

FUNDAMENTOS FÍSICOS DE LOS PROCESOS DEL ORGANISMO HUMANO
PHYSICAL PRINCIPLES OF HUMAN ORGANISM PROCESSES

- 1) Dr.C. Abundio Eduardo Puentes Borges*. Email: apuentesborges@gmail.com Tél: +593 998228690
- 2) Dra. Digna Beatriz Puentes Bencomo**. Email: dignabeatriz@nauta.cu
- 3) Lic. Eduardo Rangel Puentes Bencomo***. Email: gol07edi@gmail.com
- 4) Dr. Enrique Chávez Cevallos****. Email: mechavez1@espe.edu.ec

*Universidad de Guayaquil

**Hospital Provincial “León Cuervo Rubio”. Cuba

***Federación Deportiva del Guayas

****Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE

RESUMEN

El trabajo que se presenta muestra un campo de aplicación del aparato cognitivo de la Física poco conocido, a pesar de la gran importancia que reviste su conocimiento para una mejor comprensión de muchos, sino todos, los procesos que se desarrollan en el organismo humano. Cuestiones tan importantes como las características físicas del movimiento de la sangre por arterias, el accionar del músculo esquelético o el proceso de transformación de energía que tiene lugar en el interior del cuerpo de los seres humanos, son algunos de los procesos que vienen descritos en el presente documento con una sencillez y simplicidad tal que el documento se constituye en una muy preciada ayuda, tanto para los fisiólogos como para los biólogos.

Palabras clave: Aparato cognitivo; Procesos vitales; Fundamentos físicos

ABSTRACT

The paper presented shows a field of application of the cognitive apparatus of physics little known, despite the great importance which their knowledge for a better understanding of many, if not all, the processes that occur in the human body. Issues as important as the physical characteristics of movement in blood through arteries, the actions of skeletal muscle or the process of energy conversion that takes place in the interior of the human body are some of processes that are described in this document with a simplicity and such that the document is a very precious help physiologist for both biologists.

Keywords: Cognitive apparatus; Vital processes; Physical fundamentals

INTRODUCCIÓN

La Física es la ciencia que estudia los sistemas y sus interacciones (1,2,3); es decir, su objeto lo constituye el estudio de todos los fenómenos que ocurren en la naturaleza (4,5). De modo que no escapa a esto el estudio de los fundamentos físicos que ayudan a una mejor explicación de todos los procesos que tienen lugar en los sistemas vivos (6,7,8); en esta ocasión referidos al organismo humano.

Inicialmente aparece una relación de los contenidos físicos con los comprendidos en diferentes campos de las Ciencias Biológicas, aspecto recurrente en la investigación de la física aplicada, tal y como afirman diversos autores (9,10,11), y a continuación se describen algunos de los principales procesos que se suceden en el interior del organismo humano.

En todos los casos los contenidos son tratados destacando la implicación de muchos de los conceptos y leyes de la Física, constituyendo en aquellos fundamentos de los distintos procesos tratados; son los casos del trabajo del músculo esquelético, el movimiento de la sangre en las arterias, el trabajo del corazón, los procesos respiratorios, el funcionamiento de los sistemas de control y el proceso de transformación de energía en el interior del cuerpo humano, entre otros, algunos de ellos abordados en la presente investigación.

Las propiedades mecánicas de los músculos

Los músculos son tejidos constituidos por fibras musculares dotadas de capacidad contráctil (12,13). Dichas capacidades a grandes rasgos están relacionadas con las contracciones de tipo estereométricas, clasificadas en varios tipos, que para el caso que compete se enuncian las siguientes:

1. Contracción Isométrica: Ocurre para una longitud fija. Se desarrolla la tensión sin acortamiento (14,15).
2. Contracción isotónica: Significa el acortamiento del músculo para una carga constante. En este caso el músculo realiza trabajo elevando el peso (16).

En las ciencias de la salud y el deporte se ha diseñado ecuaciones que modelan diversos fenómenos de interés para cada ciencia (17,18,19), como por ejemplo la curva de fuerza-velocidad presente en

Viladot (20) para medir la potencia del músculo a partir de la fuerza del músculo por la velocidad de contracción.

Por ello, la ecuación característica fundamental de la contracción muscular liga la velocidad estacionaria ($v = \text{cte}$) de la contracción isotónica (acortamiento) con el peso P , y tiene la forma hiperbólica.

$$(P+a) v = b (P_0 - P)$$

P_0 – Tensión máxima desarrollada por el músculo o el peso máximo sujetado por el músculo sin su alargamiento.

A y b – ctes.

Para $P = 0$ $V_{\text{máx.}} = bP_0/a$ para $P = P_0$ $V = 0$

$P > P_0$ el músculo ya no se acorta, sino que se alarga.

Esta ley es válida solo para acortamientos con $v = \text{cte}$ y longitudes del músculo cercanas a la fisiológicas.

P_0 depende de la longitud del sarcómero (entre 1,7 y 2,5 μm)

El trabajo realizado durante el acortamiento es

$$W = PvT = bPt (P-P_0)/P+a$$

Par $P = 0$ o $P = P_0$ $W = 0$

Cuando $P \approx 0,31 P_0 = \text{máx.}$

En el caso del músculo esquelético, la longitud de la fibra muscular en reposo es de 2μ (21). Durante su contracción aparecen fuerzas de atracción que hacen que los filamentos de actina se deslicen dentro de los de miosina (22,23), debido a la gran liberación de iones de Calcio provocada por la transmisión del potencial de acción por la membrana de la fibra muscular. Este proceso contráctil continúa con la energía proveniente de la desintegración de los enlaces de ATP (24,25).

Para el caso de un sistema con rozamiento el esfuerzo de tracción o empuje se origina como resultado de la transformación de energía química del ATP en energía de reordenación conformativa del sistema contráctil proteínico, y su movimiento se rige por la Segunda Ley de Newton (26,27):

$Ma = P' - P - BV$ donde M es la masa desplazada, P la tensión aplicada (carga), P' la tensión desarrollada y BV la fuerza de rozamiento

El trabajo constituye una de las formas de transmisión de energía; de aquí que se afirme que la energía es la capacidad que tiene un cuerpo o sistema para realizar trabajo (28,29,30). Desde el punto de vista mecánico el trabajo dependerá de la fuerza aplicada y del desplazamiento experimentado por el cuerpo o sistema sobre el cual se aplican las fuerzas. Es decir para que una fuerza aplicada realice trabajo tiene que provocar el desplazamiento del cuerpo sobre el cual se ha aplicado esta fuerza; esta relación se expresa matemáticamente por la ecuación $W = F d \cos \alpha$ donde α es el ángulo entre la línea de aplicación de la fuerza aplicada y el desplazamiento del cuerpo.

Sin embargo, desde el punto de vista fisiológico el trabajo alcanza también otra connotación, pues durante una contracción isométrica el músculo aún sin desplazamiento relativo realizará un trabajo para lo cual necesitará del consumo de energía como se ha explicado anteriormente. En general la Energía es inherente a todo sistema material y existen múltiples tipos de energía además de la mecánica, la cual es conocida en sus formas: Energía Cinética asociada al movimiento de los cuerpos (31,32) y Energía Potencial, determinada por la posición relativa de los cuerpos dentro del sistema (33), como: la calorífica, eólica, sonora, lumínica, eléctrica, atómica, nuclear, etc... Los postulados materialistas plantean que la energía que existe en la naturaleza ni se crea ni se destruye, sino solo se transforma (34), por esto en todos los procesos lo que ocurre es una constante transformación de unos tipos de energía en otros.

Los sistemas de control

Los sistemas de control son utilizados por el organismo tanto para controlar las relaciones entre los distintos órganos como para controlar las funciones de las porciones individuales de éstos (35).

Algunos de los sistemas de control son:

- a) Regulación de la Presión arterial.
- b) Control de la temperatura del Cuerpo.
- c) Control de la glucosa.

Los sistemas de control a veces pueden oscilar Ej: Las Ondas de presión arterial causadas por el sistema presorreceptor (36): Algún factor extraño hace que la presión arterial se eleve en exceso y

esto activa el reflejo presorreceptor (37). La presión vuelve a caer y, finalmente queda más debajo de la normal. Luego esta presión muy baja activa el reflejo presorreceptor en dirección opuesta, haciendo que la presión aumente nuevamente hasta un valor superior a la normal. Esto inicia un nuevo ciclo de potenciación que puede continuar indefinidamente. Por fortuna esta oscilación no ocurre frecuentemente, solo en circunstancias peculiares, Ej: Disminución del volumen sanguíneo.

El movimiento oscilatorio representa el movimiento más diseminado en la naturaleza. El mismo consiste en el movimiento de un cuerpo alrededor de cierta posición de equilibrio, cuando este movimiento ocurre de modo tal que el cuerpo recorre las distancias comprendidas entre los puntos extremos en intervalos de tiempo fijos se dice que este movimiento es periódico, y la posición del cuerpo respecto a su posición de equilibrio en cualquier instante de tiempo (llamada elongación), para el caso más simple en que el mismo puede ser considerado una partícula viene expresado por la relación $X = A \cos wt$.

Aquí A es el valor máximo que puede alcanzar la elongación y w es su frecuencia angular, $w = 2\pi f$, o $w = 2\pi/T$ siendo f la frecuencia cíclica y T el periodo de oscilación. De esta relación se puede inferir que $f = 1/T$, por lo que si la frecuencia cíclica se define como el número de oscilaciones que efectúa la partícula en la unidad de tiempo, t será el tiempo que tardará en dar una oscilación completa.

Una simple inspección a este movimiento permite comprender fácilmente que durante el mismo se produce una constante transformación de energía mecánica, y que si se desprecia la acción de la fricción con aire, lo cual provoca una constante disipación de energía, durante la oscilación se cumpliría la Ley de Conservación y Transformación de la Energía (38,39), con lo cual dichas oscilaciones se mantendrían con una amplitud constante. Debido a la fricción con el aire (o a otros factores de acuerdo con el medio en que se efectúa la oscilación) la amplitud de las oscilaciones va disminuyendo hasta detenerse; esta oscilación se nombra amortiguada. En la práctica para mantener la amplitud de las oscilaciones constante debemos valernos de un agente que retribuya al sistema la energía que este va perdiendo. Visto un proceso como el conjunto de fases sucesivas que se dan en el tiempo, se puede asociar éste a la definición de movimiento y de aquí que se pueda aplicar a los procesos oscilatorios todo lo visto anteriormente para los movimientos oscilatorios.

En el movimiento oscilatorio la partícula está confinada en cierta posición del espacio (40), sin embargo, este movimiento se puede irradiar, llamándose a esta transmisión de la oscilación en el

espacio Onda. Debe destacarse que en la Onda no se transmite la masa sino solo la energía; es decir cada punto que oscila se mantiene oscilando en el mismo lugar, lo que se transmite es la señal. Las ondas se estudian en dos categorías fundamentales: las ondas mecánicas, en las cuales se necesita de un medio sustancial (elástico) para trasladarse y las ondas electromagnéticas las cuales se trasladan mediante los campos asociados a ellas; por lo cual pueden trasladarse incluso en el vacío (41). Ejemplo de las primeras lo constituyen el movimiento de la sangre por arterias y venas y el movimiento del aire presente tanto en el proceso de respiración como en la transmisión del sonido, mientras las segundas son aquellas dentro de las cuales está presente el espectro de luz visible que permite al ojo humano detectar la presencia de los objetos. Las ondas en los fluidos (como la sangre y el aire) está formada por constante y alternas zonas de compresión y rarefacción, es decir constantes variaciones de presión.

Las ondas elásticas que tienen una frecuencia entre 16 y 20000 Hz, aproximadamente, son percibidas por el oído humano y llamadas acústicas (sonoras) (42). A una frecuencia menor de 16Hz las ondas elásticas se denominan infrasonidos y a frecuencias mayores a 20000Hz ultrasonidos. La propagación del sonido es acompañada alternativamente por la compresión y la dilatación de varios sectores del medio y por la consiguiente variación de la presión en comparación con la que existe en el medio imperturbado. La presión acústica origina la percepción del sonido, provocando las oscilaciones forzadas del tímpano del oído.

El oído del hombre es capaz de percibir los sonidos en amplia gama de intensidad. A la frecuencia de 1000Hz los límites de esta son de $I_0 \approx 10^{-2} \text{W/m}^2$ (Umbral de audibilidad) y $I_{\text{max}} \approx 10 \text{ w/m}^2$ (umbral de sensación dolorosa).



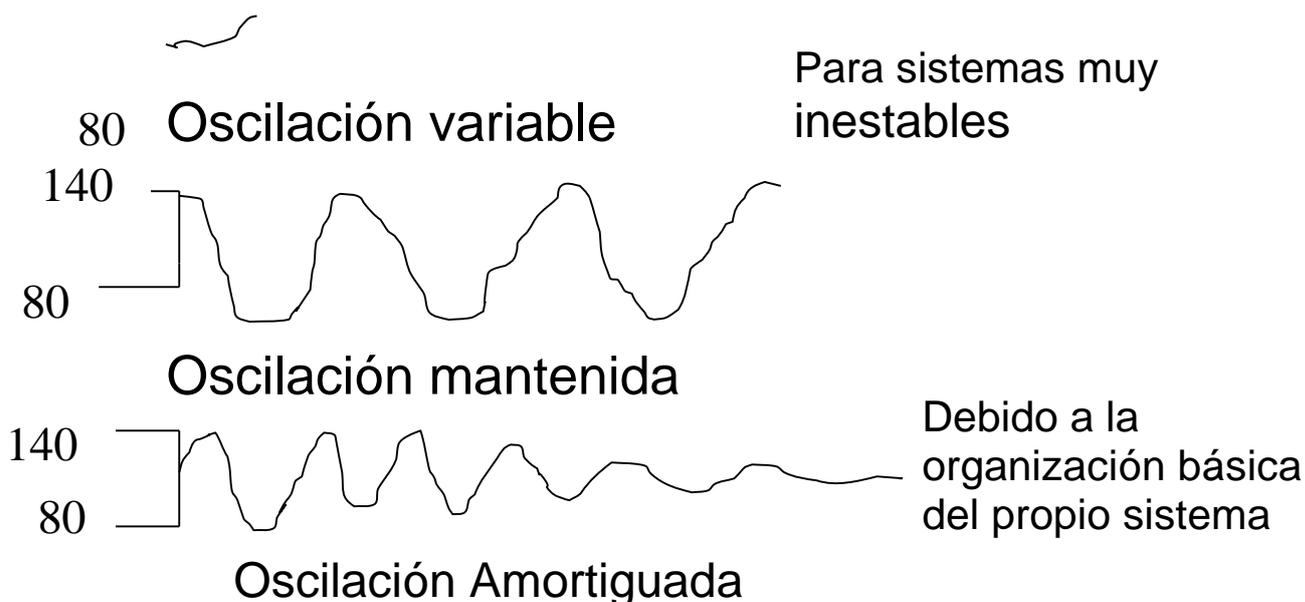


Figura 1. Ondas de presión arterial causadas por oscilación del sistema presorreceptor.

El trifosfato de adenosina (ATP)

El ATP es un nucleótido formado por la base nitrogenada Adenina, el azúcar pentosa Ribosa y tres radicales de Fosfato (43). Los dos últimos radicales de fosfato están unidos al resto de la molécula por los llamados Enlaces de Fosfato ricos en energía. Cada enlace contiene 8000 calorías por mol de ATP en condiciones físicas del cuerpo. Este puede gastarse y reponerse una y otra vez, es por eso que se denomina Moneda corriente energética de la célula.

En sus funciones se encuentran:

- 1) Transporte de membrana- Proporciona energía para transportar Sodio a través de la membrana.
- 2) Síntesis de compuestos orgánicos en toda la célula. Estimula la síntesis de proteína por las membranas.
- 3) Trabajo mecánico- Proporciona la energía necesaria para la contracción muscular.

Peculiaridades del sistema circulatorio

El corazón es una bomba pulsátil de cuatro cavidades, dos aurículas y dos ventrículos (44). Los ventrículos son los que proporcionan la fuerza principal e impulsan la sangre a través de los pulmones y de todo el sistema circulatorio periférico.

La función del corazón es bombear la sangre que corre por arterias y venas. Al comprimirse y ensancharse para expulsar y admitir la sangre engendra el pulso o el latido que repercute en todas las venas palpitantes del cuerpo (45). Esta sangre en su recorrido lleva el oxígeno contenido en sus glóbulos rojos a todas partes del cuerpo. La viscosidad de la sangre depende, casi totalmente de la concentración de glóbulos rojos (46). De lo explicado con anterioridad se comprende fácilmente como el movimiento de la sangre por arterias y venas constituye una Onda mecánica.

Al volumen de sangre que el corazón expulsa en la unidad de tiempo se le denomina Gasto (Q). En condiciones fisiológicas normales el gasto cardíaco debe permanecer constante (5,5L/min. = 80mL x 66 latidos) $Q = vA$, siendo v la velocidad de la sangre y a el área del conducto. Como en condiciones fisiológicas normales Q debe permanecer constante se infiere que el movimiento de la sangre en nuestro cuerpo cumple con la ecuación de continuidad ($Va = cte$). Esto ha sido establecido en el estudio de los fluidos donde se establece que para todo fluido moviéndose a régimen laminar y estacionario se cumple que el producto de la velocidad del fluido por el área de la sección transversal del conducto por donde circula el fluido debe permanecer constante; es decir, si aumenta el área disminuye la velocidad del fluido y viceversa (47).

Debido a esto es que la velocidad de la sangre en la aorta es máxima, menor en los vasos menores y mínima en los capilares cuya área total es 1000 veces el área de la aorta. El flujo de la sangre en un vaso, entre los puntos a y b viene dado por la expresión $F = (P_a - P_b) \frac{\pi r^4}{8\eta L}$, siendo $\frac{8\eta L}{\pi r^4}$ la resistencia de esa porción del vaso, r su radio, L la longitud y η la viscosidad de la sangre. El flujo de un vaso se duplica por un incremento de solo un 19% de su radio, y cuando r se duplica la resistencia se reduce a 6% de su valor previo.

Debido a lo anterior, el flujo sanguíneo en los órganos es eficazmente regulado por pequeños cambios en el calibre de las arteriolas. Como $R \propto \eta$, en la policitemia grave (η muy alta), el incremento en la resistencia aumenta el trabajo del corazón. Lo anterior se explica por el hecho de que la viscosidad de la sangre está determinada por la cantidad de glóbulos rojos presentes en esta (46).

P_a y P_b son las presiones en dos puntos del conducto sanguíneo a y b

La presión entre dos puntos de un conducto de fluido de radios de curvatura r_1 y r_2 está relacionada con la tensión (T) en la pared por la ecuación $P= T (1/r_1 + 1/r_2)$. En los vasos sanguíneos al ser cilíndricos, uno de los radios es infinito por lo que la relación se reduce a $P= T/r$; de aquí que mientras menor sea el radio menor será la tensión necesaria para equilibrar la presión distendente. Por ejemplo: En la aorta humana a presiones normales $T= 170000$ din/ cm, en la vena cava $T= 21000$ din/cm y en los capilares $T= 16$ din/cm. Por esto es que los corazones dilatados deben realizar más trabajo pues debe desarrollarse una tensión mayor en el miocardio.

La presión del agua en un recipiente aumenta con la profundidad, ya que el valor de la misma en cualquier punto en el interior de un líquido está determinada por la altura de la columna líquida (48). Por cada 10cm aumenta 1kPa, atendiendo a esto si el sistema se mueve a una aceleración a igual a n veces el valor de la gravedad la presión disminuirá en $nkPa$ para cada 10 cm. La presión arterial de la sangre en una persona sana al nivel del corazón es de 16 a 18 kPa, y en la cabeza de 12 a 14 kPa. Para una aceleración de 3g hacia arriba la presión de la sangre en la cabeza disminuye en 12kPa y en los vasos de las extremidades inferiores puede alcanzar 74 kPa. La mayoría de los animales son horizontales, pero el hombre, el gallo y la jirafa son hipertónicos por lo que sus presiones arteriales son más altas (49), al igual que existen diferencias de presión arterial entre hombres según diversos indicadores (50,51).

La fuerza de gravedad es la fuerza con que la tierra atrae a todos los cuerpos que se encuentran en su superficie (52), está dirigida radialmente hacia el centro de la misma y su valor varía inversamente con la distancia.

En la posición de pie, como resultado de la fuerza de gravedad la presión arterial media en los pies de un adulto normal es de 180- 200 mm H_g y la presión venosa es de 85- 90 mm H_g. A nivel de la cabeza la presión arterial es de 60-75 mm H_g y la venosa es cero. Debido a esto, si el individuo no se mueve se acumulan de 300 a 500 ml de sangre en los vasos venosos en las extremidades inferiores, el flujo sanguíneo cerebral decrecería y aparecerían síntomas de isquemia cerebral. Esta acumulación produciría la reducción del gasto cardíaco si no hubiera cambios cardiovasculares compensadores como puede ser la elevación de la frecuencia cardíaca (53).

Para garantizar un Q constante, en nuestras extremidades inferiores existen unas bombas musculares encargadas de mantener el retorno venoso (en contra de la fuerza de gravedad) y la presión venosa por debajo de 30 mm Hg, pero si nos mantenemos mucho tiempo de pie el trabajo de estas bombas se ve afectado y la disminución del flujo sanguíneo al cerebro puede producir el desmayo. Este desmayo constituye un medio de protección del organismo (54) ya que, en la posición horizontal en la posición horizontal, al estar el corazón al mismo nivel que las demás partes del cuerpo, se restablece el retorno venoso, el gasto cardíaco y el flujo sanguíneo cerebral a niveles adecuados.

En ingravidez prolongada el esfuerzo muscular se reduce mucho y puede llegar hasta la flaccidez de los músculos esqueléticos (55,56), al haber ausencia de los incrementos del gasto cardíaco (debido a los esfuerzos de la vida cotidiana) es posible que pueda haber cierta atrofia del miocardio (57,58). El corazón trabaja a régimen de impulso con $f \approx 1\text{Hz}$, impulso que dura $\approx 0,25\text{s}$ y en este tiempo expulsa a la aorta cerca de $0,1\text{ dm}^3$ (0,1L) de sangre.

Consideraciones finales

Este trabajo no abarca todo el espectro de procesos que tienen lugar en el organismo humano; solo pretende ofrecer una panorámica general que permita conocer el carácter físico que poseen muchos de los procesos que tienen lugar en el organismo humano.

Lejos de agotarse el tema, solo se describen algunos de estos procesos fundamentales, los cuales incluso han sido tratados en otras obras. El modesto aporte de la presente radica en describir dichos procesos destacando el carácter físico de los mismos desprovisto de todo tipo de complejidades matemáticas, lo cual lo torna sencillo y de fácil comprensión para todo aquel que desee adquirir los conocimientos elementales sobre las cuestiones aquí tratadas, a la vez que lo convierte en un documento motivante para profundizar en el estudio de los mismos.

Declaración de Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no poseen ningún tipo de conflicto de intereses, ni financiero ni personal, que puedan influir en el desarrollo de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Landau DP, Binder K. A guide to Monte Carlo simulations in statistical physics. : Cambridge university press.; 2014.
2. Olson RS. Scottish Philosophy and British Physics, 1740-1870: A Study in the Foundations of the Victorian Scientific Style. : Princeton University Press.; 2015.
3. Serway R, Jewett J. Physics for scientists and engineers with modern physics.: Nelson Education.; 2013.
4. Duran J. Sands, powders, and grains: an introduction to the physics of granular materials. : Springer Science & Business Media.; 2012.
5. Bronshten VA. Physics of meteoric phenomena (Vol. 22). : Springer Science & Business Media.; 2012.
6. Banavar JR, Cooke TJ, Rinaldo A, Maritan A. Form, function, and evolution of living organisms.. Proceedings of the National Academy of Sciences. 2014; 111(9): p. 3332-3337.
7. Gilbert DL. Oxygen and living processes: an interdisciplinary approach. : Springer Science & Business Media.; 2012.
8. Horovitz CT. Scandium its occurrence, chemistry physics, metallurgy, biology and technology.: Elsevier.; 2012.
9. Bacq ZM, Alexander P. Fundamentals of Radiobiology: International Series of Monographs in Pure and Applied Biology: Modern Trends in Physiological Sciences (Vol. 5). : Elsevier.; 2013.
10. Lovenberg W. Biological Properties: Elsevier.; 2012.
11. Strogatz SH. Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering.: Westview press.; 2014.
12. d'Avella A, Giese M, Ivanenko YP, Schack T, Flash T. Editorial: Modularity in motor control: from muscle synergies to cognitive action representation.. Frontiers in computational neuroscience. 2015; 9: p. 126.
13. d'Avella A, Giese M, Ivanenko YP, Schack T, Flash T. Modularity in Motor Control: From Muscle Synergies to Cognitive Action Representation. 1st ed.: Frontiers Media SA; 2016.
14. Simoneau EM, Longo S, Seynnes OR, Narici MV. Human muscle fascicle behavior in agonist and antagonist isometric contractions.. Muscle & nerve. 2012; 45(1): p. 92-99.
15. Carles RM, Pérez MC. Manual teórico-práctico de métodos fisioterápicos de intervención en sistema nervioso: Facilitación neuromuscular propioceptiva. 1st ed. Murcia: Ediciones de la Universidad de Murcia; 2015.
16. Chaitow L. Muscle energy techniques. 4th ed.: Elsevier Health Sciences; 2013.
17. Kolmanovskii V, Myshkis A. Introduction to the theory and applications of functional differential equations: Springer Science & Business Media.; 2013.
18. Hannon B, Ruth M. Modeling dynamic biological systems. In Modeling dynamic biological systems: Springer International Publishing.; 2014.
19. Dryhurst G. Electrochemistry of biological molecules. : Elsevier.; 2012.
20. Viladot A. Lecciones básicas de biomecánica del aparato locomotor: Springer Science & Business Media.; 2001.
21. Merino J, Noriega MJ. Fisiología general: Universidad de Cantabria; 2013.
22. Águila J. Medicina e.. Medicina e. 2013; 1(1): p. 25.
23. Camacho AS. The feynman's ratchet and the biological motors.. MOMENTO-Revista de Física. 2013;(46): p. 54-62.
24. Kang Y, Wang C, Liu K, Wang Z, Zhang X. Enzyme-responsive polymeric supra-amphiphiles formed by the complexation of chitosan and ATP. Langmuir. 2012; 28(41): p. 14562-14566.

25. Zhegunov G. Strategy of Matter and Energy Transformation. In *The Dual Nature of Life*: Springer Berlin Heidelberg.; 2012.
26. Fung YC. *Biomechanics: mechanical properties of living tissues.* : Springer Science & Business Media.; 2013.
27. Şahin E, Yağbasan R. Determining which introductory physics topics pre-service physics teachers have difficulty understanding and what accounts for these difficulties.. *European Journal of Physics.* 2012; 33(2): p. 315.
28. Doménech JL, Gil D, Martínez J, Gras A, Guisasola G, Salinas J. La enseñanza de la energía en la educación secundaria. Un análisis crítico.. *Revista de Enseñanza de la Física.* 2015; 14(1): p. 45-60.
29. Govindjee. *Energetics of Photosynthesis.* : Elsevier.; 2012.
30. Hill T. *Free energy transduction in biology: the steady-state kinetic and thermodynamic formalism.* : Elsevier.; 2012.
31. Día DV, Gutiérrez SS. Biomechanics and motor control of human movement. *XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan.* 2013; 1(1): p. 1-21.
32. León S, Calero S, Chávez E. *Morfología funcional y biomecánica deportiva.* 2nd ed. Quito: Editorial de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE; 2016.
33. *Enciclopedia Británica. Gran atlas de la ciencia: energía: Britannica Digital Learning;* 2014.
34. García A, Criado AM. Enseñanza de la energía en la etapa 6-12 años: un planteamiento desde el ámbito curricular de las máquinas.. *Enseñanza de las Ciencias.* 2013; 31(3): p. 0087-102.
35. Rothwell JC. *Control of human voluntary movement.* : Springer Science & Business Media.; 2012.
36. Cabrera A, Chávez A, Rojas RC, Kessler C, Delgado G, Vidal B. Los barorreflejos arteriales cardiovagal, cardiosimpático y vasosimpático y el control neural de la presión arterial a corto plazo. *Rev Neurol.* 2014; 59: p. 508-16.
37. Mancia G, Fagard R, Narkiewicz K, Redon J, Zanchetti A, Böhm M, et al. Guidelines for the management of arterial hypertension: the Task Force for the Management of Arterial Hypertension of the European Society of Hypertension (ESH) and of the European Society of Hypertension (ESH) and of the European Society of Cardiology. *Blood pressure.* 2013; 22(4): p. 193-278.
38. Bunge M. La energía entre la física y la metafísica.. *Revista de Enseñanza de la Física.* 2016; 12(1): p. 53-56.
39. Neumann K, Viering T, Boone WJ, Fischer HE. Towards a learning progression of energy.. *Journal of Research in Science Teaching.* 2013; 50(2): p. 162-188.
40. Lichtenberg AJ, Lieberman MA. *Regular and stochastic motion: Springer Science & Business Media.;* 2013.
41. Achenbach J. *Wave propagation in elastic solids: Elsevier.;* 2012.
42. Merino JM, Muñoz L. La percepción acústica: física de la audición. *Revista de ciencias.* ; 2: p. 19-26.
43. Marzuki S. *Molecular Structure, Function, and Assembly of the ATP Synthases: International Seminar New York: Springer Science & Business Media;* 2013.
44. Iuzzo PA. *Handbook of Cardiac Anatomy, Physiology, and Devices.* 3rd ed.: Springer; 2015.
45. Anderson RH, Spicer DE, Backer CL, Cook AC, Hlavacek AM. *Wilcox's Surgical Anatomy of the Heart.* 4th ed. Cambridge: Cambridge university press.; 2013.
46. Bain BJ. *Blood cells: a practical guide.* 5th ed.: John Wiley & Sons.; 2015.

47. Dixon SL, Hall C. Fluid mechanics and thermodynamics of turbomachinery.. 7th ed.: Butterworth-Heinemann.; 2013.
48. Juteau T. La exploración de los fondos oceánicos: 160 años de investigación.. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra. 2014; 22(2): p. 115.
49. Reece W. Functional Anatomy and Physiology of Domestic Animals. 4th ed.: John Wiley & Sons.; 2013.
50. Sandberg K, Ji H. Sex differences in primary hypertension.. Biology of sex differences. 2012; 3(1): p. 7.
51. Maranon R, Reckelhoff JF. Sex and gender differences in control of blood pressure.. Clinical science. 2013; 125(7): p. 311-318.
52. Strathern P. Newton y la gravedad. 2nd ed.: Siglo XXI de España Editores.; 2014.
53. Obrist PA. Cardiovascular psychophysiology: A perspective.. 5th ed.: Springer Science & Business Media.; 2012.
54. Sieira PI, Martínez E, Imaz M. Desmayos y síncope.. Medicine-Programa de Formación Médica Continuada Acreditado. 2015; 11(73): p. 4357-4363.
55. Brown JH. Neuromuscular aspects of space travel.. In Physiology of Man in Space.: Academic Press; 2015. p. 1-59.
56. Toma S, Lacquaniti F. Mapping muscles activation to force perception during unloading.. PloS one. 2016; 11(3).
57. Zhu H, Wang H, Liu Z. Effects of real and simulated weightlessness on the cardiac and peripheral vascular functions of humans: A review. Int J Occup Med Environ Health. 2015; 28: p. 793-802.
58. Iskovitz I, Kassemi M, Thomas JD. Impact of weightlessness on cardiac shape and left ventricular stress/strain distributions. Journal of biomechanical engineering. 2013; 135(12): p. 121008.

RECIBIDO: 18/9/2012 APROBADO: 20/10/2012.