hallar la segunda enzima. La segunda reacción se inicia cuando finaliza la primera. Algunos de los grandes complejos enzimáticos están relacionados con la síntesis de macromoléculas tales como el ADN y proteínas.

El próximo nivel de segregación espacial en las células envuelve el comportamiento de enzimas funcionalmente relacionadas dentro de la misma membrana, o dentro de compartimientos acuosos de una orgánula que está rodeada por una membrana. El metabolismo oxidativo de la glucosa es un ejemplo de ello.

La organización espacial en un organismo multicelular se extiende más allá de la célula individual. Los diferentes tejidos del cuerpo tienen diferentes grupos de enzimas que hacen distintas contribuciones a la química del organismo como un todo. En adición, hay diferencias significativas en las rutas metabólicas comunes entre diferentes tipos de células en el mismo organismo.

3.2.- Relación Estructura - Función:

El concepto de que la estructura está relacionada con la función es una de las ideas más antiguas en la historia de la biología. El funcionamiento de una célula, tejido, órgano o sistema depende de su estructura. Al examinar una estructura con cierto detalle es posible comprender algo acerca de su función. Por

ejemplo, el corazón está diseñado a manera de una bomba; esto sugiere que la función del corazón es bombear la sangre que le llega a través de los vasos sanguíneos.

La estructura de las moléculas del ADN afecta la acción de los genes y las mutaciones. La estructura de los cromosomas está relacionada con el proceso de división celular, así como con la síntesis del ARN.

De igual forma, la estructura de las mitocondrias está relacionada con la función de la respiración, y la estructura de los cloroplastos con la fotosíntesis. La estructura muscular se relaciona específicamente con la contracción, la de los nervios con la conducción del impulso nervioso, y las glándulas con la secreción.

Algunas estructuras biológicas parecen no tener función definida. Pueden existir órganos y vestigios de algunos de ellos. Esto no elimina el concepto de relación estructura-función, sino que evidencia los cambios sufridos por los seres vivos a través de la evolución. El concepto de la relación estructura función puede ser utilizado para explicar las funciones que una vez pudieron tener esos órganos (5).



UNIVERSIDAD CENTROCCIDENTAL LISANDRO ALVARADO
DECANATO DE MEDICINA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FUNCIONALES
SECCION DE FISIOLÓGÍA
BARQUISIMETO



Principios Físicos no Termodinámicos Aplicados a los
Procesos Fisiológicos

Elaborado por Prof. Gregorio Tiskow D. Ph.D

Barquisimeto, Enero de 2006

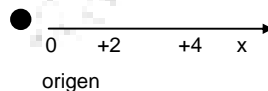
Principios Físicos no Termodinámicos Aplicados a los Procesos Fisiológicos

Parte I: Contenido: Conceptos Básicos de Movimiento y Velocidad. Aceleración. Ejemplos de Aplicación en Fisiología. La vida como un proceso de movimiento continuo.

Al hablar de Movimiento, decimos que un objeto o un cuerpo se mueven cuando cambian de posición respecto a otro objeto que se supone en reposo, el cual recibe el nombre de sistema de referencia.

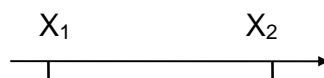
Una de las observaciones elementales que nos proporciona la experiencia es la que los objetos del mundo real parecen estar en un estado permanente de movimiento relativo (4). El conocer conceptos elementales de la física del movimiento y la velocidad, será fundamental para comprender el movimiento de las partículas en solución, de solutos, de iones y otras sustancias a través de la circulación sanguínea, por los líquidos celulares, etc. Daremos a continuación nociones básicas acerca del concepto de movimiento.

1.1.- Movimiento Rectilíneo: o llamado también unidimensional. Si una partícula se mueve a lo largo de una línea recta (x) que denominaremos *Recta Coordinada* y cuya dirección puede ser cualquiera:



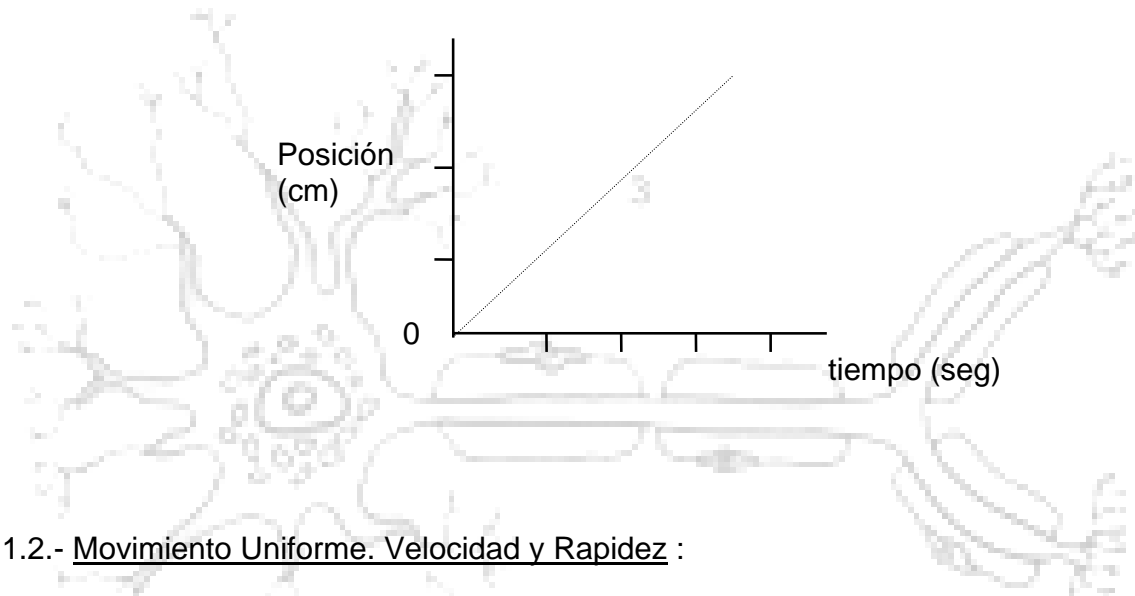
la posición del objeto o partícula respecto al origen queda determinada por un número con su correspondiente unidad, precedido del signo (+) o signo (-). Un cambio de posición del objeto a lo largo de la recta coordenada (x) recibe el nombre de desplazamiento.

Si la posición cambia de X_1 a X_2 , el desplazamiento:



es la diferencia dada por $\Delta X = X_2 - X_1$. El signo (+) o (-) indicará que la partícula se ha movido a la derecha o a la izquierda. Es de notar, que el signo del desplazamiento no depende de que éste se realice en la semirecta positiva o negativa, sino que depende exclusivamente del sentido en el cual se realice el cambio de posición.

Como la posición de un objeto en movimiento cambia constantemente con el tiempo, conviene por lo general, para tener una descripción completa del movimiento, representar en un gráfico la posición del objeto en función del tiempo:



1.2.- Movimiento Uniforme. Velocidad y Rapidez :

Si obtenemos los datos de las medidas de posición y tiempo de un objeto o partícula que se mueve a lo largo de una recta coordenada (x), podemos construir la tabla siguiente:

Posición (cm)	Tiempo (seg)
0	0
1	2
2	4
3	6
4	8
5	10

En este caso, el gráfico obtenido es una línea recta, y se concluye que los cambios de posición Δx y los intervalos de tiempo Δt en los cuales se producen estos cambios son directamente proporcionales; o sea: $\Delta x \propto \Delta t$.

Ahora bien, por matemática elemental se conoce que si dos cantidades son directamente proporcionales, el cociente entre dichas cantidades es constante.

En nuestro caso, esta constante se designa como (\vec{V}) y se designa como Velocidad de la partícula u objeto. Así:

$$\vec{V} = \frac{\vec{\Delta x}}{\Delta t}$$

Un movimiento como el descrito, en el cual la velocidad es constante se denomina Movimiento Uniforme.

Así mismo, podemos definir la Velocidad Media como la razón del desplazamiento en un intervalo de tiempo a la duración del intervalo; en otras palabras, representa la velocidad constante que debería tener un móvil para realizar un desplazamiento Δx en un intervalo de tiempo Δt .

Debemos de considerar que el movimiento rectilíneo en velocidad constante es el más simple que puede presentarse. Por lo común, cuando un móvil se desplaza a lo largo de una recta, de un camino, su velocidad cambia (\uparrow o \downarrow) a medida que transcurre el tiempo y el *movimiento* se llama Variado.

1.3.- Aceleración : se habla de aceleración cuando la velocidad de un objeto varía con el tiempo. Si la velocidad en el instante T_1 es V_1 y luego pasa a un nuevo valor V_2 en un instante posterior T_2 , se define la Aceleración Media a como el cambio de la velocidad durante el intervalo dividido por el intervalo de tiempo, esto es:

$$\vec{a} = \frac{\vec{V}_2 - \vec{V}_1}{t_2 - t_1} = \frac{\vec{\Delta v}}{\Delta t}$$

Ahora bien, la aceleración es un ritmo de cambio de la velocidad, y la velocidad viene dada en (m / s), y el tiempo es (s), por lo que aceleración vendrá dada en (m / s . s) , que se escribe m / s².

1.4.- La Vida Como un Proceso de Movimiento Continuo: Importancia de la Cinemática en Fisiología.

La motilidad es una propiedad de los seres vivos de efectuar movimientos para obtener el desplazamiento corporal o de algunas de sus partes. La motilidad

también se entiende como capacidad de contracción muscular que origina movimientos peristálticos en el tubo intestinal, o bien modificaciones de calibre, como ocurre en los vasos sanguíneos. En ellos, va implícito el fundamento físico de movimiento.

El estudio de las curvas Posición-Tiempo y Velocidad-Tiempo tienen importancia para los biofísicos, los fisiólogos y los biólogos en general, porque la cinemática lineal proporciona el vocabulario matemático básico necesario para analizar curvas. En el estudio de la cinemática se han introducido las curvas Posición-Tiempo y Velocidad-Tiempo. A partir de la curva Velocidad-Tiempo pueden obtenerse valores de la aceleración instantánea en diferentes instantes. En los campos de la Biomedicina se encuentran a menudo magnitudes que varían con el tiempo de un modo muy complicado, no cumpliendo con el movimiento horizontal, y entonces la curva aceleración-tiempo tiene en ocasiones una utilidad definida (4). Este es caso del movimiento de partículas en solución, que discutiremos en secciones posteriores.

¿Qué Importancia Tiene Conocer el Concepto de Aceleración?

El ritmo de cambio de la aceleración es una magnitud de cierta importancia en medicina legal, pues su valor determina la importancia de la sacudida que se recibe cuando, por ejemplo, un automóvil, es arrancado o frenado muy bruscamente, sea por apretar muy rápido el freno o por una colisión. Tales sacudidas pueden causar lesión severa de las vértebras cervicales (Lesión de "Latigazo") y por lo tanto, son a veces fundamento de acción legal en accidentes de tránsito (4).

Otra de las importancias en conocer los fundamentos físicos de la cinemática lineal estriba en su aplicación en los campos de la fisiología del deporte; a saber, cálculo de las velocidades de los atletas, en el lanzamiento de jabalina, de discos, en el Base- Ball y otras actividades deportivas y olímpicas.

Parte II: Contenido: Dinámica de las Partículas: Causas del Movimiento. Las Leyes de Newton. Concepto de Fuerza. Importancia.

En el mundo real todos los cuerpos y objetos se hallan en permanente estado de Interacción . Ello significa que entre ellos hay un estado permanente de influencias recíprocas. Estas influencias pueden ser de atracción o de repulsión, tracción o empuje. Estas influencias o efectos se engloban bajo el nombre de Fuerzas de Interacción.

En el punto anterior se discutieron aspectos relativos a la Cinemática, en donde no se tomaban en cuenta aspectos de fuerzas de interacción entre el objeto que se mueve y los que le rodean. Ya que en el universo todos los cuerpos están sometidos a mutuas interacciones, es trascendental conocer las causas del movimiento, y la relación que hay entre fuerza y movimiento. Así, el estudio del movimiento tomando en cuenta las fuerzas de interacción entre el objeto que se mueve, y el resto de los objetos que le rodean se denomina Dinámica (3).

La Dinámica, parte fundamental de la física comprende 3 leyes que han recibido el nombre de Leyes de Newton:

1. Ley de la Inercia.
2. Ley de la Fuerza o ley de la Masa.
3. Ley de Acción y Reacción.

2.1.- Ley de la Inercia o Primera Ley de Newton:

El principio que expresa esta ley ya formulada en el siglo XVI por el físico italiano Galileo Galilei, después de estudiar el movimiento de objetos sobre superficies longitudinales e inclinadas, corroborada posteriormente por Isaac Newton y aceptada como la 1^{era} Ley de Newton, expresa que: “Un cuerpo libre (no sometido a la acción de ninguna fuerza) que se encuentre en reposo, permanece en reposo, y si está en movimiento, éste se realizará e línea recta y con una velocidad constante”.

Nótese, que la Primera Ley del Movimiento introduce en dinámica el concepto de Fuerza de un modo cualitativo como un agente que produce una alteración del movimiento uniforme a lo largo de una recta (4).

Pero la ley especifica una fuerza “no equilibrada” reconociendo así que una partícula en equilibrio está sometida a más de una fuerza, cuyos efectos se anulan. Dado que todo objeto sobre nuestro planeta tiene un peso, solo es posible el equilibrio si hay alguna otra fuerza que anule el efecto de este peso. Un hombre de pie sobre el suelo y en reposo, está en equilibrio porque el suelo empuja sobre

la planta de sus pies con una fuerza que es exactamente igual, pero de sentido opuesto, a su peso.

Es común observar como objetos de mayor masa presentan mayor dificultad para modificar su velocidad. Esta cualidad que presenta la materia, de oponerse a los cambios de su velocidad se llama Inercia, y por su puesto la masa es una medida de la inercia.

En este instante, teniendo en cuenta el concepto de inercia podemos introducir el de Momento Lineal. Esta definición de momento lineal engloba la importancia del concepto combinado de la masa de un objeto y su velocidad. El momento lineal no es más que el producto de la masa (m) del objeto por su velocidad (v). El momento lineal se expresa en unidades MKS de Kg. m / s.

2.2.- Ley de la Fuerza o de la masa: 2^{da} Ley de Newton:

Si consideramos a un objeto o un cuerpo que están en movimiento, y su velocidad cambia en módulo, dirección, o en ambas a la vez, sobre el cuerpo u objeto debe estar actuando una fuerza no equilibrada y existirá una aceleración.

Por lo tanto, la 2^{da} ley de Newton establece la relación que existe entre la fuerza no equilibrada que actúa sobre un objeto y la aceleración que éste adquiere. Cuando se aplica una fuerza constante a un objeto, los cambios de velocidad Δv en intervalos de tiempo iguales son proporcionales directamente a las fuerzas aplicadas (F) y así:

$$\vec{\Delta v} \propto \vec{F}$$

Como el término $\vec{\Delta v}$ es constante también lo será la aceleración del objeto, por lo que:

$$\frac{\vec{\Delta v}}{\Delta t} \propto \vec{F}$$

Como el primer término es proporcional al segundo, el primero será igual al segundo multiplicando por una constante:

$$\frac{\vec{\Delta v}}{\Delta t} = \vec{F} \cdot K$$

donde (K) se expresa en funcion de otra constante (m), llamada Masa Inercial del objeto, quedando:

$$K = 1/m$$

La expresión quedando como:

$$\frac{\vec{\Delta v}}{\Delta t} = \vec{F} / m$$

o sea: $\vec{F} \cdot \Delta t = m \cdot \vec{\Delta v}$

Como $\vec{\Delta v} / \Delta t$ es igual a aceleración (\vec{a}), la segunda ley de Newton queda expresada por:

$$\vec{F} = m \cdot \vec{a}$$

Esta es la segunda Ley de Newton en su forma más usual, y define la magnitud dinámica Fuerza en función de la masa (m) y de la magnitud cinética aceleración (a). Las unidades en que se expresa es $\text{Kg} \cdot \text{m} / \text{s}^2$ y se denomina newton (N) en el sistema MKS y la dina = $1 \text{ g} \cdot \text{cm} / \text{s}^2$ en el C.G.S.

2.3.- Ley de Acción y Reacción: 3^{era} Ley de Newton:

Si consideramos un objeto (A) que ejerce una fuerza sobre otro objeto (B) éste objeto (B) ejercerá una fuerza igual y opuesta sobre el objeto (A). Las dos fuerzas que participan (F_1 y F_2) en la interacción se llaman Fuerza de Acción y Fuerza de Reacción.

Este hecho es la base de la tercera ley de Newton, que puede expresarse así: "Cuando dos objetos o cuerpos interactúan, siendo esta interacción de naturaleza gravitatoria, eléctrica, magnética o por contacto, etc., las fuerzas de interacción son iguales y opuestas". Las fuerzas de acción y reacción actúan siempre sobre objetos distintos y no se equilibran. Si actuaran sobre un mismo objeto se equilibrarían, dando una resultante con valor cero, y nunca se produciría un movimiento acelerado. Un objeto no puede ejercer una fuerza sobre sí mismo.

3.3.- Tipos de Fuerza. Ejemplos de Interés Fisiológico:

Sobre un cuerpo u objeto pueden actuar diferentes tipos de fuerzas: La aplicada por un resorte o la que se origina al chocar dos cuerpos entre sí, son fuerzas elásticas. Cuando se acerca un imán a un trozo de hierro, hay una fuerza de atracción, llamada Fuerza Magnética; cuando dos pedazos de plástico o nylon se frotan con los dedos y se aproximan una a la otra, entra en acción una fuerza

de repulsión o Fuerza Electrostática; la fuerza que ejerce un cuerpo celeste (la Tierra, la Luna) sobre un cuerpo situado sobre su superficie o a cierta altura, es la Fuerza de Gravedad, y que además se ejerce entre todos los objetos del Universo; por último existen las fuerzas de Roce o Rozamiento que consideraremos al final. De todas las fuerzas nombradas la que tiene un gran interés para el fisiólogo es la fuerza de gravedad, y como tal la consideraremos con un poco de detalle.

3.3.1.- Fuerza de Gravedad: fue también Isaac Newton quien enunció la famosa Ley de Gravitación Universal que expresa que: “Toda partícula del Universo atrae a cualquier otra con una fuerza que varía en proporción directa al producto de sus masas y en razón inversa al cuadrado de la distancia que las separa”. Viene expresada por la siguiente relación:

$$F = G \cdot \frac{M \cdot m}{r^2}$$

Donde: G = constante de proporcionalidad o de gravitación universal y es igual a: $6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{Kg}^2$. La pequeñez de su valor muestra que la gravedad es importante sólo para masa grandes.

M = masa del cuerpo 1.

m = masa del cuerpo 2.

r = distancia entre los centros de la tierra y el cuerpo.

A nivel de nuestro mundo clara está, la gravedad como tal ejerce efectos generalizados y conspicuos debido a que las fuerzas gravitacionales que participan son enormes: el sol, la tierra, la luna etc. En el mundo de las partículas microscópicas y atómicas el papel de la gravedad es insignificante debido a que por su relativa debilidad fuerzas como las electrónicas, y las fuerzas nucleares intensas y débiles juegan un papel dominante.

Ahora bien, la fuerza ejercida sobre un cuerpo por la tierra se conoce como el Peso del Cuerpo , y se designa con el símbolo (w). La relación que se establece entre el peso y la masa de un cuerpo de un objeto es (4):

$$w = m \cdot g$$

Donde $g = \frac{G \cdot M}{r^2}$

Esta es la aceleración gravitatoria con que cae cualquier objeto próximo a la superficie de la tierra, y se ve que es una constante independiente de la masa del cuerpo y (g) equivale a $9.8 \text{ m} / \text{s}^2$

En el sentido de la tercera Ley de Newton, la reacción al peso de un cuerpo es una fuerza igual y opuesta que el cuerpo ejerce sobre la tierra y pasa por el centro de ésta. Así, cuando un cuerpo de masa (m) acelera hacia la tierra, se

deduce que la tierra ha de acelerar hacia el cuerpo, pero la aceleración de la tierra es despreciable dado la enorme masa de la tierra. Como ejemplo, podemos postular lo siguiente:

¿Cuál será el peso de un hombre de masa igual a 100 Kg.?

según la ecuación

$$\begin{aligned}w &= m \cdot g \\w &= 100 \text{ Kg} \times 9.8 \text{ m / sg.}^2 \\w &= 980 \text{ N.}\end{aligned}$$

Lo correcto es expresar los pesos en newton, ya que son fuerzas. En nuestra vida se habla de un sujeto "que pesa" 100Kg., pero esto no debería ser correcto, pero será algo difícil erradicarlo del lenguaje común.

Una aplicación fisiológica fundamental de los conceptos biológicos de la gravedad, reside en el proceso de la circulación sanguínea en nuestro cuerpo. La sangre fluye en el sistema circulatorio bajo presión. El corazón actuando como bomba impulsa la sangre hacia los vasos sanguíneos. La velocidad de los vasos arteriales distendidos continúa impulsando la sangre hacia los capilares. La presión sanguínea continúa disminuyendo progresivamente a medida que la sangre se aleja del corazón, debido a la fricción de ésta contra las paredes de los vasos. Sin embargo, la presión no cae hasta cero. El corazón fuerza la sangre hacia las arterias (bajo gran presión las arterias son elásticas) por lo que, durante las fases de relajamiento del corazón, las arterias logran mantener la presión de la sangre por la tensión de sus paredes.

El regreso de la sangre al corazón a través del sistema venoso no es tan eficiente como el flujo sanguíneo a través del corazón. La presión sanguínea es más baja, pero el flujo a través de las venas es ayudado por varios factores. En ciertas zonas, la contracción de los músculos a través de los cuales corren las venas, ayuda a empujar la sangre a través de ellas.

Ahora Interviene el Factor Gravedad. Esta ayuda a que la sangre de la región cefálica retorne al corazón sin inconvenientes. Pero la gravedad también hace que la sangre se acumule en las porciones inferiores, en las regiones de las extremidades inferiores, sobre todo cuando se está de pie; por ello los pies tienden a hincharse (edematizarse) luego de estar parado por un tiempo prolongado. Los astronautas por ejemplo, deben permanecer acostados para evitar que "por el exceso de gravedad" durante el despegue y el reingreso de las cápsulas espaciales a la atmósfera, haga fluir demasiada sangre al corazón y se acumule en la porción inferior del cuerpo, dejando al cerebro sin sangre.

Otros de los factores fisiológicos de la gravedad, lo podemos observar en la postura y en el caminar. El mantenernos en posición erguida es favorecida por la acción de la gravedad, que nos mantiene en esa posición, gracias también a la acción del sistema muscular apropiado. En el momento de la acción de caminar,

debemos poner en acción todo un grupo muscular para ejecutar movimientos adecuados para mantener el equilibrio y no caernos.

3.2.- Las Aceleraciones y los Efectos Fisiológicos:

Si consideramos cualquier ser vivo sobre la tierra éste ha de estar bajo la influencia gravitatoria terrestre. El proceso evolutivo ha producido formas de vida adaptados a la atracción gravitatoria que todo lo penetra. También a este respecto debemos considerar el efecto de las aceleraciones; es un hecho que son muy poco comunes las aceleraciones apreciables, y si existen son de duración muy breve. Por apreciables se entiende aquellos mayores de $1 \text{ m} / \text{s}^2$ aproximadamente, que es alrededor de un 10% de la aceleración de gravedad (g). Los astronautas y los pilotos de caza-bombarderos están sometidos a las grandes aceleraciones nombradas.

En todo caso, el efecto fisiológico de la aceleración constituye un hecho de la experiencia diaria. Imaginemos un ascensor que baja y va parando lentamente; la aceleración es hacia abajo y, por tanto, la fuerza no equilibrada ha de ser también hacia abajo. La fuerza vertical ejercida por el piso del ascensor sobre los pies del hombre es menor que su peso con lo que experimenta una pérdida aparente de peso.

En el otro caso, si el ascensor sube y está acelerando, entonces el hombre tiene una aceleración (a) hacia arriba y la fuerza no equilibrada ha de actuar también hacia arriba. En este caso, siente que está siendo apretado contra el piso del ascensor, y describe su estado como el de un aumento de peso. Debido a ello: "Cualquier aceleración da la sensación al organismo de un cambio aparente de peso".

Este efecto lo sentimos también cuando vamos a bordo de un avión que ha entrado en un vache de aire y apreciará con sobresalto este fenómeno. El hombre en circunstancias normales nunca está consciente de su peso, pero acusa con precisión su aparente cambio de peso. El cambio aparente de peso se pone de manifiesto dramáticamente durante el despegue de un cohete con una tripulación. El astronauta en estos casos experimenta un cambio de peso sustancial hacia abajo; los músculos de un hombre en pie sobre la tierra no son capaces de bajo aumentos de peso de gran valor, y el tripulante no puede permanecer de pie durante el período de aceleración. Sus órganos internos están comprimidos, la respiración exige esfuerzo y la piel flácida de su cara se torna tirante sobre el cráneo y cuelga formando bolsas laterales. Todos los astronautas son individuos en condición altamente sana, y el soportar pesos excesivos en el despegue aunque expone el organismo a tensiones muy fuerte, no tiene al parecer efectos secundarios aparentes.

Cuando la cápsula espacial gira luego en órbita alrededor del planeta, el astronauta pasará a experimentar el efecto de la ingravidez (mientras la cápsula

no encienda sus cohetes). El estudio de los fisiólogos de la ingravidez, prolongada aún está desarrollándose, pero ya se conocen varios hechos. La ingravidez afecta la distribución de la sangre por todo el cuerpo, reduciendo la cantidad de sangre en las extremidades inferiores. El organismo reacciona excretando líquido, y ello produce la pérdida de masa que experimentan todos los astronautas. Al aterrizar, los efectos de la perturbación cardiovascular tardan algún tiempo en desaparecer, y los astronautas reaccionan normalmente a los cambios súbitos de postura.

Las náuseas son otro problema durante los vuelos con ingravidez. Los efectos de los movimientos rápidos de cabeza que en la tierra son compensados por la gravedad normal toman una nueva y crucial importancia y el resultado es semejante a las náuseas por mareo en el mar.

3.3.- Fuerzas Disipativas : Fuerzas de Roce o de Fricción :

Cuando actúa una fuerza que se opone al movimiento de un objeto o cuerpo, ésta última disminuirá su energía cinética. Parte de esa Energía Cinética desaparece y no se recupera; esta energía se transforma generalmente en calor. Por ello la fuerza de roce o fricción es una fuerza disipativa.

Las fuerzas de roce son también de importancia en la vida cotidiana. Sin la fuerza de roce entre nuestros pies y el suelo, sería imposible andar, pues esta fuerza es la que nos permite impulsarnos hacia adelante. Al caminar se intenta deslizar la suela del zapato hacia atrás, a lo largo del suelo; la fuerza de roce impide que este desplazamiento ocurra y con ello nos impulsamos hacia adelante. Las fuerzas de roce entre superficies sólidas pueden reducirse considerablemente lubricando las superficies de contacto. La lubricación es esencial en el trabajo de cualquier máquina, no menos ha de serlo en el organismo. Considérese la estructura de una articulación sinovial, típica como la de la rodilla. El extremo de cada hueso está recubierto por una capa de tejido cartilaginoso. La articulación permanece encerrada en una membrana, y la cavidad está llena de líquido sinovial, la cual es un ultrafiltrado de plasma sanguíneo, ya que contiene menos proteínas y contiene ácido hialurónico. Entre las superficies articuladas de los huesos, solo hay unas pequeñas áreas de contacto. De esta manera este líquido sinovial actúa de líquido lubricante, permite amortiguar el roce, evitando la fricción entre dos superficies sólidas (4).

Ocurre también fuerza de roce o fricción en el siguiente caso; la sangre de nuestro organismo es líquida y con una fluidez característica. Si por efecto de una hipoxia hay aumento en la cantidad de eritrocitos circulantes en la sangre, la misma tenderá hacerse menos fluida más viscosa, y esta resistencia de viscosidad actúa como una fuerza de roce o de fricción. Ello conduce a disminución en la velocidad de circulación, y por supuesto a efectos secundarios perjudiciales al cuerpo humano.



UNIVERSIDAD CENTROCCIDENTAL LISANDRO ALVARADO
DECANATO DE MEDICINA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FUNCIONALES
SECCION DE FISILOGÍA
BARQUISIMETO

Principios Físicos Termodinámicos Aplicados a los Procesos Fisiológicos

Elaborado por Prof. Gregorio Tiskow D. Ph.D



Barquisimeto, Enero de 2006

Principios Físicos Termodinámicos Aplicados a los Procesos Fisiológicos

Parte I: Contenido: Introducción General. Principios Físicos Termodinámicos Aplicados a los Seres Vivos. Concepto de Termodinámica. Concepto de Trabajo Biológico. El Ser Vivo como una Máquina que realiza Trabajo. Limitaciones en la aplicación de los conceptos de la termodinámica a los seres vivos.

1.1.- Introducción General:

La Energética tiene por objeto el estudio de las transformaciones de las distintas formas de energía entre sí, y la Termodinámica constituye uno de los capítulos de la energética, y por su intermedio se establecen las transformaciones y relaciones que existen entre trabajo y calor.

La aplicación de los conceptos de la termodinámica a los seres vivos al comienzo fue un poco complicada, debido a dos hechos particulares: primero, que a la luz de los físicos termodinámicos en un pasado, los seres vivos aparecían como sistemas muy complejos, difíciles de manejar por sus numerosas variables. Por otro lado, la termodinámica al comienzo estuvo enfocada únicamente al estudio de procesos que implicaban alguna transferencia de calor, y de allí el nombre de termodinámica, y fue utilizada generalmente para estudiar el comportamiento de las máquinas térmicas. Las máquinas térmicas son máquinas que funcionan si se mantiene una diferencia de temperatura bastante alta entre ellas y el medio ambiente, y el rendimiento va a depender de esta diferencia de temperatura. A mayor diferencia de temperatura, mayor es el rendimiento de la máquina.

El hecho antes descrito es por supuesto, incompatible con los sistemas biológicos vivos. Mantenemos escasos grados de diferencia de temperatura con el medio ambiente externo, y por lo tanto, las transferencias de calor entre el medio ambiente y los seres vivos, *no son* la condición para que se lleven a cabo los diferentes tipos de *trabajos biológicos* que se realizan.

Paro, hay que puntualizar que todo *proceso* (entendiéndose como tal, al conjunto de fases sucesivas de un fenómeno) implica un cambio energético, y si todas las funciones básicas de la biología son un proceso, entonces, existen ahí transferencias de energía; si la termodinámica estudia los procesos donde hay transferencia energética, entonces *es posible* también aplicar muchos de los conceptos de la termodinámica clásica a los procesos biológicos. Y uno de los conceptos a comprender es el de la *relación* que existe entre *trabajo y energía*.

Hemos detallado desde el capítulo anterior los conceptos de fuerza y energía. Aunque la energía como tal es algo difícil de definir y comprender, es un proceso familiar. Por medio del alimento que ingerimos recibimos la energía necesaria para vivir y trabajar. La madera, la gasolina, el carbón, el gas, son fuentes de energía con los cuales se enciende la calefacción de muchos hogares, se cocina, y se ponen en marcha los vehículos. Hasta los tiempos modernos, el trabajo era fundamentalmente de tipo muscular (sea de origen animal o humano). Sin embargo, desde la Revolución Industrial el hombre utiliza cada vez más combustible para reemplazar el esfuerzo muscular. Los combustibles que se queman nos suministran actualmente la mayor parte de la energía que opera las máquinas y factorías industriales y agrícolas, y ponen en marcha una gran diversidad de automotores, hasta las naves espaciales. En nuestro modo de hablar corriente nos referimos a la energía como: "estamos llenos de energía" si nos levantamos por la mañana listos y prestos para emprender un trabajo o estudiar, o para intervenir en una actividad deportiva. Pero cuando nuestra actividad ha durado algún tiempo, nos sentimos cansados o hasta agotados, y decimos que "hemos perdido energía", debemos de recuperarla; un buen descanso y una adecuada alimentación restablecerán nuestra capacidad de

realizar *trabajo*. Este concepto ordinario de la energía está muy relacionado con el concepto científico en lo que se refiere a señalar la conexión existente entre la energía y los combustibles que permiten tanto a los músculos como a las máquinas hacer tareas útiles.

Podemos referir acá, que *la energía es la esencia del desarrollo del trabajo y que éste no es la creación de energía, si no su transformación de un tipo a otro, o de un lugar a otro.*

Como ejemplo, vemos que la energía del combustible se convierte en la energía del tren a auto que acelera; el calor pasa de la caldera a una habitación para calentarla, la energía del músculo se utiliza para ejecutar la contracción muscular. Los combustibles almacenan energía potencial, dispuesta para su uso y transformación. Posteriormente, se comprobará que *la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma.*

1.2.- El Trabajo como una medida de la Energía transmitida:

Cuando la energía se transmite en un proceso que consume combustible, se puede medir el costo del proceso por la tarea ejecutada, o por la cantidad de combustible consumido. En los ejemplos vistos, se ejercen fuerzas y se producen desplazamientos; se dice que se ha realizado un *trabajo*. El *trabajo* ejecutado (magnitud que mide la energía transmitida) es proporcional a la fuerza ejercida. Pero, el trabajo va a ser proporcional también a la distancia recorrida por el cuerpo u objeto sobre el cual se ha aplicado una fuerza. La combinación de estos resultados define el trabajo mecánico (T), como el producto de la fuerza ejercida (F) por la distancia recorrida (d). Así pues:

$$T = F \cdot d$$

Los organismos vivos también necesitan energía para poder sobrevivir. Utilizamos esta energía para mantener nuestra integridad estructural y bioquímica. La energía también es utilizada por los seres vivos, sobre todo los más complejos, como el hombre para la realización del llamado *Trabajo Interno*, el cual al final se manifiesta por la producción de calor. La circulación de la sangre, el movimiento de aire por nuestros pulmones, los potenciales de acción, el transporte activo de iones a través de la membrana son ejemplos de trabajo interno, y constituyen los tópicos dominantes de la fisiología.

De igual manera, la energía puede ser utilizada por los organismos vivos para efectuar *Trabajo Externo*. Cuando los músculos son activados, aumentan su utilización de energía química; una proporción de esa energía se transforma en calor, pero como los músculos pueden producir movimiento externo, parte de la energía también puede utilizarse para realizar trabajo externo bajo la forma de fuerza aplicada a lo largo de una distancia (desplazamiento del cuerpo, levantando

un, peso contra la acción de la gravedad, o empujando un objeto contra fuerzas de fricción). Bajo condiciones ideales, un músculo puede convertir en trabajo externo, un 40 a 50% de la energía total transformada. Bajo condiciones isométricas, es decir, cuando el músculo ejerce una fuerza, pero no se acorta (sólo hay tensión muscular) no se realiza trabajo externo debido a que la distancia recorrida es cero. En estos casos, toda la energía química utilizada aparece como calor.

Existe confusión en relación a este último planteamiento. Por ejemplo, si a un sujeto se le obliga a sostener un objeto con peso de 10 kg con los brazos extendidos, no se realiza ningún trabajo externo desde el punto de vista físico, pues el objeto permanece estacionario. Sin embargo, para el fisiólogo la situación es la de un trabajo ejecutado, pues durante la prueba se puede comprobar en el sujeto un aumento en el consumo de oxígeno y un aumento en la producción de calor. Por ello, al discutir el concepto de "trabajo" hay que hacer una cuidadosa distinción entre el trabajo externo o físico, y el trabajo interno o tasa de utilización de energía.

Otro aspecto importante de esta forma de trabajo biológico, es que aun cuando los músculos pueden convertir energía potencial química en mecánica, no son capaces de realizar el proceso inverso, o sea, convertir la energía mecánica en potencial química. Retomando el ejemplo anterior, el proceso de levantar un peso, a medida que el peso es elevado los músculos de los brazos realizan un trabajo en el peso, aumentando su energía potencial gravitatoria; al descender el peso, éste realiza la misma cantidad de trabajo en los músculos, pero este trabajo no es convertido en energía potencial química; el trabajo es perdido como calor.

1.3.- Principios Físicos Termodinámicos Aplicados a los Seres Vivos:

1.3.1.- Conceptos básicos:

Antes de considerar aspectos fundamentales de la termodinámica aplicada a los seres vivos, debemos puntualizar ciertos aspectos conceptuales elementales, que nos servirán de base para un buen entendimiento de los aspectos a planetar.

Sistema y Entorno:

Es importante considerar en termodinámica la distinción entre sistema y entorno; en cualquier estudio termodinámico, el Universo queda escindido en dos partes: el *sistema termodinámico*, que es una región del espacio, o una porción muy definida de materia delimitada por una superficie o envoltura que puede ser real o imaginaria; ejemplo: una reacción química, una célula, un organismo completo, el sol, etc. Todo lo que va a rodear al sistema, y que de alguna manera influye sobre él, se denomina *entorno*. Todo lo que no pertenezca al sistema que se está considerando constituye el entorno o medio exterior.

Hemos mencionado que la materia que constituye al sistema se separa del entorno por una barrera específica y que posee características específicas. Dependiendo de ello, se pueden describir varios tipos de sistemas:

a.- *Sistemas abiertos*: en donde la barrera limitante permite el intercambio de materia y energía con el entorno. Como ejemplo podemos mencionar un organismo vivo, ya que constantemente intercambia materia y energía con el entorno; un animal de experimentación al encontrarse bajo un campana de vidrio, con el objeto de estudiar su consumo de oxígeno; el animal en sí mismo es un sistema abierto ya que está intercambiando materia con su medio externo inmediato, que es el aire contenido dentro del recipiente. Otro ejemplo lo puede constituir una botella de refresco sin tapa, ya que se puede intercambiar materia (líquido) y energía (frío o calor) del interior de la botella con el entorno.

b.- *Sistemas cerrados*: la barrera limitante sólo permitirá el intercambio de energía, más no de materia. En base a ello, una de sus características es que la masa permanece constante. Como ejemplo podemos mencionar el caso de un animal de experimentación en la misma campana de vidrio; el animal y el receptáculo forman un sistema cerrado, cuyo límite es el propio recipiente. Otro ejemplo, lo puede constituir una reacción química que se realiza en un tubo de ensayo bien cerrado, ya que no hay intercambio de materia, pero si se tocan las paredes del tubo, hay producción de calor que se intercambia con el entorno. Una lata bien sellada de refresco o una botella cerrada, pueden completar nuestros ejemplos.

c.- *Sistemas aislados*: un sistema cerrado puede estar aislado o no. Un sistema aislado no intercambia ni materia ni energía con su entorno. Estos sistemas son excepcionales en la naturaleza, pero como ejemplos aproximados se puede mencionar un termo con paredes de vidrio bien cerrado, que no permite el paso de luz; este sistema mientras no se abra no intercambiará ni materia ni energía con su entorno. Las cápsulas de bombas atómicas son sistemas aislados. El Universo íntegro puede considerarse como tal, un sistema aislado.

d.- *Sistemas adiabáticos*: es una especialización del sistema cerrado, que no intercambia materia, pero si puede intercambiar energía, excepto calor. Ejemplo: un termo con paredes de vidrio transparente, que no intercambia materia, pero sí luz radiante del exterior, más no calor; o el termo al que se le haya introducido una resistencia eléctrica para calentar el contenido; en el caso de un gas encerrado en un recipiente construido con un material mal conductor del calor.

Sistemas Homogéneos y Heterogéneos:

Un *sistema* se considera *homogéneo* cuando posee las mismas propiedades en todos los puntos del sistema; será *heterogéneo* cuando porciones de ese sistema considerado posee propiedades diferentes. Como ejemplo, podemos referir el caso de un sistema formado por agua con sal, y otro formado por una muestra de sangre; entre ambos hay claras diferencias. En el primero, agua salada, no es posible distinguir porciones con propiedades distintas; en el segundo caso, se

pueden reconocer partículas de diferentes dimensiones y formas, con propiedades diferentes (hematíes, leucocitos, proteínas, plasma, etc).

Propiedades Extensivas e Intensivas de un Sistema:

Ambas propiedades están englobadas dentro de las *propiedades macroscópicas* de un sistema, especificadas en el estado de equilibrio y que pueden ser perfectamente medibles. Hay instrumentos diseñados por el hombre, que permiten determinar y medir el valor absoluto de tales propiedades cuando el sistema se halla en equilibrio.

Propiedades Intensivas: son aquellas variables que NO dependen de la masa del sistema, de la magnitud del mismo; ejemplo: presión, temperatura, densidad, calor específico, etc.

Propiedades Extensivas: variables que SI dependen de la masa del sistema; ejemplos: contenido energético, contenido calórico, volumen, etc.

Estado de un Sistema:

Se llama estado de un sistema al *conjunto de todas sus propiedades* (2). Ello implica que el cambio o variación de una sola propiedad implica un cambio de estado del sistema en general. No se debe confundir este término con los estados de la materia, los cuales son sólido, líquido y gaseoso. El estado termodinámico de un sistema, así como sus propiedades, puede ser definido por un conjunto de variables termodinámicas llamadas *variables de estado*. Cuando un sistema sufre una transformación entre dos estados, la misma viene dada por la diferencia de valores de las variables de estado en los estados final e inicial, y el resultado de esta variación es independiente de la ruta a través de la cual ha tenido lugar la transformación; tan sólo depende de los estados final e inicial. Aquellas variables que dependen de la trayectoria o ruta recorrida, como en el caso del trabajo, la fuerza, no son variables de estado; la presión, la temperatura y el volumen si son variables de estado, al igual que la energía. Es interesante recordar que si se especifican algunas variables de estado, entonces todas las demás quedan determinadas; así por ejemplo, si se especifican la presión y el volumen de 1 mol de un gas ideal, la temperatura queda determinada. Lo importante a comprender es que con las variables de estado, pueden analizarse los cambios que han ocurrido en el estado termodinámico del sistema. En termodinámica lo único que podemos medir en relación a una función de estado o variable de estado, es el cambio de ésta cuando un sistema evoluciona entre dos estados de equilibrio.

Valorar la energía total de un sistema en equilibrio, sea en el estado inicial o en el final, requiere especificar propiedades del sistema complicados para verificar (como el contenido calórico, presión, temperatura, composición, volumen, etc), por lo tanto, lo que se mide es el *cambio* experimentado en el contenido de energía entre los estados final e inicial:

$$E_1 \longrightarrow E_2 \qquad \Delta E = E_2 - E_1$$

El obtener el valor de ΔE (cambio en una variable de estado), es independiente de la forma y del modo como ese sistema alcanzó el estado de equilibrio. Esa variable de estado decimos, que es función de una serie de variables intensivas y extensivas del sistema: temperatura, presión, volumen, masa, etc.

A las diferentes variables que definen el estado de un sistema, se les puede relacionar matemáticamente mediante la *ecuación de estado*. Por ejemplo, para un gas ideal:

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \qquad \text{Ecuación general de los gases.}$$

Otros conceptos básicos que vale la pena introducir para entender lo que significa un proceso son los siguientes:

Cuando un sistema pasa de un estado inicial (A) a otro estado final (B) a través de una sucesión continua de estados intermedios, se dice que ha experimentado un *proceso o transformación*; eso lo habíamos ya definido. Si después que ha ocurrido el proceso, el estado final es similar al inicial, la *transformación se define como cerrada o cíclica*; en cambio, si el estado final es distinto al inicial la *transformación es abierta*.

Ahora bien, si un proceso ocurre de tal forma que en cada instante que se considere presión y temperatura, estos van a ser los mismos en todos los puntos del sistema, la *transformación es reversible*. Lo contrario sucede si en un instante dado del proceso se verifica que la presión y temperatura no son las mismas en todos los puntos del sistema, entonces *la transformación es irreversible*.

1.3.2.- El Estado de Equilibrio Termodinámico:

Como sabemos, la termodinámica se encarga del estudio de las transferencias energéticas cuando un proceso transcurre desde un estado inicial llamado (A) hacia un estado final llamado (B). Al estado inicial lo podemos llamar "estado de no equilibrio" y al estado final como, "estado de equilibrio".

$$A \longrightarrow B$$

Un proceso cuando ha sucedido y se detiene, es porque el sistema ha adoptado el *estado de equilibrio*, y es allí donde todas las características del sistema van a permanecer constantes, inalteradas en el tiempo; no hay más reacción en ese momento. Un sistema en equilibrio es un sistema estático,

estacionario, dentro del cual no se está produciendo ningún cambio. Si definimos el estado de un sistema en un momento dado por su presión, volumen y temperatura, estamos admitiendo implícitamente que en dicho momento la presión y la temperatura son las mismas en todos los puntos del sistema.

¿Cuáles serían las características de un sistema en estado de equilibrio?

- Las *propiedades mecánicas del sistema* tienen que ser uniformes. Eso significa que si dentro del sistema existe una fuerza física que actúe en un sentido determinado, deberá existir en otra parte del sistema otra fuerza física de la misma magnitud, pero de sentido contrario, de forma que el efecto final va a ser nulo.
- Las *propiedades químicas* también deben conservarse uniformes a través de todo el sistema; ejemplo, la cantidad de materia que existe en una porción del sistema, debe existir en igual cantidad en otra parte del mismo. En otras palabras, la concentración del sistema va a ser igual en cada punto del sistema. Si la diferencia de concentración entre dos puntos del sistema existe, hay flujo de materia, y ello va a constituir una condición de NO equilibrio.
- La *temperatura* también debe permanecer uniforme dentro del sistema. Si hay diferencia de temperatura, se produce flujo de calor y ello tampoco es compatible con el equilibrio propuesto.

1.3.3.- Aplicación de los principios de la termodinámica a los seres vivos:

La característica principal de los seres vivos que debe llamarnos la atención, a fin de analizarlos desde el punto de vista termodinámico, es la constancia de sus propiedades en comparación con las grandes transformaciones energéticas que ocurren en ellas (2). Esta constancia se refleja básicamente en la composición química. A pesar de mantener constantes tales propiedades, *los organismos vivos no son sistemas en equilibrio*, pues no ocurriría en ellos ningún proceso.

Los organismos vivos son sistemas abiertos que intercambian constantemente materia y energía con su entorno. *Los seres vivos no son por lo tanto, sistemas en equilibrio*; no somos compatibles con la condición de equilibrio estático definido anteriormente. Si se analizan en un momento dado, los contenidos de los diferentes elementos que participan en las reacciones que tienen lugar dentro del ser vivo, observaremos con asombro que casi todos los reactantes y productos permanecen estables en el tiempo; o sea, que a pesar del flujo constante de materia y energía, nuestras concentraciones permanecen constantes, estables en el tiempo, que parecieran que mantuviéramos un "equilibrio".

Para resolver tal incongruencia conceptual, se ideó un concepto que algunos autores denominan Estado Estable y otros lo llaman Equilibrio Fluído, en donde las reacciones y transformaciones se están produciendo constantemente.

Si a un ser vivo se le priva del suministro de materia, su integridad en poco tiempo se verá comprometida. Pero un sistema biológico también pierde la capacidad para mantener su equilibrio fluído con el paso del tiempo, es decir, con el temido envejecimiento.

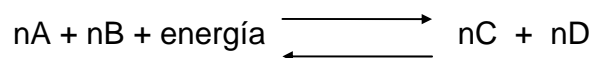
En resumen, podemos establecer que **los organismos vivos somos sistemas termodinámicos abiertos que permanecemos en estado estable o de equilibrio fluído.**

1.4.- Primer Principio de la Termodinámica:

Este principio conocido también con el nombre de “Principio de la Indestructibilidad o Conservación de la Energía” fue formulado en 1842 por el joven médico alemán Robert Mayer, a raíz de sus investigaciones en los nativos de Java sobre la influencia del calor sobre los gases sanguíneos. A su vez, este principio fue demostrado experimentalmente por Joule en 1842 quien estableció la equivalencia entre calor y energía mecánica.

Este principio fundamental establece que **“la energía no se crea ni se destruye, sólo se transforma”**. Este principio nos habla del contenido total de energía del Universo. Si consideramos la división arbitraria del Universo en sistema y entorno, el principio establece que la energía del sistema junto a la del entorno permanece constante. Si por ejemplo, en un sistema cerrado ocurre una transformación o proceso, ello conllevará a un cambio en la energía del sistema; en el entorno por lo tanto, deberá existir también un cambio energético similar, en la misma magnitud, de forma tal que la cantidad de energía del sistema más la del entorno permanezca constante.

Lo anterior, se puede analizar mejor en términos de una reacción química:



El principio establece que la energía absorbida en la reacción directa, es igual a la desprendida en la reacción inversa. La variación de energía en la reacción anterior vendrá dada por:

$$\Delta E = Q - T$$

donde: Q: calor y T: temperatura.

Así, cada vez que un sistema absorbe calor y ejecuta un trabajo, se producirá dentro del sistema un cambio en su energía que será igual a la cantidad de calor que el sistema absorbe, menos la cantidad de trabajo que el sistema realiza sobre su entorno. A este cambio de energía es lo que denominamos *cambio o variación de la energía interna*. Así, introducimos el concepto general de energía interna dentro de la 1^{ra} ley de la termodinámica.

La *energía interna* de un sistema resulta de la suma de las energías correspondientes a la de traslación, rotación y vibración de las moléculas, la energía de los electrones de los átomos y la energía residente en los núcleos atómicos. Su determinación en cantidades absolutas es casi imposible con los medios actuales. Lo único que podemos medir es el *cambio* en la energía interna del sistema (ΔE), más que el valor absoluto de esta energía. Así, en una reacción química no nos interesa si los productos tienen mayor o menor energía interna que los sustratos, sino cual es el cambio de energía ocurrido en el curso de la reacción.

La energía interna es una función de estado, y por lo tanto su variación (ΔE) es independiente de la ruta a través de la cual transcurre la transformación o proceso. No debemos olvidar tampoco, que esta 1^{ra} ley de la termodinámica predice además como la energía se transforma de una forma a otra, o como se transfiere de un sistema a otro (o a su entorno) y viceversa.

Ahora bien, los procesos que tienen lugar en el interior de las células no transcurren a volumen constante (aunque son mínimos los cambios), pero si a presión constante. Una forma de trabajo (T) realizado por un sistema a presión constante, viene dada por el producto de la presión (P), por la variación de volumen (Δv) que tiene lugar:

$$T = P \cdot \Delta v$$

Si recordamos que: $\Delta E = Q - T$

Sustituyendo (T) por su respectivo valor queda que:

$$\Delta E = Q - P \cdot \Delta v$$

donde Q es el cambio o variación de calor ocurrido a presión constante.

Despejando Q nos queda que:

$$Q = \Delta E + P \cdot \Delta v$$

Ya que ΔE , P y Δv son funciones de estado, Q también es una función de estado.

Ahora bien, el cambio calórico ocurrido en estas circunstancias, o sea, a presión constante, se denomina con el término de **Variación de Entalpía**. La entalpía constituye también una función de estado. Así, reescribiendo queda que:

$$\Delta H = \Delta E + P \cdot \Delta v$$

El valor de la variación de entalpía dependerá sólo del contenido calórico de los estados final e inicial del sistema, y no del camino a través del cual transcurre la transformación.

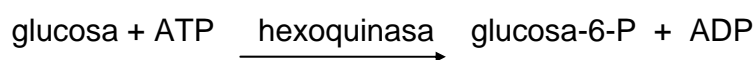
Como sea que, cuando las reacciones bioquímicas transcurren el cambio de volumen (Δv) que sucede es muy pequeño, y que prácticamente se puede considerar despreciable:

$$\Delta H = \Delta E + P \cdot \Delta v \quad \xrightarrow{=0}$$

de donde:

$$\Delta H = \Delta E$$

Correspondiendo así el cambio de entalpía, al cambio de la energía interna del sistema. Pero de todos modos los cambios de volumen, aunque mínimos existen, pero siempre nos referiremos a los cambios calóricos como a cambios de entalpía. Como sea que, el cambio de entalpía ocurrido en una reacción será característico para esa reacción, se va a denominar *entalpía de reacción*. Por ejemplo, la reacción de fosforilación de la glucosa catalizada por la hexoquinasa tiene una entalpía de reacción de:



$$\Delta H = -6,6 \text{ kcal/mol} = -27,6 \text{ kJ/mol}$$

A partir de los conceptos descritos, se han originado dos grandes clasificaciones de las reacciones químicas:

1. Reacciones exotérmicas, como aquellas en la cual el sistema cede, libera calor al entorno, y por definición la variación de entalpía será negativa: $\Delta H < 0$
2. Reacciones endotérmicas, como aquellas en la cual el sistema gana, absorbe calor del entorno, y su variación de entalpía será positiva: $\Delta H > 0$

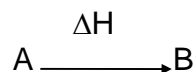
Las variaciones de entalpía que ocurren en las reacciones químicas ocurren bajo *estados o condiciones estándar del sistema*. Por lo tanto, hay que definir un estado termodinámico estándar, al cual se han de referir todas las medidas. El estado termodinámico estándar biológico quedará definido bajo las siguientes condiciones:

- El estado estándar de una sustancia pura se define a 1 atmósfera de presión a 25°C ($273^\circ + 25^\circ = 298^\circ \text{K}$).
- Para reacciones biológicas que están ocurriendo en solución acuosa, el estado estándar del producto o los reactantes estará definido a concentraciones de 1 molar. Los iones hidrógeno son una excepción a esta definición, puesto que la concentración 1 molar corresponde a un pH = 0, y a este pH los sistemas biológicos son inestables.
- El estado estándar de la concentración de iones hidrógeno se define a una concentración de 1×10^{-7} molar que corresponde a un pH de 7,0
- La entalpía estándar de formación de una sustancia a pH = 7,0 es la variación de entalpía asociada a la formación de 1 mol de sustancia a partir de sus elementos en estado estándar. En tal sentido, la ΔH para una reacción dada será:

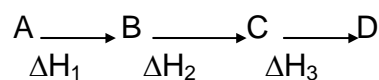
$$\Delta H^{\circ f} = \sum \Delta H^{\circ f}_{\text{productos}} - \sum \Delta H^{\circ f}_{\text{reactantes}}$$

$\Delta H^{\circ f}$: indica la entalpía de formación de una sustancia en condiciones estándar.

Los cambios de calor generalmente se pueden detectar mediante un calorímetro adiabático, pero los cambios calóricos en las reacciones químicas son muy pequeños, por lo que resulta a veces difícil detectarlos. Para solventar tal situación, la reacción química en estudio se acopla a otras reacciones que aumentan el cambio de entalpía total; la entalpía total constituye así, la suma de los cambios de entalpía de las reacciones acopladas, ya que ello es una propiedad de las entalpías molares, es decir, que son aditivas. Este enunciado constituye la *Ley de Hess*. Así:

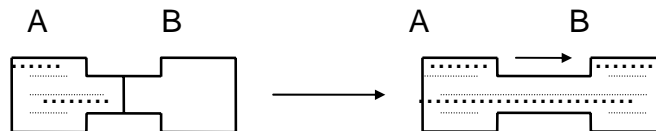


o lo que es similar:



$$\Delta H_{\text{total}} = \Delta H_1 + \Delta H_2 + \Delta H_3$$

Como observamos, las reacciones exotérmicas liberan calor; la energía calórica pasa de un cuerpo caliente hacia uno menos caliente; todos sabemos que el agua corre montaña abajo y no al revés; de igual forma, un bloque de hielo al derretirse absorbe calor del entorno, y en el ejemplo siguiente:



las moléculas de gas del recipiente ocurrió de A → B al quitar la barrera inicial entre los dos compartimentos.

¿Qué es lo que determina que un proceso evolucione espontáneamente en un sentido determinado?

La primera ley de la termodinámica nos habla acerca de los cambios en las características y flujos de energía entre un sistema y su entorno. No nos dice sin embargo, acerca de la direccionalidad del proceso en cuestión. Esto es más interesante aún desde el punto de vista bioquímico, puesto que si ignoramos la posible dirección de los procesos metabólicos, difícilmente se conozca el significado de tales procesos. Para ello entraremos a considerar la segunda ley de la termodinámica.

1.5.- Segunda Ley de la Termodinámica:

El principio fundamental de esta segunda ley, tanto para los sistemas físicos como para la vida misma, es parte de la experiencia diaria, es decir, *las reacciones espontáneas tienen una dirección dada*. Por esta razón, Sir Arthur Eddington llamó a esta Ley “la flecha del tiempo”. La segunda ley nos provee un criterio para predecir la dirección de un proceso determinado.

Para determinar la dirección de los procesos, la termodinámica utiliza dos nuevos conceptos: *la entropía y la energía libre*.

Antes de considerar tales conceptos, es bueno aclarar las siguientes definiciones:

Desde el punto de vista termodinámico se considera que *un proceso es reversible* cuando luego de transcurrido dicho proceso, se pueden restablecer las condiciones originales sin causar cambios en otro sistema. *Un proceso será irreversible (llamado también espontáneo)*, si para restablecer las condiciones

originales previas, se deben causar cambios en otro sistema. Las reacciones o procesos irreversibles son las que condicionan la dirección de los procesos metabólicos, y son las más importantes desde el punto de vista fisicoquímico.

Desde un primer momento, y dado que *casi todos los procesos irreversibles o espontáneos cursan con un ΔH negativo (son exotérmicos)*, se podría asumir que esta liberación de calor podría constituir la fuerza impulsora de la irreversibilidad de estos procesos. Ejemplo, la roca que rueda montaña abajo, o la caída de agua en una catarata, la explosión de un gas, todos son procesos irreversibles. Para poder retornar el proceso a su estado natural original, hay que modificar otro sistema: hay que aportar energía de otro sistema. Pero, puede suceder que un proceso irreversible sea endotérmico, como el caso del derretimiento del bloque de hielo, que para fundirse debe absorber calor del entorno. Como podemos apreciar, el término ΔH no nos proporciona información precisa, y NO es útil para determinar la dirección del proceso. Debemos considerar entonces, la existencia de otra función que nos ayude a definir las características de un proceso irreversible o espontáneo; esa función es la entropía.

1.5.1.- Entropía:

Cuando se disuelve en agua una sustancia, sus moléculas (iones) pasan de un estado ordenado (sólido cristalino o amorfo) al más desordenado que el solvente (agua) así lo permita. Si añadimos más agua a esta disolución, las moléculas de soluto van ocupando poco a poco "la nueva agua" hasta distribuirse en forma uniforme por todo el solvente. Diluir es por lo tanto, un proceso irreversible, porque al diluir aumentamos el desorden dentro del sistema, de las moléculas disueltas en el solvente. En el otro caso, si mezclamos agua caliente con agua fría, se encontrará que la temperatura de la mezcla es el promedio aritmético de las temperaturas iniciales del agua caliente y fría. Esta igualación de temperatura es un proceso espontáneo, y el agua caliente y la fría nunca se separarán otra vez. Análogo al ejemplo anterior, cantidades separadas de agua caliente y fría tienen un orden que desaparece al mezclarlas.

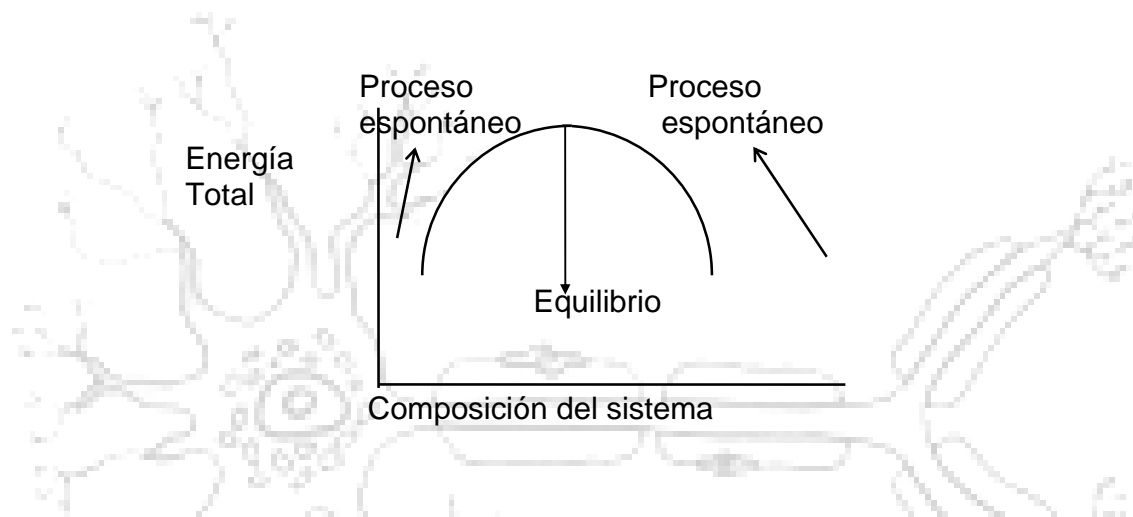
Para definir esta tendencia interna de la materia a conseguir "el estado más desordenado posible", se ha descrito el término *entropía* (S) (movimiento interno). *La entropía es una función termodinámica de estado que determina la magnitud o grado de desorden alcanzado por la materia en un sistema.*

De esta forma, la 2^{da} ley de la termodinámica establece que: "cualquier proceso irreversible que se lleve a cabo en un sistema aislado, conduce al aumento de la entropía del sistema". Ampliando un poco más esta afirmación hay que mencionar que en un proceso reversible, la entropía del Universo permanecerá constante. Pero la entropía del Universo nunca decrece, por el contrario va en aumento; si la entropía del sistema decrece, aumenta la de los alrededores de forma tal que, el cambio de entropía total del Universo (sistema + entorno) aumenta o permanece constante.

Es decir:

$$\Delta S \text{ universo} = \Delta S \text{ sistema} + \Delta S \text{ entorno} = \text{mayor o igual a cero.}$$

Un sistema dado alcanza el equilibrio con su entorno cuando su entropía ha aumentado, y ha alcanzado un valor máximo de forma que ya no hay energía disponible para dirigir procesos. Así, la tendencia al aumento de entropía es la fuerza motora que dirige a los sistemas hacia el equilibrio con su entorno:



En todo caso, hay que insistir en lo de sistema aislado pues la entropía puede disminuir cuando se deja que haya flujo de materia o energía (entrada). Si no fuera así, la vida sería un hecho imposible. Ya que los seres vivos son sistemas altamente ordenados, tienen que haber aparecido naturalmente sistemas de baja entropía. Por esta razón, el tipo de sistema que interesa al fisiólogo no está de ningún modo aislado; los seres vivos somos sistemas abiertos e intercambiamos constantemente materia y energía. La entropía de un sistema como la célula tiende a disminuir siempre y cuando el aumento del orden y de estructura del sistema se compense por un incremento en la entropía de su entorno. Cuando un organismo vivo está en equilibrio con su entorno, dicho organismo está muerto; *la muerte de un individuo implica un aumento de entropía y es un proceso irreversible.*

Así, *los cambios de entropía son los que realmente tienen significado para determinar la espontaneidad de un proceso de importancia fisiológica.* Los sistemas biológicos son sistemas altamente ordenados, lo hemos mencionado ya; un sistema fisiológico funciona a la perfección cuando todas sus partes están ocupando el lugar que les corresponde, y funcionando. Cuando hay cierta

variación se van a presentar distorsiones de funcionamiento, y entonces interviene la fisiopatología, ya que hemos caído en un estado mórbido.

Los sistemas vivos siempre mantenemos una lucha contra la entropía; nuestra subsistencia depende de nuestra capacidad de almacenar entropía negativa. Se pueden construir sistemas de entropía negativa si utilizamos otro sistema en el cual la entropía aumente, y es el caso por ejemplo cuando sintetizamos una molécula de proteína. Una molécula proteica es un sistema de muy baja entropía, pero su síntesis ocurre sólo si se degradan otras moléculas o se convierten otras moléculas de un cierto grado de complejidad a moléculas más sencillas (los aminoácidos), y durante tal proceso se libera una cierta cantidad de energía, y esta energía es la que se utiliza para sintetizar proteínas. Entonces, se asocia la estructuración de un sistema complejo con la degradación de otro sistema. En todo caso, se dice que el cambio de entropía del sistema más el cambio de entropía del entorno tiene que ser mayor o igual a cero, pero nunca menor.

Debemos de considerar ahora que, los procesos metabólicos dentro de la célula no ocurren a una energía interna constante, pero sí se verifican a presión, temperatura y volumen constantes. Para el fisiólogo, es necesario disponer de un criterio sencillo que pueda ser usado para predecir la forma en que un proceso marchará espontáneamente en esas condiciones. Este criterio nos lo proporciona el concepto de *energía libre de Gibbs del sistema*.

1.5.2.- Energía Libre:

La energía libre o función de Gibbs (G) es una función termodinámica de estado que permite definir las condiciones de equilibrio en función de la entalpía y la entropía del sistema, a presión y temperatura constantes. Así:

$$\Delta G = \Delta H - \Delta S \cdot T$$

En la fórmula anterior:

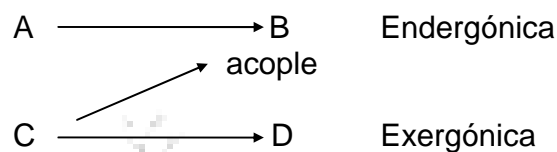
ΔG = variación de energía libre. ΔH = variación de entalpía. ΔS = variación de entropía. T = temperatura.

Ya que la variación de entalpía es una propiedad de la 1^{ra} ley de la termodinámica, y la variación de entropía lo es de la 2^{da} ley, la variación de energía libre (ΔG) es el concepto unificador de estas dos leyes termodinámicas

La vida como tal, se conoce termodinámicamente como un proceso endergónico (los sistemas vivos absorben calor del entorno y su $\Delta H > 0$), y es no

espontáneo. En nuestros sistemas biológicos se llevan a cabo reacciones endergónicas acopladas a reacciones exergónicas. Estos procesos presentan ciertas características, a saber:

Para que estos acoplamientos se efectúen, el proceso endergónico tendrá que dirigirse en un sentido, y el exergónico en sentido contrario, y si existe la posibilidad de acoplar estos dos procesos, es factible que la energía que se produce y libera en la reacción exergónica sea utilizada para llevar a cabo el proceso endergónico, y ello es precisamente lo que sucede en los sistemas biológicos y tales fenómenos se conocen como sistemas de reacciones acopladas:



Premisas básicas:

- Deben existir sin excepción, una reacción de tipo exergónica y otra de tipo endergónica.
- La energía que se desprende en la exergónica, debe ser mayor que la energía consumida en el proceso endergónico. De tal manera que, si se suma el ΔG del proceso exergónico más el ΔG del proceso endergónico el resultado siempre tendrá un valor negativo:

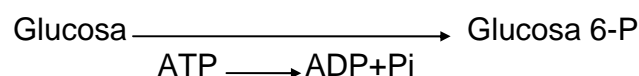
$$\Delta G_{\text{exergónico}} + \Delta G_{\text{endergónico}} < 0$$

- El cambio de entropía de los dos sistemas, el exergónico más el endergónico, tiene que arrojar un valor mayor que cero:

$$\Delta S_{\text{exergónico}} + \Delta S_{\text{endergónico}} > 0$$

- Debe existir un mecanismo o sistema acoplador, que en el caso de las reacciones biológicas generalmente son sustancias intermedias o grupos atómicos, que son compartidos por las dos reacciones acopladas.

Ejemplo biológico:



La reacción anterior no procede sin el suministro de energía, o sea, no ocurre espontáneamente si no se suministra ATP. En este caso, la segunda reacción de degradación del ATP en ADP + Pi se utiliza para llevar a cabo la fosforilación de la primera, en este caso de la glucosa. Así ocurre un acoplamiento de reacciones.

Según conocimos al deducir el concepto de entropía:

$$\Delta S_{\text{universo}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{entorno}} = \text{mayor o igual a cero}$$

en donde el cambio de entropía en un proceso reversible es igual a cero ($\Delta S=0$), es positivo ($\Delta S > 0$) en un proceso irreversible o espontáneo, y menor a cero ($\Delta S < 0$) en un proceso no espontáneo.

Con la entropía tenemos un medio aproximado de determinar la reversibilidad o irreversibilidad de un proceso. Pero con la ecuación arriba formulada de ΔS total, debemos conocer el cambio de entropía no sólo del sistema, sino también del entorno. Esto complica el hecho del cálculo del ΔS total, ya que prácticamente es imposible calcular el ΔS del entorno para cada proceso. Con la energía libre de Gibbs, que al utilizar sólo variables del sistema, nos permite conocer la reversibilidad o no de un proceso dado.

¿Cómo se deduce?

Si sabemos que: $\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{sistema}} + \Delta S_{\text{entorno}}$

Pero por el otro lado, el cambio de entropía de un proceso reversible hipotético cuyo resultado final sea igual al estudiado sería:

$$\Delta S_{\text{entorno}} = (Q_{\text{reversible}} / T)_{\text{entorno}}$$

Donde ($Q_{\text{reversible}}$) es el calor absorbido por el sistema en un proceso reversible, y (T) la temperatura absoluta a la que ocurre el proceso.

A temperatura y presión constantes:

$$\Delta H_{\text{sistema}} = - (Q_{\text{reversible}})_{\text{entorno}}$$

Luego:

$$\Delta S_{\text{entorno}} = - (\Delta H_{\text{sistema}} / T)$$

Sustituyendo queda que:

$$\Delta S_{\text{total}} = \Delta S_{\text{sistema}} - (\Delta H_{\text{sistema}} / T) = \text{mayor o igual a cero}$$

multiplicando ambos términos por (-T):

$$-T \cdot (\Delta S_{\text{total}}) = (\Delta H_{\text{sistema}}) - T (\Delta S_{\text{sistema}}) = \text{menor o igual a cero}$$

Esta ecuación tiene la ventaja de que el cambio de entropía del Universo se define sólo con las propiedades del sistema. El producto de (T) por (ΔS_{total}), es lo que se denomina *cambio de energía libre o energía libre de Gibbs*; esto es:

$$\Delta G = -T \cdot \Delta S_{\text{total}} = \text{menor o igual a cero}$$

Lo que es lo mismo:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

La variación de energía libre (ΔG) permite entonces predecir la evolución de los procesos que ocurren a presión y temperatura constantes, sin trabajo útil.

En efecto, sí:

$\Delta G = 0$ Será un proceso reversible y está en equilibrio.

$\Delta G < 0$Será un proceso irreversible, no viable en la dirección contraria.

$\Delta G > 0$Será un proceso imposible de darse en forma espontánea.

Nótese que, el concepto de energía libre no sólo sirve para determinar la dirección de un proceso, sino que nos informa además del cambio de energía libre, es decir, *la energía útil*. El ΔG es igual al cambio de entalpía (cambio de energía interna a presión constante), menos el cambio de energía degradada, o sea, la entropía (ΔS). Así, tratamos de la energía útil, de la energía que puede ser

utilizada, y en términos generales se puede llamar *energía libre a la capacidad máxima de trabajo de la energía potencial*. Tengáse en cuenta que, las reacciones bioquímicas producen siempre disminución de la energía libre del sistema. Esta es otra afirmación de la 2^{da} ley, e indica por qué las reacciones naturales tienen direccionalidad.

No debemos confundir energía libre con energía interna del sistema; la energía libre no es necesariamente energía contenida por el sistema; ésta es la energía interna del sistema. La energía libre es sólo un índice de la capacidad del sistema de transformar otras energías en trabajo útil, aunque ellas no estén contenidas en el sistema. Cuando se dice que al realizar trabajo útil, el sistema pierde energía libre, estamos señalando que al cambiar de estado pierde capacidad de producir trabajo útil a expensas de su energía interna o del calor absorbido.

Con respecto a las transformaciones exergónicas o endergónicas y su relación con la ΔG , podemos señalar que las reacciones exergónicas cursan con disminución de energía libre del sistema ($\Delta G < 0$), y suelen darse espontáneamente si la presión y temperatura no cambian, y no existe trabajo útil. En las endergónicas se produce un aumento de la energía libre del sistema ($\Delta G > 0$), y que a presión y temperatura constantes no suelen darse en forma espontánea.

1.6.- Factores que Limitan la Aplicación de los Principios Termodinámicos a los Seres Vivos:

La aplicación de las leyes de la termodinámica a los seres vivos resulta de extraordinaria importancia y utilidad, si se considera que los procesos bioquímicos como reacciones químicas que son, deben ajustarse en todo a las leyes que nos informan del comportamiento de los procesos termodinámicos. Los principios y enunciados descritos son esenciales para la comprensión de la transformación de la energía entre sus diferentes formas. Las leyes termodinámicas también nos informan no sólo del comportamiento de la energía, sino que dictaminan la dirección y viabilidad de los procesos; esto último es crucial en los procesos metabólicos, puesto que la dirección y viabilidad de las reacciones metabólicas determinan su posible significado fisiológico.

Parece incongruente en todo caso, aplicar la termodinámica clásica al estudio de los seres vivos. La termodinámica clásica se llama también "termodinámica del equilibrio", puesto que sus principios se cumplen sólo cuando el sistema alcanza el equilibrio. Sin embargo, los seres vivos deben mantener sus procesos muy alejados de la condición de equilibrio, ya que en él no se genera trabajo útil. La condición de equilibrio es incompatible con la vida, puesto que la vida se basa en la utilización de energía en beneficio de un orden pre-establecido, un orden estructural (siempre en beneficio de la disminución de la entropía).

La muerte de un organismo se ha definido como la “situación en que los seres vivos alcanzan el estado de equilibrio), y a la vida según Bichat, como “el conjunto de funciones que se resisten a la muerte). La aplicación de la termodinámica clásica a los seres vivos conlleva a la situación de la extrapolación al equilibrio de procesos que sabemos están alejados de él. La aplicación de la termodinámica a los seres vivos no tiene más limitaciones que las propias de la termodinámica clásica.

En este sentido, la principal limitación de la termodinámica consiste en una *incapacidad para predecir la velocidad de los procesos*; para predecir la velocidad de una reacción química tenemos que precisar sus características cinéticas, en las que intervienen las enzimas. La termodinámica nos permite obtener una amplia información de los fenómenos vitales, la más de las veces, suficiente para comprender el funcionamiento y significado fisiológico de los procesos bioquímicos.

Los sistemas biológicos tienen ciertas características muy especiales, que hacen un poco complicado entenderlos desde el punto de vista termodinámico; veámos:

Una reacción en un tubo de ensayo ocurre cuando los elementos que participan en ella, colisionan entre sí y la probabilidad de ello depende de la velocidad de reacción. Mientras mayor sea la velocidad que existe entre los elementos de la reacción, habrá mayores posibilidades de colisión, y la misma será más efectiva. Esto es válido en sistemas donde hay cierta libertad de movimiento (sistemas líquidos o gaseosos), y con reactantes de tamaño molecular muy reducido. Pero nuestros sistemas fisiológicos son más complejos. Los reactivos orgánicos son macromoléculas con reducida libertad de movimiento, y además, dentro de estas moléculas existen sitios catalíticos o de reacción que son porciones muy especializadas de ellas. Así por ejemplo: considérese que para que una reacción ocurra, en el sistema esquematizado abajo, el sitio (A) debe coincidir con el (B):



A medida que la molécula sea de mayor tamaño (macromolécula), la probabilidad para que las dos moléculas se presenten y se encuentren en la orientación adecuada, será más complicada. Los sistemas biológicos para solventar tal inconveniente utilizan sistemas de membranas en el cual fijan diversas estructuras moleculares (enzimas, receptores, transportadores, etc.) con una orientación específica de forma que estén orientados de manera fija y precisa, lo cual haga funcionar en forma óptima y lógica al sistema.

Otra probable incompatibilidad en la aplicación de los principios termodinámicos clásicos a los seres vivos estriba en que, las reacciones biológicas se suceden en medios cuasi-cristalinos o fase gel. Los conceptos

termodinámicos se supone, son aplicados a medios fluídos; entonces hay una incompatibilidad, más no excluyente de la aplicación de los principios.

Por otro lado, los sistemas biológicos mantienen un equilibrio fluído, pero la termodinámica trata de equilibrios estáticos. En el equilibrio estático todas las reacciones espontáneas cesan; no hay producción de trabajo útil. En el equilibrio fluído, las reacciones espontáneas siempre se están dando con producción continua de trabajo útil.

Otra dificultad relativa se encuentra en que, las reacciones biológicas se llevan a cabo en el interior celular que son sistemas delimitados por membranas. Con relativa precisión se conoce la concentración de una sustancia dada en el interior de esos microespacios; se presume siempre que están en el orden micro o milimolar. La termodinámica clásica trabaja con sistemas en donde las concentraciones son elevadas en relación a la del interior celular; esa es otra limitación.

Existe otra importante limitante: la termodinámica clásica trabaja con concentraciones en el orden del mol, y en 1 mol existen $6,02 \times 10^{23}$ moléculas (número de Avogadro). Consideren que si tomamos 1 mol por ejemplo, de ADN con un peso molecular aproximado de un millón de dalton, ello implicaría tener una masa de 1 tonelada, algo no manejable por nosotros. El biólogo trabaja sólo con 1,2,3 moléculas de ADN o con porciones de él.

Una última limitación estriba en que, la termodinámica trata de sistemas que reaccionan a una velocidad relativamente lenta; en cambio, el bioquímico trata con sistemas que progresan a velocidades muy elevadas.

Parte II: Contenido: Concepto de Temperatura. Significado biofísico. Principios termométricos aplicados a la medicina. Regulación de la temperatura corporal.

La *temperatura* la podemos definir termodinámicamente como *una medida de la energía cinética de traslación de las moléculas*. La velocidad de las reacciones químicas que suceden dentro de los procesos biológicos, sólo pueden ocurrir dentro de un margen de temperatura muy limitado. Así por ejemplo, las enzimas realizan su actividad en un margen de temperatura muy estrecho, rango por debajo del cual detienen su actividad, y por encima llegan a desnaturalizarse en forma irreversible.

Por ello, los organismos superiores hemos desarrollado sistemas de termorregulación capaces de mantener nuestra temperatura constante a lo largo de la vida, y son denominados *homeotermos*. Las aves también se incluyen dentro de esta clasificación. Generalmente, la temperatura en estos organismos se mantienen invariables a lo largo de la vida, aun cuando la temperatura ambiental oscile entre 0 y 50°C.

Otros organismos en cambio, no disponen de los mencionados centros termorreguladores, por lo que su temperatura corporal sigue aproximadamente las variaciones de la temperatura del ambiente. Se incluyen aquí los peces, anfibios y réptiles; son denominados *poiquilotermos*. En ellos, su actividad fisiológica se retarda tanto cuando disminuye la temperatura del medio, e inclusive pueden llegar a “paralizar” la misma (*hibernación*).

La temperatura corporal va a depender del balance entre dos procesos cruciales: la producción de calor por las funciones que tienen lugar en el organismo, y la pérdida de calor hacia el entorno. El primer proceso constituye la *termogénesis*, mientras el segundo conforma los procesos de *termólisis*.

La temperatura la podemos medir mediante instrumentos llamados *termómetros*. Un termómetro constituye un sistema que puede llegar rápidamente al equilibrio con cualquier otro sistema con el que se ponga en contacto, y que está provisto de una escala sobre la que se desplaza un índice (por lo común, una columna de mercurio) cuando se altera el estado térmico de ese sistema llamado termómetro. De esta manera, al alcanzar el equilibrio térmico estos dos sistemas (el termómetro y el cuerpo analizado), luego de un breve tiempo tendrán la misma temperatura, es decir, la misma cantidad de energía térmica. Este es el principio fundamental de la termometría, y se le ha llamado curiosamente, el *Principio Cero de la Termodinámica*.

Ahora bien, cualquier propiedad de la materia que varíe continua, sensible y linealmente con el estado térmico de un sistema puede ser usado como un índice, un indicador en un termómetro y se denomina *Propiedad Termométrica*. Se han descrito varias propiedades termométricas y que para fines médicos y biológicos, describiremos tres de interés:

- a) Los termómetros de líquido en receptáculos de vidrio, en los cuales la propiedad termométrica es el volumen de un líquido respecto al recipiente que lo contiene. Este es el caso del mercurio, que puede cambiar su volumen en forma uniforme con la temperatura.
- b) Los termómetros de resistencia, en los cuales la propiedad termométrica es la resistencia eléctrica de una pequeña bobina de hilo conductor.
- c) Los pares termoeléctricos, en los cuales la propiedad termométrica es el voltaje termoeléctrico producido en la soldadura de dos hilos distintos. Al poner en

contacto dos metales, al darse un cambio de temperatura se induce una corriente eléctrica entre los dos metales, y la intensidad de esa corriente es proporcional al cambio de temperatura.

Existe una cuarta propiedad termométrica de interés en biofísica, que es la presión de un gas ideal. Los cambios de volumen de un gas ideal a temperatura constante, nos pueden indicar también sobre los cambios del estado térmico en un sistema. Los gases constituyen la mejor sustancia termométrica, pues su gran dilatabilidad hace despreciable el error que pueda condicionar la dilatación del recipiente que los contiene. La desventaja que presentan es que sus volúmenes dependen no sólo de la temperatura, sino de la presión que soportan, de ahí que hay que considerar las oscilaciones barométricas para corregir el error. En la práctica, lo que sucede es que se construye un termómetro utilizando un gas ideal, y luego se usa ese termómetro para calibrar otros termómetros contruídos usando otras propiedades termométricas.

Los termómetros contruídos con cualquiera de tales propiedades termométricas, sólo dan una medida comparativa de la temperatura, o sea, nos indican cuando una temperatura es mayor o menor que otra. Para hacerlos útiles desde el punto de vista cuantitativo, es necesario introducir una escala de temperaturas, y para ello se requiere de un patrón. Tal patrón ha de ser reproducible con precisión y esto ha requerido la especificación de un sistema. Tal sistema se ha convenido en ser aquel en el cual el agua pura existe a la vez como sólido (hielo), líquido (agua) y gaseoso (vapor). Este sistema se ha denominado *celdilla punto triple*, y la temperatura del sistema es la *temperatura del punto triple*. El producto de tal análisis es el *termógrama*.

Si se observa un bloque de hielo, se verá que el vapor de agua es emitido desde su superficie, que existe una capa de líquido sobre la superficie del bloque, y que el centro del mismo es sólido; a este sistema bajo esa condición se le asigna un valor de 273°K donde el kelvin (°K) es la unidad internacional estándar de temperatura termodinámica. Cualquier otra temperatura puede determinarse entonces únicamente como sigue; se deja que un termómetro de hidrógeno (gas ideal) de volumen constante llegue al equilibrio con la celdilla punto triple, y se lee la presión del hidrógeno (P_{tp}). Se deja entonces que el termómetro llegue al equilibrio con el sistema cuya temperatura se desea medir, y se obtiene una lectura (p). Se define la temperatura desconocida como:

$$T (^{\circ}\text{K}) = 273 (p / P_{tp})$$

Este procedimiento define de un modo preciso, la escala absoluta de temperaturas de los gases. La escala más conocida de temperaturas en la vida diaria se define a partir de la escala absoluta de gases por la relación dada:

$$(^{\circ}\text{C}) = T - 273$$

donde se aprecia que la temperatura se expresa ahora en °C (grados celsius).

De esta forma, se han adoptado convencionalmente dos temperaturas de referencia o puntos fijos, precisos y reproducibles, los cuales son:

- La *temperatura de fusión del agua* en estado sólido o punto de hielo, y
- La *temperatura de ebullición del agua* o punto de vapor.

El punto de hielo corresponde a la temperatura de equilibrio entre el hielo fundente y el agua líquida a la presión de 1 atmósfera (atm). Su valor 0°C.

El punto de vapor corresponde a la temperatura de equilibrio del agua en ebullición y vapor de agua a la presión de 1 atm. Su valor 100°C.

Equivalencias de temperaturas:

	°C	°F	°K
Punto de vapor	100	212	373
Punto de hielo	0	32	273
Cero absoluto	-273	-460	0

Algunas Transformaciones de Interés:

$$^{\circ}\text{C en } ^{\circ}\text{F} = 9/5 (^{\circ}\text{C}) + 32$$

$$^{\circ}\text{F en } ^{\circ}\text{C} = 5/9 (^{\circ}\text{F}) - 32$$

$$^{\circ}\text{C en } ^{\circ}\text{K} = ^{\circ}\text{C} + 273$$

El termómetro clínico:

El termómetro clínico de mercurio en recipiente o cilindro de vidrio, sólo se gradúa en un pequeño intervalo entre los 35°C y los 42°C, con intervalos de 0,1°C. A pesar de su sencillez, este económico instrumento debe considerarse como la ayuda científica más significativa que haya podido lograrse. Constituido por un depósito de mercurio en forma cilíndrica con su porción terminal en forma de un bulbo. Por el interior se prolonga desde el bulbo, un tubito capilar a través del cual

se puede desplazar el mercurio al dilatarse por el calor del cuerpo. Un estrechamiento del tubo capilar, situado en la porción superior del bulbo impide a la columna de mercurio volver al bulbo de nuevo. Para que el mercurio pueda volver al bulbo, hay que sacudir el termómetro varias veces, con el objeto de que por medio de la fuerza centrífuga vuelva al bulbo. Esto da tiempo para leer el registro.

El termómetro debe ser colocado debajo del brazo del paciente, en el hueco axilar, o debajo de la lengua o introducido a nivel rectal; el mismo debe permanecer unos 2-3 minutos en el sitio para alcanzar el equilibrio. Hoy día se disponen de termómetros clínicos digitalizados (electrónicos) que tienen la ventaja de la respuesta instantánea.

La Temperatura Corporal:

a) Temperaturas Cutánea y Profunda del Organismo:

La temperatura corporal normal oscila alrededor de los 37°C. Hay que precisar sin embargo, más ésta afirmación. No todas las regiones del cuerpo tienen esa temperatura. La piel de la frente de una persona por ejemplo, en un ambiente de 21°C puede registrar una temperatura entre 30°C y 32°C, dependiendo también del estado de actividad de esa persona. En general, la temperatura de la piel oscila entre 27° y 34°C, y es diferente en las distintas regiones del cuerpo. Para ciertos cálculos es útil emplear la llamada *temperatura media de la piel*, que es el promedio de la temperatura cutánea de las distintas regiones. Tal promedio se obtiene sumando los productos de la temperatura de cada región por su área y luego dividiendo por el área total.

A cierta profundidad a partir de la superficie de la piel, la temperatura se hace uniforme y recibe el nombre de *temperatura profunda*. A ella nos referimos cuando decimos que nuestra temperatura es de 37°C. La rectal es una buena referencia de tal temperatura corporal (2).

b) El gradiente Interno de Temperatura:

Entre la temperatura superficial de la piel y la temperatura profunda del organismo, hay una diferencia de unos 5° a 10°C debiendo decrecer de la profundidad a la superficie con un perfil determinado, estableciéndose así un gradiente de temperatura. A consecuencia de ello habrá circulación de calor por conducción desde las partes profundas hacia la superficie. Hay que recordar también que, el calor no se propaga sólo por conducción sino también por convección a consecuencia de la circulación de la sangre. La mayor caída de temperatura se produce en los 3 cm cercanos a la piel (2).

c) Fenómeno de Intercambio a Contracorriente:

Producción de calor = Pérdida de calor

o lo que es igual:

Termogénesis = Termólisis

En la *termogénesis* se puede mencionar que el hombre produce alrededor de 70 kcal/hora. En una persona desnuda, esto se cumple si la temperatura exterior es de más de 32°C. Por arriba y por debajo de esa temperatura aumenta la producción de calor por el organismo. A más de 32°C la producción de calor es mayor debido que al subir la temperatura, aumenta la velocidad de todos los procesos fisiológicos. En el hombre las dos únicas respuestas que aumentan la producción de calor son (2):

- .-El aumento de la actividad muscular.
- .-El escalofrío.

Durante el proceso de *termólisis*, ocurre pérdida de calor gracias a cinco mecanismos físicos:

- .-Conducción
- .-Convección
- .-Radiación
- .-Evaporación
- .-Por heces y orina.

Por conducción: cuando el calor pasa de un cuerpo a otro en contacto con él; ejemplo: sentarse sobre el suelo frío. Es la manera menos importante de perder calor comparada a las dos siguientes formas.

Por convección: aquí, el calor es transportado por el desplazamiento de materia. Se produce cuando el aire en contacto con el cuerpo se halla en movimiento, de modo que se calienta junto a la piel. El aire caliente asciende y es reemplazado por aire fresco. Este mecanismo es responsable de aproximadamente un 15 % de la pérdida total de calor.

Por radiación: es el mecanismo fundamental, y representa algo más del 50 % de la pérdida total de calor en el hombre. No toda la superficie corporal pierde calor por radiación. El "enroscamiento" cuando hace frío externo disminuye la pérdida de calor por esta vía.

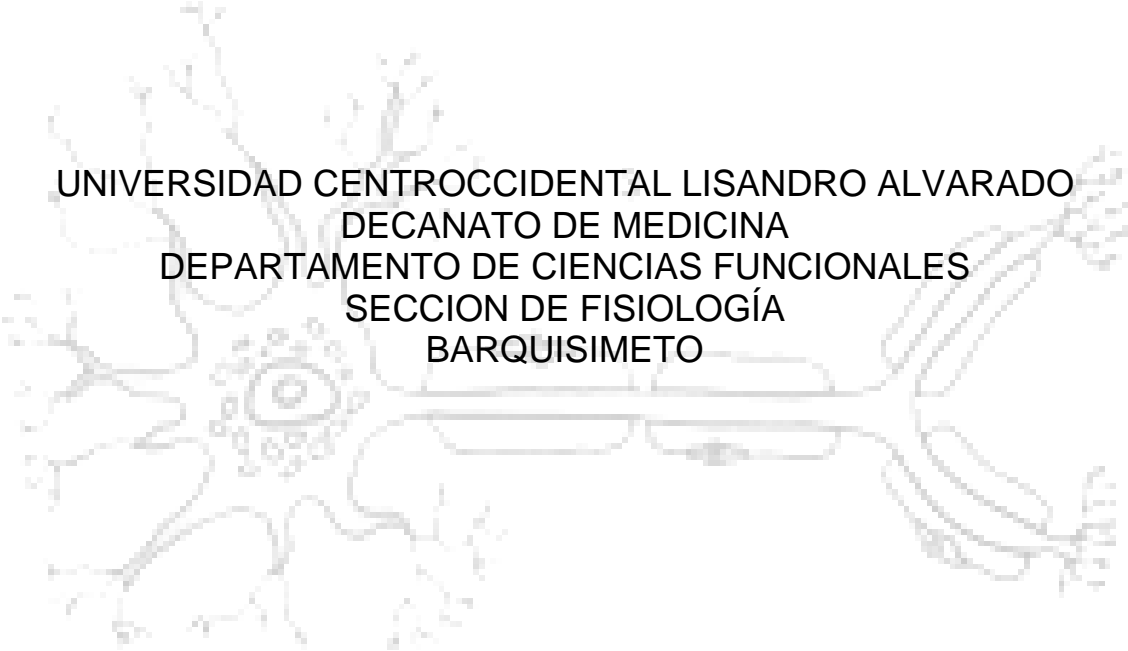
Por evaporación del agua: representa un 30 % de la pérdida total de calor. Hay dos subtipos de pérdidas por esta vía: por pérdidas insensibles a través de la piel y tracto respiratorio (50 ml/hora en el hombre), y por sudoración y jadeo. Cuando aumenta la temperatura externa en forma exagerada, las pérdidas por conducción, radiación y convección se reducen hasta ya no perder calor por esas vías. En estas condiciones la única forma de perder calor es por evaporación.

Por orina y heces: representando menos del 1 % de las pérdidas totales de calor.

Ahora bien, nuestro sistema de regulación está constituido por un conjunto de receptores que detectan la temperatura, y por diversas estructuras que favorecen o disminuyen la pérdida o producción de calor. Los receptores de temperatura se hallan distribuidos en la piel y en el sistema nervioso central. Los primeros registran la temperatura cutánea y los segundos la profunda. Cuando por ejemplo, el organismo se encuentra en un ambiente de elevada temperatura (35-40°C), éste responde fundamentalmente aumentando la circulación periférica por vasodilatación. Así, la sangre transmite calor a la superficie por convección, la piel se calienta e irradia más energía, aumenta la sudoración y se pierde calor por evaporación.

El organismo por el contrario, se protege del frío por medio del temblor y de la vasoconstricción periférica, lo que disminuye la transmisión de calor hacia la piel, así como por la disminución de la superficie corporal expuesta. En el hombre, éste último recurso lo emplea ayudado de ropas gruesas y abrigos; éstas rodean al cuerpo de una capa o manto de aire (espacio entre el cuerpo y los vestidos) que no es intercambiable con facilidad y que es mal conductor del calor. En el caso de otros animales, el papel del abrigo lo desempeñan los pelos y plumas. El frío produce erección de estos anexos de la piel, de modo que aumentan el espesor del aire atrapado entre ellas (que es mal conductor del calor) (2).

Como se ha podido apreciar, la forma más evidente de regular físicamente las pérdidas de calor es conseguir un elevado grado de aislamiento térmico entre el cuerpo y el aire que lo rodea. Para este fin, disponemos aparte de los mecanismos citados la grasa dispuesta debajo de nuestra piel (tejido subcutáneo), que posee una muy baja conductividad térmica (4). Además, fluye muy poca sangre a través del tejido adiposo, por lo tanto, el efecto sobre la temperatura de la sangre se hace mínimo.



UNIVERSIDAD CENTROCCIDENTAL LISANDRO ALVARADO
DECANATO DE MEDICINA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FUNCIONALES
SECCION DE FISIOLÓGÍA
BARQUISIMETO

FUERZAS DERIVADAS DEL POTENCIAL QUIMICO

Elaborado por Prof. Gregorio Tiskow D. Ph.D

Barquisimeto, Enero de 2006

FUERZAS DERIVADAS DEL POTENCIAL QUIMICO

Parte I: Contenido: El Potencial Químico.

¿Qué podemos entender por potencial químico?

La materia como sabemos ya, es utilizada por los sistemas biológicos para producir estructuras, o almacenar energía e intercambiarla. No hay a veces, una relación clara y una definición precisa entre lo que es estructura y lo que es almacenamiento de energía, puesto que una sustancia dada puede en un momento dado, estar formando parte de una estructura, pero a su vez, puede estar almacenando cierta cantidad de energía. Ejemplo: la glucosa, cuando forma parte por ejemplo de la estructura de la célula, y a su vez puede ser utilizada para producir energía. En todo caso, el organismo puede hacer uso de tales sustancias dependiendo de sus necesidades para obtener energía, y esa energía ser utilizada para producir trabajo biológico.

Entonces, un compuesto determinado puede en un momento preciso ser fuente de energía, y el potencial químico se refiere al *uso que se le puede dar a la materia desde el punto de vista de la obtención de trabajo*. En otras palabras, el potencial químico mide la capacidad de una sustancia para producir un trabajo útil, efectuándose en ella un cambio físico o un cambio químico.

Una solución muy concentrada de una sustancia puede ser capaz de ejercer mayor trabajo que una solución de menor concentración, de la misma forma que un gas a elevada presión puede hacer más trabajo que un gas a baja presión.

Hemos mencionado que, para que ese potencial químico almacenado en tales sustancias se haga manifiesto tiene que producirse dentro de la materia un *cambio* y ese cambio puede ejecutarse, o bien en la estructura de la materia, el cual lo denominamos como *cambio químico*, o bien, un cambio de su estado físico y que lo denominamos *cambio físico*.

Cuando un compuesto o una sustancia al realizar trabajo produce cambios en su estructura, se dice que el potencial químico de ella se asocia a un cambio químico de la materia. Pero, cambio químico de la materia implica que la estructura de la misma cambia, o sea, se romperán y se formarán nuevos enlaces químicos, se transformarán ciertas propiedades de la materia. Un cambio químico implica que materia de una clase se transforma en materia de otra clase. La cantidad de energía que se puede obtener por ejemplo en un proceso, cuando una materia de tipo (A) se convierte en otra de tipo (B), dependerá de la estructura de la materia, y del tipo de procedimiento que tenga lugar durante ese cambio en las propiedades químicas de la materia.

En Bioquímica y en Biofísica llama la atención un tipo de compuesto que tiene como característica la facilidad de transferir energía a otros compuestos: son los denominados Compuestos de Alta Energía. Pero este término no es muy adecuado, ya que hay compuestos de alto contenido energético, pero se diferencian de las que nos interesan pues no tienen la facilidad de ceder esa energía acumulada; por ejemplo, los lípidos, las proteínas, glúcidos, que poseen un alto contenido energético, pero no la ceden con facilidad, como lo hacen esas sustancias de alta energía. Entonces, preferiremos usar el término de Compuestos de Alto Potencial de Transferencia de Energía.

Recordemos que, la energía se puede transferir, sea por transferencia de grupos químicos, o por transferencia de protones y electrones, éste último caso existiendo en los procesos Redox. En el primer caso, debe ocurrir acoplamiento de reacciones; una sustancia como la fosfocreatina puede participar con el ADP, transferirle el grupo fosfato y convertir el ADP en ATP, quedando la fosfocreatina convertida en creatina. El grupo químico transferido es el fosfato. Es decir, la fosfocreatina tiene una alta capacidad de transferir energía de una sustancia a otra, por intercambio de grupos químicos.

Otros ejemplos lo constituyen el fosfoenolpiruvato, nucleótidos trifosfato como el GTP, UTP, UDP, y otros compuestos como la Acetil-CoA y la succinil-CoA. Los detalle íntimos de estas reacciones son objeto de estudio de la bioquímica.

A los biofísicos interesan más los fenómenos en los cuales la estructura de la materia no cambia durante el proceso, y es el caso de la obtención de energía de la materia cuando se produce en ella un *cambio físico*. Cuando un compuesto dado realiza un trabajo, y su estructura permanece inalterada decimos que el potencial químico se asocia a un cambio físico de la materia. *El cambio físico de la*

materia se entiende por un cambio en algunas de las propiedades que definen el estado físico de la materia. Una de las propiedades más interesantes que caracterizan el estado físico de una solución es la concentración, y escogemos la forma de soluciones que es la forma en que se encuentra en su mayor parte la materia en los sistemas biológicos.

De esa forma, para lograr obtener energía y por ende, trabajo útil debemos tener un cambio de concentración en una solución. Un cambio de concentración en una solución implica un cambio del estado físico, la materia permaneciendo inalterada, manteniendo sus propiedades químicas intactas. El trabajo producido por cambios de concentraciones son muy frecuentes en los sistemas biológicos, y ellos dan lugar a fenómenos como los de la difusión pasiva, la ósmosis, permeabilidad y la presión osmótica.

Relación entre potencial químico y energía libre:

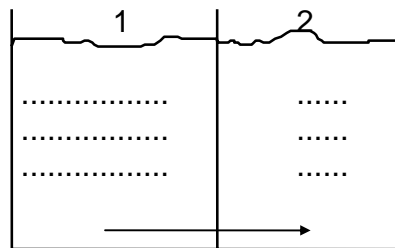
La energía libre (G) es un concepto útil para interpretar los equilibrios físicos y químicos. Un cambio de energía libre se calcula a partir de los cambios de energía interna, volumen y entropía que ocurren durante un proceso dado; recordemos que:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

Se consideran en general, los procesos que ocurren a temperatura y presión constantes.

La energía libre es un parámetro que se obtiene por cálculo; los cambios de entalpía (ΔH), iguales al calor absorbido en un cambio dado a presión constante, se obtienen a partir de mediciones calorimétricas experimentales; los cambios de entropía (ΔS) de los procesos suele estimarse a partir de entropías absolutas obtenidos de datos experimentales. En general, los cambios de energía libre (ΔG) no pueden medirse directamente a menos que se construya una celda electroquímica, y ΔG por lo tanto, se calcula mediante la ecuación señalada arriba.

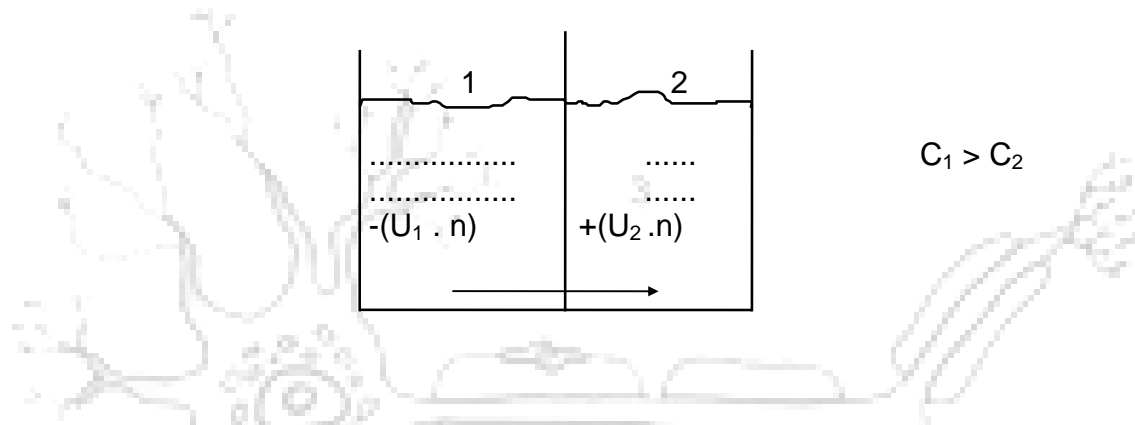
Consideremos ahora un sistema formado por dos compartimientos: 1 y 2, y entre ellos existiendo una diferencia de concentración, donde el lado (1) tiene mayor concentración de soluto que el lado (2); es obvio que la materia tenderá a desplazarse del compartimiento (1) hacia el compartimiento (2).



$$C_1 > C_2$$

Deducimos que debe existir una fuerza que actúa movilizand o soluto desde el compartimiento 1 hacia el lado 2. Ya habíamos mencionado que tal fuerza se asociaba al potencial químico de la materia, y ese potencial químico se asocia a un trabajo útil, y trabajo útil está relacionado íntimamente al concepto de energía libre.

Decimos así que, un cambio de energía libre durante un proceso como el descrito, es igual al cambio de una propiedad del sistema denominada potencial químico, y que se representa como (ΔU), multiplicado por la cantidad de materia transferida desde el compartimiento (1) hacia el compartimiento (2). Esa es la relación que existe entre potencial químico y energía libre: la capacidad que reside en ese sistema para realizar un trabajo útil debido a la existencia de esta diferencia de potencial químico.



Debemos de precisar que cada compartimiento tiene su propio valor de potencial químico. Como el compartimiento (1) está perdiendo materia, que se va desplazando hacia el compartimiento (2), se le asigna un valor negativo y recordemos que pérdida de materia significa disminución de la capacidad para realizar trabajo. El lado (2) está ganando materia, de ahí que su signo sea positivo, y esta ganancia de materia indica ganancia de energía libre, ganancia en la capacidad de realizar trabajo útil.

Así: $G_1 = -U_1 \cdot n$ y $G_2 = +U_2 \cdot n$

$$\Delta G = G_2 - G_1$$

$$\Delta G = (U_2 \cdot n) - (U_1 \cdot n)$$

$$\Delta G = (U_2 - U_1) \cdot n$$

$\Delta G = \Delta U \cdot n$

La anterior constituye la deducción matemática de la relación entre energía libre y potencial químico.

Considerese ahora que, si el potencial químico (U_1) del lado (1) es mayor que el potencial químico (U_2) del lado (2), entonces ello implica un ΔG menor a cero; decimos entonces que, la materia en este caso se va a movilizar del lado (1) hacia el lado (2):

$$\text{si } U_1 > U_2 \text{ ----> } \Delta G < 0$$

Ahora, si el potencial químico del lado (1) es igual al potencial químico del lado (2), ello implicará un $\Delta G = 0$, y no habrá movimiento de materia en ningún sentido, y el sistema entra en una fase de equilibrio:

$$U_1 = U_2 \text{ -----> } \Delta G = 0 \text{ (Equilibrio)}$$

Por último, si el potencial químico del lado (1) es menor que el potencial químico del lado (2), ello implicará un ΔG mayor a cero, y la materia se desplazará del lado (2) hacia el lado (1):

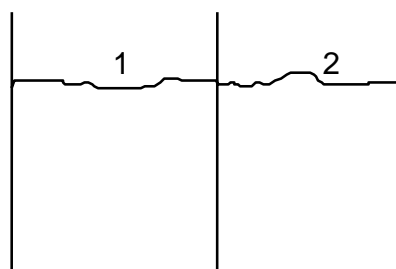
$$U_1 < U_2 \text{ -----> } \Delta G > 0$$

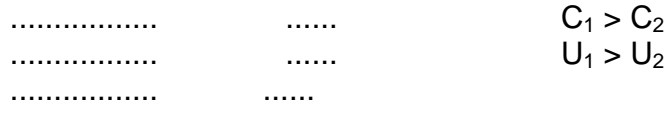
Termodinámicamente se ha descrito que, un proceso que cursa con un $\Delta G < 0$ será de naturaleza espontánea, mientras aquellos con un $\Delta G > 0$ será no espontáneo.

El ejemplo tradicional para ilustrar este concepto sucede cuando un soluto debe desplazarse en contra de un gradiente de concentración (es decir, con un potencial químico negativo); ello ocurrirá sólo si la reacción se acopla con una reacción exergónica, de potencial químico suficientemente elevado para "ayudar" a realizar el proceso. Esto es lo que ocurre en el proceso de transporte activo, cuando hay un transporte en contra de un gradiente de concentración, o sea, de un sitio de bajo potencial químico a otro de potencial químico elevado, y será activo porque requiere el uso de energía externa para ejecutar el proceso.

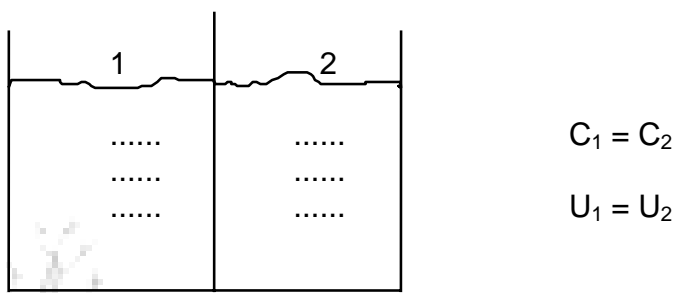
Relación entre Potencial Químico y Concentración de la solución:

Consideremos el siguiente sistema:





Fase Inicial (A)



Fase Final (B)

Si la membrana es permeable al soluto, entonces el sistema evolucionará en el sentido de que la concentración en (1) se iguala a la concentración en (2), y los potenciales químicos tenderán a igualarse. Se dice entonces que, el sistema ha alcanzado el equilibrio en esas condiciones.

Para que el proceso haya evolucionado de esa manera, debió de existir una diferencia de concentración (ΔC), diferencia que será igual a la concentración en (1) en el estado final (B), menos la concentración en el compartimiento (1) en el estado inicial (A); así, la ΔC en el lado (1) será:

$$\Delta C_1 = C_{1B} - C_{1A} < 0$$

Esta ΔC alcanzará un valor negativo al alcanzar el equilibrio.

En el lado (2) ocurre algo semejante:

$$\Delta C_2 = C_{2B} - C_{2A} > 0$$

En este caso, ΔC tendrá un valor positivo luego de alcanzado el equilibrio.

Una vez alcanzado el equilibrio obtendremos lo siguiente:

$$(C_1B - C_1A) + (C_2B - C_2A) = 0$$

$$\Delta C_1 + \Delta C_2 = 0$$

$$\Delta C_2 = -\Delta C_1$$

Como ejercicio y para visualizar mejor lo planteado, hagáense operaciones matemáticas con valores reales y observe los resultados; analice los mismos.

En cualquier caso, observaremos que el cambio de concentración de un compartimiento, es compensado exactamente por el cambio de concentración del otro compartimiento, pero con signo contrario, de forma que la suma resultará en un valor igual a cero. Esto es lo que se cumple para la relación de concentraciones.

Ahora bien, para el potencial químico existirá una relación casi similar:

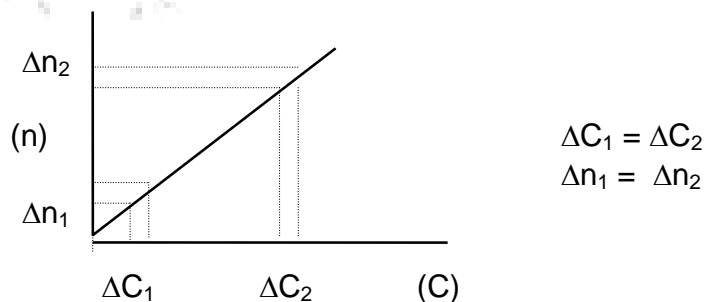
$$\text{En } C_1: \quad U_1 = U_1(B) - U_1(A) < 0$$

$$\text{En } C_2: \quad U_2 = U_2(B) - U_1(A) > 0$$

El cambio de potencial químico de un compartimiento no va a ser balanceado exactamente por el cambio de potencial químico del otro compartimiento. Por lo tanto:

$$\Delta U_2 + \Delta U_1 \neq 0$$

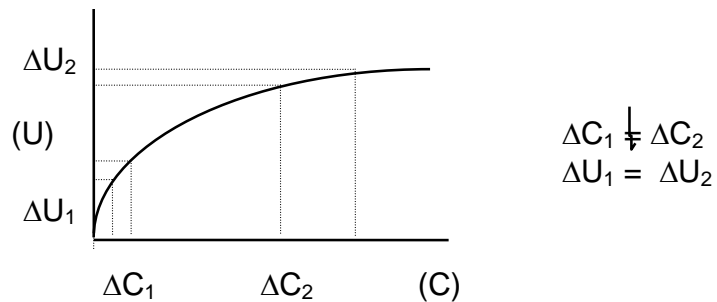
Ello se debe a que el potencial químico mantiene respecto a la concentración, una relación distinta a la que mantiene la concentración respecto a la cantidad de soluto presente. Gráficamente, la relación anterior puede ser representada como:



Al graficar la ΔC de una solución respecto a la cantidad de materia (n), manteniendo el volumen constante, se encuentra que a mayor cantidad de materia, la concentración de la solución varía proporcionalmente; ese cambio produce una línea recta que tiene una pendiente, y que va a representar el

volumen de la solución, y que como se observa permanece constante durante el proceso.

Pero, al graficar el comportamiento del potencial químico respecto a la concentración, nos encontramos que la relación de este tipo nos va a dar una curva de tipo exponencial, hiperbólica:



La relación matemática que mantiene la concentración respecto al potencial químico, viene dada por una relación logaritmica del tipo:

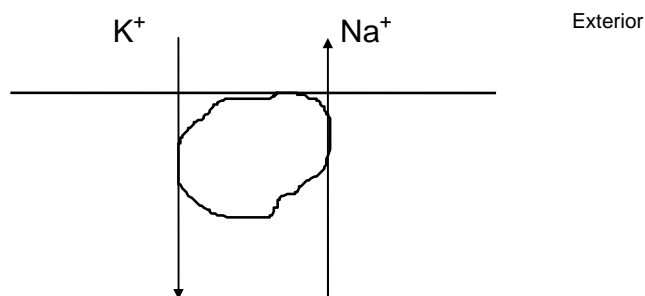
$$U = 2,3 R.T. \text{ Log } C \quad \text{de donde:}$$

$$U = R. T. \frac{\Delta C}{C}$$

Esta última ecuación permite determinar el valor del potencial químico en cualquier punto para una concentración dada de soluto.

Acoplamiento de Procesos Químicos y Físicos:

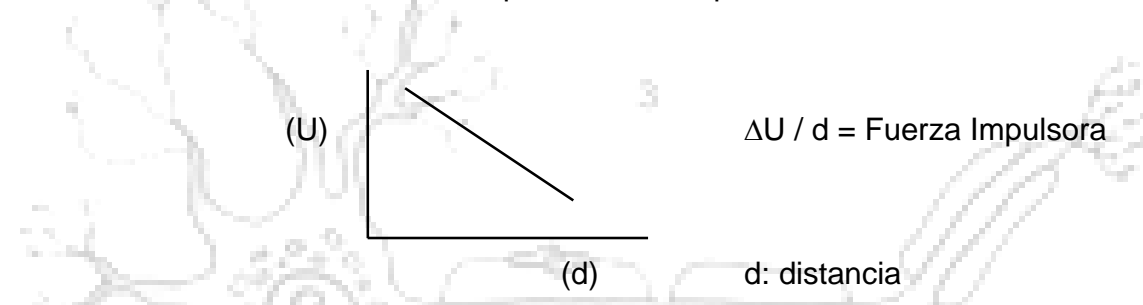
Puesto que, cambios físicos se asocian a cambios químicos, es posible por este principio acoplar un cambio químico con uno de tipo físico, y poder utilizar la energía producto de la transformación de una sustancia dada, en concentrar o transportar sustancias entre dos compartimientos de un sistema, separados por una membrana. El transporte activo no es sino eso, la combinación de un proceso químico que suministra energía, con un proceso físico que implica el cambio de concentración (transferencia de sustancias en contra de un gradiente de concentración). Ejemplo, el transporte activo de sodio y potasio en la célula de mamíferos:





Deducción de la Fuerza Química a partir del Potencial Químico:

Vamos a tratar de analizar ciertos aspectos relacionados con el movimiento de sustancias entre dos compartimientos, debido a la presencia de una fuerza que va a depender de la diferencia de potencial químico establecido. Si tenemos dos compartimientos separados por una membrana, en el compartimiento donde exista mayor concentración de soluto va a existir un mayor potencial químico para realizar un trabajo biológico útil. En otras palabras, a mayor diferencia de concentración, mayor será el potencial químico de la solución, y mayor la capacidad para efectuar el trabajo referido. Así, ya podemos hablar de *Gradiente de Potencial Químico* una relación que viene dada por:



Esa fuerza impulsora efectiva es la que realmente va a ser utilizada para convertirse en trabajo útil. Al término $(\Delta U / d)$ lo vamos a denominar gradiente de potencial químico, y a (F_i) : la Fuerza Impulsora Efectiva. A mayor gradiente de potencial químico, mayor será la fuerza impulsora; a mayor diferencia de concentración de soluto por ejemplo, mayor el gradiente de potencial químico.

Así como existe una fuerza impulsora, tendremos un factor que actúa en sentido contrario a la cual se desplaza la materia, que va a ser frenador del movimiento, y ese factor lo denominaremos Fuerza de Frenado o de Fricción; mientras mayor sea la fuerza de roce, mayor será la dificultad del movimiento.

Si denominamos a la relación : V / F_i (velocidad sobre fuerza impulsora), como el Coeficiente de Movilidad (ω), éste coeficiente de movilidad será igual al inverso de (K_f) , siendo este término el coeficiente de fricción:

$$\omega = 1 / K_f$$

Podemos hacer que:

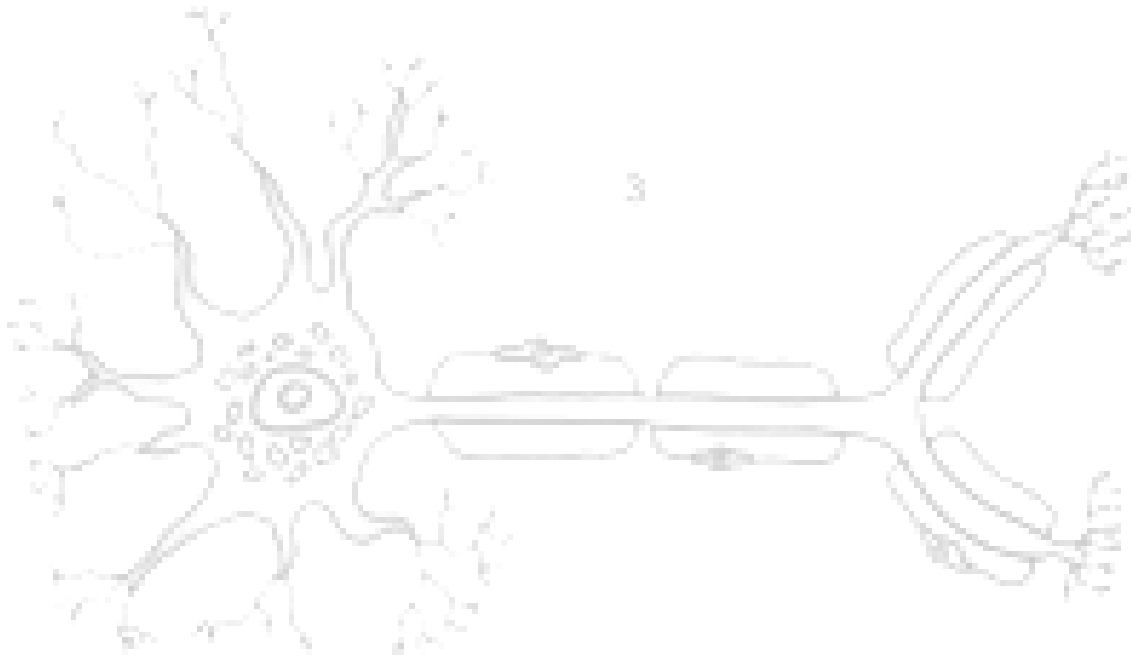
$$V / F_i = 1 / K_f \qquad \text{de donde:}$$

$$V = F_i \cdot 1 / K_f \quad \text{y donde } 1 / K_f = \omega$$

Por lo que:

$$V = F_i \cdot \omega$$

Así, la velocidad que alcanza realmente una partícula vendrá dada por la fuerza impulsora, multiplicada por el coeficiente de movilidad. Se cumplirá entonces que, la partícula sólo se mueve si tiene una fuerza impulsora mayor que la frenadora; una vez que se vence la fuerza frenadora y la impulsora tiende a hacerse igual a la frenadora, la partícula se moverá a velocidad constante hasta alcanzar el otro extremo del sistema.



UNIVERSIDAD CENTROCCIDENTAL LISANDRO ALVARADO
DECANATO DE MEDICINA
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS FUNCIONALES
SECCION DE FISIOLÓGÍA
BARQUISIMETO



FUERZAS QUÍMICAS QUE INTERVIENEN EN LOS
PROCESOS DE DIFUSIÓN

Elaborado por Prof. Gregorio Tiskow D. Ph.D

Barquisimeto, Enero de 2006

FUERZAS QUÍMICAS QUE INTERVIENEN EN LOS PROCESOS DE DIFUSIÓN

Parte I: Contenido: Factores que determinan el movimiento de partículas en un medio líquido: Conceptos de Flujo y Difusión.

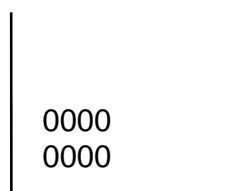
Recordemos que en una solución en la cual existe un soluto en estado de equilibrio, las moléculas del mismo se hallarán disueltas uniformemente por todo el sistema; la concentración de la solución en este caso, será la misma en todos los puntos del sistema. Ahora, si depositamos un soluto en estado sólido como NaCl en un recipiente con un solvente como el agua, a medida que el soluto se disuelve se ira distribuyendo gradualmente por la solución, de modo que, al principio del proceso la concentración es mayor en las cercanías de la fase sólida y va ir disminuyendo hacia arriba. A medida que transcurre el tiempo el soluto se va desplazando de las zonas de mayor concentración a las de menor concentración, para que así la concentración de la solución se hace uniforme. Este proceso recibe el nombre de *difusión*, y se debe a la agitación térmica de las moléculas, de forma que al aumentar la temperatura debe acelerarse el movimiento de las mismas.

Difusión es entonces, la tendencia del soluto (o del solvente) a ocupar cualquier posición posible dentro del sistema, o lo que es lo mismo, la tendencia que tiene el soluto para desplazarse e igualar la concentración en cualquier punto del sistema.

Del enunciado anterior e imaginando una parte de ese sistema, y si cuantificáramos la cantidad de partículas que se están moviendo en un sentido dado, podemos deducir el concepto de *flujo*. El flujo va a determinar la cantidad de partículas que se movilizan en una determinada dirección, expresada en moles de soluto que atraviesan la unidad de sección en la unidad de tiempo.

Parte II: Contenido: Dedución del concepto de flujo a partir de la Ley de Fick.

Considérese el siguiente sistema:



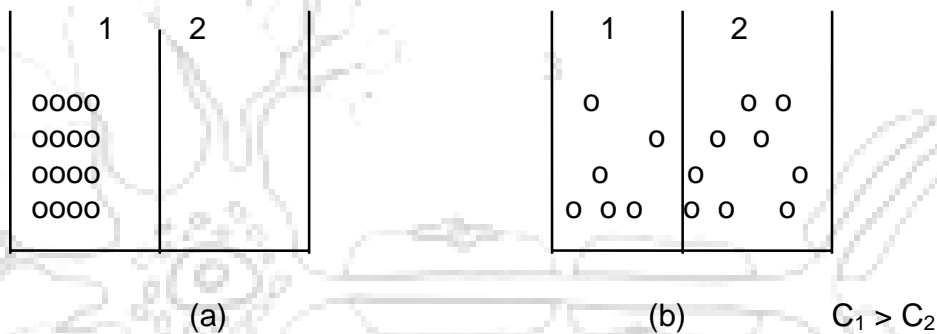
(a)

(b)

En un sistema como el anterior, tenemos un estado inicial (a) en donde todas las moléculas de la sustancia están confinadas en una porción del mismo; en el estado final (b), en equilibrio después que ha ocurrido el proceso de distribución al azar de las moléculas de soluto, las mismas se hallarán distribuídas por todo el volumen del sistema que los contiene.

No debemos olvidar que además del movimiento de partículas de soluto, hay movimiento de moléculas de solvente en la solución; el agua como solvente, se desplaza también para ocupar los sitios que ocupaban anteriormente las moléculas de soluto. Debe también quedar claro que, la cantidad de partículas que se movilizan en un sentido determinado, es *proporcional* a la concentración, o sea, a la cantidad de partículas por una unidad de volumen. A medida que se aumente la concentración, asimismo, aumentará el flujo en forma proporcional.

Consideremos ahora el siguiente sistema:



Estamos considerando un sistema con dos compartimientos separados cada uno por una interfase o membrana permeable al soluto. La concentración es mayor en el compartimiento 1 que en el 2 en el estado inicial (a). Las moléculas de soluto en el lado (1) comenzarán a moverse libremente y al azar, chocando con la barrera continuamente. En un momento dado, un número de moléculas de soluto, empezarán a atravesar la barrera o membrana. La diferencia de concentración (ΔC) entre los dos compartimientos, hará que en el sistema (a) ocurra un movimiento neto de partículas del lado de mayor concentración al lado de menor concentración, es decir, del lado (1) hacia el lado (2).

Nótese que, utilizamos el término concentración de soluto donde debería utilizarse actividad. El concepto de actividad toma en cuenta las interacciones que ocurren entre las moléculas de un soluto, y que reduce su concentración real o efectiva. A bajas concentraciones éstas interacciones se vuelven de poca importancia, y la actividad de un soluto refleja su concentración. Para muchas situaciones biológicas, los dos conceptos están muy relacionados por lo que ignoramos su diferencia.

El movimiento de partículas del lado (1) al lado (2), será proporcional a la concentración que existe en el compartimiento (1) multiplicado por el *coeficiente de difusión* de ese soluto. Pero, a medida que la concentración de soluto se hace mayor en el lado (2), ello va a degenerar en un flujo inverso, que vendrá dado por la concentración de soluto en el compartimiento (2) por el coeficiente de difusión de tal soluto. Si designamos flujo por el termino (j) queda que :

$$j_{1-2} = K_d (C_1) \quad \text{y} \quad j_{2-1} = K_d (C_2)$$

Finalmente podemos derivar el flujo neto como:

$$j_{\text{neto}} = (j_{2-1}) - (j_{1-2}) = K_d (C_2) - K_d (C_1) \quad \text{de donde:}$$

$$j_{\text{neto}} = K_d (C_2 - C_1) \quad \text{finalmente:}$$

$j_{\text{neto}} = K_d (\Delta C)$

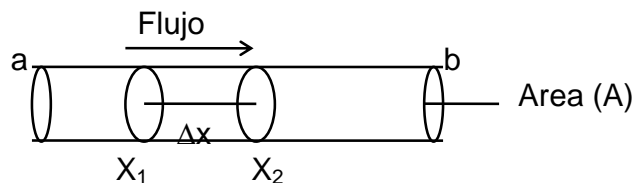
Esta cantidad de flujo neto expresa la cantidad de partículas que se desplaza del lado (1) hacia el lado (2) del sistema; la K_d será igual en ambos casos porque es una constante que depende de las características del soluto o del solvente.

En el primer sistema representado, el flujo neto es igual a cero. Pero en el segundo sistema, y debido a esa diferencia de concentración, el flujo neto adquiere un valor distinto de cero. Cuando el sistema adquiera la condición de equilibrio, las concentraciones se igualan entre los dos compartimientos, y ahí se detiene el flujo neto de soluto. Como deducción lógica podemos señalar que para que exista un flujo neto entre dos puntos de un sistema es necesario mantener una diferencia de concentración. Entonces, ese flujo desordenado, al azar, observado en el primer esquema se convierte en flujo direccional, debido a esa diferencia de concentración, y es el flujo neto.

¿De qué otros factores va a depender el flujo neto?

¿Con qué factores lo podemos cuantificar?

Supongamos un cilindro con las siguientes características:



Tenemos que:

$$\Delta x = X_2 - X_1 \quad \text{y} \quad V = \Delta x \cdot A \quad \text{donde } V: \text{ volumen}$$

El cilindro mantiene una diferencia de concentración (ΔC) entre los extremos a y b. Si procedemos a cuantificar la cantidad de partículas en ese pequeño volumen trazado, se puede expresar la concentración (C); recordando que concentración expresa el número de moles de partículas contenidas en un volumen determinado.

Queda así que:

$$C = \frac{n}{\Delta x \cdot A} \quad \frac{n}{V}$$

Ahora bien, el flujo va a depender también de la velocidad con que se mueven tales partículas, y velocidad (V) es:

$$V = \frac{\Delta x}{t}$$

Por supuesto que, la cantidad de partículas con movimiento tendrán una velocidad dependiente del tiempo. Así, la cantidad de materia que se está moviendo en un momento dado será proporcional a la concentración, a la velocidad, al área de sección que se está considerando, y al tiempo; por lo que integrando queda que:

$$n = C \cdot V \cdot A$$

Y ya que flujo viene expresado en número de moles de soluto por segundo, podemos hacer:

$$j = C \cdot V \cdot A$$

Habíamos mencionado que, la velocidad que adquiere una partícula al moverse en el seno de un líquido, era igual a el coeficiente de movilidad multiplicado por la fuerza impulsora:

$$V = F_i \cdot \omega$$

La fuerza impulsora (F_i) es igual a la diferencia de potencial químico (ΔU) entre dos puntos del sistema, por la distancia:

$$F_i = \frac{\Delta U}{d}$$

Y ya que:

$$\Delta U = R \cdot T \cdot \Delta C / C$$

al sustituir factores:

$$F_i = \frac{\Delta U}{d} = \frac{R \cdot T \cdot \Delta C}{d \cdot C}$$

Si recordamos que :

$$V = F_i \cdot \omega$$

$$V = \frac{R \cdot T \cdot \Delta C \cdot \omega}{d \cdot C}$$

Habíamos establecido que :

$$j = C \cdot V \cdot A$$

entonces, sustituyendo:

$$j = C \cdot \frac{R \cdot T \cdot \Delta C \cdot \omega}{d \cdot C} \cdot A$$

$$J = \frac{R \cdot T \cdot \Delta C \cdot \omega \cdot A}{d}$$

El termino $\Delta C/d$ es lo que habíamos denominado gradiente de concentración, que nos indica el tipo de fuerza química que está participando en la movilización del soluto. Mientras mayor sea la diferencia de concentración (ΔC) y menor sea la distancia entre dos puntos del gradiente, éste último se hace mayor, así el gradiente adquiere mayor valor y ello implica mayor movilidad de las partículas de soluto entre dos puntos del sistema.

En la formula definida, R es la constante de los gases y T es la temperatura que generalmente adquiere valor constante, y ya que ω es el coeficiente de movilidad, por lo que a estos tres terminos se les puede agrupar en uno sólo, que en lo sucesivo lo denominaremos *coeficiente de difusión* (K_d):

$$Kd = \omega \cdot R \cdot T$$

Su expresión viene dada en unidades de cm^2 / seg .

Entonces, la formula de flujo quedará escrita como:

$$j = Kd \cdot A \cdot \Delta C / d$$

Esta se convierte en la expresión matemática de la Ley de Fick que describe el flujo neto entre dos puntos de un sistema, cuando entre ellos existe una diferencia de concentración.

Recordando que el coeficiente de fricción está inversamente relacionado con la movilidad queda que:

$\omega = 1/Kf$
 y $Kf = 6 \pi \cdot \eta \cdot r$

donde: η : viscosidad del medio
 r : radio de la partícula o soluto

En este caso, lo que se afirma es válido para partículas esféricas, y no para partículas filamentosas o de otra naturaleza. De forma que:

$$\omega = \frac{1}{Kf} = \frac{1}{6 \pi \cdot \eta \cdot r}$$

Por lo tanto, la constante de difusión (Kd) queda como:

$$Kd = \omega \cdot R \cdot T \qquad Kd = \frac{R \cdot T}{6 \cdot \pi \cdot \eta \cdot r}$$

Aquí podemos mencionar que, la movilidad va a depender de un factor que va implícito en la partícula del soluto, y de otro que depende del solvente; el factor que depende del solvente es la viscosidad (η), y el factor que depende del soluto o partícula es el radio de la misma, que a su vez refleja el tamaño de la partícula. Así, partículas de radio mayor tendrán menor velocidad que las de menor radio.

Como ejemplo veamos lo siguiente:

Tabla

Coefficientes de difusión (Kd) de algunas sustancias y moléculas orgánicas

<u>Sustancia</u>	<u>Peso molecular</u>	<u>Kd (x10⁻⁵) (cm²/seg)</u>
Agua	18	2,1
Urea	60	1,2
Glucosa	180	0,6
Insulina	12.000	0,15
Mioglobina	17.500	0,11
Hemoglobina	68.000	0,063

A mayor masa molecular de la partícula del soluto, menor será la Kd, y por lo tanto, menor será la cantidad de flujo (j). Los valores típicos de Kd para las moléculas de interés biológico que difunden a través del agua, a temperatura ambiente, oscilan entre 1 y 100 x ⁻¹¹ m²/seg.

Difusión y algunos ejemplos de órganos comprometidos con este proceso:

En nuestro organismo ocurren constantemente fenómenos en donde está involucrado el proceso de difusión, como en el caso del intercambio de nutrientes a nivel de líquidos intersticiales, en el intercambio de oxígeno a nivel de alveolos pulmonares con la sangre, en el movimiento de iones a través de la membrana celular, entre otros.

Analicemos el caso de la difusión del oxígeno y del CO₂ a nivel de los alvéolos pulmonares:

./Para que los gases difundan a través de una barrera determinada, tienen que disolverse en esa barrera o membrana, de forma tal que la barrera en este caso, la barrera alvéolo-capilar se comportará como el medio solvente. Por supuesto, aquí vamos a introducir un nuevo factor, el *coeficiente de solubilidad de un gas* que no refleja la cantidad de gas que se disuelve en un mililitro de solvente, a la presión de 1 atmósfera y a una temperatura dada.

Este coeficiente aumenta con la presión parcial del gas y es modificado también por la presión atmosférica. Este concepto de presión parcial de un gas, es casi equivalente al de concentración de soluto de una solución. La presión parcial de un gas en una solución, es la presión que tendría dicho gas si se encontrase sólo, ocupando el volumen total de la solución.

En vista de ello, la fórmula que representa la Ley de Fick de la difusión:

$$j = Kd. A. \Delta C/d$$

se convierte en:

$$j = Kd. A. \Delta p/d \quad \text{pp: presión parcial}$$

Los pulmones normalmente poseen un número aproximado de unos 300 millones de alvéolos, y ello implica un área de unos 60 m^2 , o sea, varias veces la superficie corporal, y de este hecho es que depende que el proceso difusional a ese nivel sea tan eficiente. El ritmo de difusión a través de las paredes alveolares es proporcional a la diferencia de presión, y esto explica por qué es tan difícil respirar a grandes alturas.

Ahora bien, en el funcionamiento normal de una persona, con una actividad física normal, no todos los alvéolos están abiertos, funcionando a plenitud, sino por el contrario, se encuentran colapsados. Así que, la difusión de gases que se pueda producir en reposo dependerá de la participación de una parte del área total alveolar disponible.

Esto último es una ventaja para el organismo, ya que permite modificar la cantidad de flujo, modificando esa área y facilitando al organismo sometido a una elevada actividad física, suplir los requerimientos de oxígeno, aumentando el área activa de intercambio difusivo. En el ejercicio el individuo respira con mayor rapidez y también hay una modificación de la circulación sanguínea a nivel de los vasos que rodean a cada alvéolo. Este rápido recambio de oxígeno a nivel alveolar, y el aumento del riego sanguíneo a nivel de los vasos trae como consecuencia el mantenimiento del gradiente adecuado para que el oxígeno fluya con facilidad.

Cuando un sujeto posee una insuficiencia respiratoria no recibe la cantidad de oxígeno normal que necesita; podría pensarse en un trastorno a nivel de la barrera difusional que impide que el oxígeno pueda alcanzar la sangre. En estos casos, sería posible aumentar la difusión de oxígeno a nivel alveolar, mediante el suministro de oxígeno medicinal a una presión dada.

Otro ejemplo de interés fisiológico de la difusión gaseosa, lo constituye aquel en las personas que practican el buceo o submarinismo. Cuando un buzo se halla a gran profundidad y asciende rápidamente a la superficie, se produce el fenómeno de descompresión rápida, ya que de una presión elevada vuelve a la presión atmosférica de costumbre. Los efectos nocivos que se producen son debidos a la liberación de gases en el organismo. Como se sabe, la solubilidad de un gas es directamente proporcional a su presión parcial. En consecuencia, a la presión a que se encuentra un buzo, la cantidad de gases disueltos en sangre será superior a la que se puede disolver en condiciones normales. Cuando el buzo

vuelve rápidamente a la superficie, estos gases pueden “desprenderse”, abandonar la sangre en forma de gas propiamente dicha, dando lugar a embolias gaseosas si se liberan en el interior de los vasos, o a necrosis de los tejidos si las burbujas se producen en el seno de estos tejidos. El nitrógeno es el principal gas causante de los trastornos descritos debido a su especial solubilidad en las grasas (lípidos).

Desventajas de los sistemas de transporte por difusión:

Se han realizado cálculos donde se estima que la glucosa tarda unos 0,08 segundos para difundir a través de la célula intestinal, que posee unas 10 micras de espesor; que la hemoglobina y su sustrato, el oxígeno, tardan cerca de 1 segundo y algo más de 25 milisegundos respectivamente, para difundir a través de la célula roja o eritrocito (de tamaño de unas 8 micras).

Estos son tiempos de difusión muy breves, y no parece que las tasas de difusión intracelular sean limitantes para la vida de éstas y otras células.

Estos cálculos surgieron ya temprano en los años de 1900, donde Albert Einstein demostró que hay una relación simple entre el coeficiente de difusión (K_d) de una sustancia, y el tiempo (t) que ella toma para difundir una distancia promedio (d) en un medio fluido. La relación para la difusión en una dimensión es $d^2 = 2K_d.t$.

Nótese que, la distancia es una entidad elevada al cuadrado; esto explicaría que por ejemplo, para el *paramecium*, célula protozoaria grande, de unas 100 micras de longitud, todos estos valores de tiempo de difusión se incrementan 100 veces. Para células de gran tamaño, la tasa de difusión intracelular pudiera volverse un factor limitante, reduciendo la efectividad o eficacia de la célula. Para una célula nerviosa, la cual puede tener metros de longitud, la relación de Einstein demuestra que un intervalo de tiempo muy grande (años quizás) debería requerirse si la difusión fuera el mecanismo único para el cual las sustancias viajaran a través de estas células corporales. En general, el transporte difusivo No es efectivo a grandes distancias.

Para solventar tal situación se han desarrollado otros tipos de sistemas de transporte, destacándose entre ellos el transporte masivo o por arrastre. Este sistema de transporte compensa la dificultad del proceso difusional para transportar sustancias a largas distancias. En el transporte masivo cuando el soluto se mueve en un sentido, es porque el solvente también lo ha hecho en ese mismo sentido. El movimiento del solvente arrastra consigo las partículas de soluto. Este proceso si es efectivo a grandes distancias.

Ejemplo de ello es, nuestro sistema circulatorio sanguíneo; lo es también el sistema respiratorio, en donde el aire que se introduce a nuestros pulmones tiene que recorrer un trayecto largo desde las fosas nasales hasta los alvéolos

pulmonares; el movimiento de esta masa de aire transporta consigo oxígeno, CO₂ y otros gases.

El flujo masivo tiene como expresión matemática:

$$j_m = K_m \cdot \Delta p$$

Esta Δp es un tipo de presión mecánica debido al efecto de un mecanismo de bomba. En el caso del sistema circulatorio, es el corazón el encargado de establecer tal Δp .

$$K_m = \frac{\pi \cdot r^4}{8\eta \cdot L}$$

donde:

η : viscosidad del fluido. r : radio del cilindro o vaso. L : longitud del tubo o vaso a través del cual ocurre el flujo masivo.

Esta ecuación (j_m) describe en todo caso, el flujo cuando se trata de un tubo recto de radio constante.

Bibliografía

- 1.- Baker-Allen, A. La Materia, Energía y Vida. 1978. Editorial Panacea.
- 2.- Frumento, A. Biofísica. 1973. Editorial Panamericana.
- 3.- Camero y Crespo. Física elemental IV año. 1975. Editorial Co-Bo.
- 4.- Mc Donald-Burns, K. Física para las ciencias de la vida. 1981.
- 5.- CECSA. Ciencias Biológicas. 1978. Editorial CECSA.

