

“DISEÑO DE UN EQUIPO PARA MEDIR LA ENERGÍA CINÉTICA Y EL TIEMPO DE REACCIÓN DE ATLETAS”

Ricardo Fonseca Gómez

Tecnm/ Instituto Tecnológico de Tuxtla
Gutiérrez Chiapas, México

Roberto Carlos García Gómez

Tecnm/ Instituto Tecnológico de Tuxtla
Gutiérrez Chiapas, México

Álvaro Sánchez Rodríguez

Tecnm/ Instituto Tecnológico de Celaya
Celaya, Gto

Hernán Valencia Sánchez

Tecnm/ Instituto Tecnológico de Tuxtla
Gutiérrez Chiapas, México

Marco Antonio Zúñiga Reyes

Tecnm/ Instituto Tecnológico de Tuxtla
Gutiérrez Chiapas, México

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



Resumen: Las partes del cuerpo humano se consideran estructuras o cuerpos rígidos para facilitar el estudio del movimiento. La variación en los movimientos (lineales y angulares) se describe por medio de los parámetros cinemáticos y cinéticos, y son los valores de estos parámetros los que caracterizan a los movimientos. Para saber que energía cinética desarrolla un atleta y el tiempo en alcanzarla son necesarios desarrollar nuevos equipos o en su caso mejorar los existentes. De acuerdo a una metodología donde contempla la capacidad de combinar ideas, principios científicos, recursos y, a menudo, productos existentes en la solución de un problema. Esta capacidad de generar soluciones es el resultado de un enfoque organizado y ordenado para abordar el problema, el cual se conoce como proceso de diseño. El proceso de diseño que conduce a la fabricación, ensamblaje, mercadotecnia, servicio y las diversas actividades necesarias para crear un producto exitoso se compone de varias etapas fáciles de reconocer.

Palabras clave: Diseño, cinemática.

Toda persona envuelta en la educación física o ciencia de la salud física, particularmente la fisiología del ejercicio aplicada, el entrenamiento físico/deportivo y en la administración de pruebas ergonómicas de esfuerzo progresivo, debe poseer las destrezas y el conocimiento para poder estimar el gasto energético y la potencia producida durante el entrenamiento. La práctica del deporte y el ejercicio o actividad física requiere el uso de energía. Para poder determinar cuántas calorías necesita un individuo, de manera que pueda reducir una cantidad de grasa, requiere conocer el gasto energético durante el ejercicio. Esto se consigue mediante su estimación a base de la potencia que genera o mediante su medición en el laboratorio utilizando diversos equipos especializados [6].

Para la obtención del rendimiento superior, los entrenadores, en colaboración con los profesionales de las diferentes ciencias del deporte y la ingeniería, diseñan las estrategias y equipos especializados para que los atletas obtengan las ventajas en el campo deportivo. A través de los medios de la fisiología del ejercicio, antropometría, biomecánica, nutrición y psicología se realiza el control biomédico del entrenamiento. La Biomecánica es la ciencia que estudia el movimiento desde el punto de vista de las leyes físicas. Todos los cuerpos en movimiento respetan estas leyes y para el logro del máximo rendimiento, la técnica de ejecución se debe fundamentar en los diferentes principios biomecánicos. El entendimiento de los mecanismos de base del movimiento del cuerpo humano y de los implementos deportivos en relación con los diferentes objetivos que se persiguen, tomando en consideración las particularidades del aparato locomotor, constituye la principal condición del entrenamiento consciente y científicamente fundamentado. No sería posible la elaboración de un plan de entrenamiento para un atleta, sin tener claridad sobre los objetivos que se buscan y los diferentes factores que producen el resultado [18].

La aplicación más importante de la Biomecánica en el proceso del entrenamiento deportivo lo constituye el Análisis Biomecánico y la Investigación en este campo. El Análisis Biomecánico puede ser Cualitativo, Cuantitativo o Mixto [21].

Las personas que realizan el análisis deben tener suficiente experiencia y capacidad de observación de los detalles de los movimientos ejecutados por los atletas, para poder identificar cualquier elemento que modifica el patrón de la ejecución. Generalmente, la observación de la performance es visual directa, sin embargo, es posible utilizar otras

fuentes de información como la observación visual indirecta (marcas o huellas dejadas por los atletas e implementos deportivos). Lo cual permite la incorporación de otras disciplinas que optimicen la adquisición de valores y el control del performance de cada uno de los atletas [19].

Con base en los diferentes referentes teóricos y metodológicos, se diseña un dispositivo capaz de medir la potencia física de un atleta.

METODOLOGÍA

La metodología utilizada contempla la capacidad de combinar ideas, principios científicos, recursos y, a menudo, productos existentes en la solución de un problema. Esta capacidad de generar soluciones es el resultado de un enfoque organizado y ordenado para abordar el problema, el cual se conoce como proceso de diseño. El proceso de diseño que conduce a la fabricación, ensamblaje, mercadotecnia, servicio y las diversas actividades necesarias para crear un producto exitoso se compone de varias etapas fáciles de reconocer. Aunque muchos grupos industriales las pueden identificar de un modo distinto, un procedimiento conveniente para el diseño de un producto nuevo o mejorado se divide en las siguientes cinco etapas [2].

1. Identificación del problema, necesidad o “cliente”.
2. Conceptos e ideas.
3. Consenso y análisis de soluciones.
4. Modelos y prototipos.
5. Dibujos de producción o funcionamiento.

IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Diseñar un dispositivo capaz de medir la potencia física de un atleta, bajo los siguientes parámetros: potencia en la velocidad motora, potencia en la fuerza motora, fuerza muscular explosiva y fuerza de arranque. Bajo las siguientes restricciones: masa a desplazar

entre el rango de 60 a 120 Kg, sobre una distancia máxima de prueba de 10 m.

CONCEPTOS E IDEAS

Los rendimientos deportivos son ante todo rendimientos motrices, y los movimientos descansan sobre el efecto acelerador de las fuerzas. Desde esta perspectiva es posible describir el efecto de la fuerza muscular basándose en gran medida en las leyes mecánicas [7].

Los factores mecánicos que producen y controlan el movimiento son generados dentro del cuerpo (mecánica interna) o afectan el cuerpo desde afuera (mecánica externa)

Sin embargo, no se puede tratar las fuerzas musculares solo como fuerzas resultantes, puesto que sus efectos sobre los movimientos son provocados por un sistema de cadenas de miembros con uniones musculares que dispone de muchos grados de libertad en lo referente a las posibilidades de movimiento.

Según [8] la capacidad de fuerza es la base de la condición física que subyace a los rendimientos musculares de aplicación de la fuerza cuando el valor de estos rendimientos es superior al 30% aproximadamente de los máximos realizables por el individuo en cada momento.

La fuerza es la función específica que desarrollan los músculos esqueléticos, es una cualidad que está involucrada en cualquier movimiento y está medida por la contracción muscular. Clásicamente se han diferenciado tres manifestaciones de tipos de fuerza de fuerza: la fuerza máxima, la fuerza explosiva y la fuerza-resistencia [6,1 2,17].

Los parámetros a tomar en cuenta desde el principio son:

- La potencia es la capacidad de la musculatura de contraerse venciendo una resistencia que se opone al acercamiento de sus puntos de inserción [6].

- La fuerza explosiva representa la máxima manifestación de la potencia teniendo en cuenta especialmente a la velocidad. Esto indica que la potencia es la fuerza en velocidad. Su importancia radica en que determina la cadencia de trabajo o carga/potencia ergometría realizado en un ergómetro particular durante pruebas de ejercicio o sesiones de entrenamiento efectuados en el ergómetro, lo cual:
 - a. Ayuda a calcular la intensidad bajo la cual en individuo debe ejercitarse.
 - b. Puede estimar la energía gastada.
- La potencia en la velocidad motora; Se denomina a la acción de vencer una resistencia a la mayor velocidad posible [16]. (Ejemplo: en la faz de aceleración de las carreras cortas de atletismo, en el boxeo, en fútbol, en básquet, etc.). El aumento en la potencia de los gestos deportivos no se perfecciona sólo a través del entrenamiento de la coordinación, sino también, por el aumento de la fuerza. La potencia aparece en los gestos deportivos en forma aislada como en la toma y golpes en los deportes de lucha y también en los deportes cíclicos: atletismo, remo, ciclismo.
- La potencia en la fuerza motora: Desde el aspecto funcional todos los movimientos en los cuales debe vencerse una resistencia a la mayor velocidad posible pueden ser considerados movimientos de potencia (saltos, lanzamientos). Con el mismo criterio muchos ejercicios de fuerza pueden ser transformados en ejercicios de potencia a través del simple expediente de solicitar que en un corto espacio de tiempo se trate de realizar el máximo número de repeticiones posibles.
- Potencia Muscular: Es la realización

de fuerza con una exigencia asociada de tiempo mínimo. Es el caso de los saltos, donde para lograr un máximo resultado la fuerza deberá ser aplicada velozmente. Depende de la fuerza pura, la coordinación, la velocidad de contracción de la musculatura y el respeto de los principios biomecánicos que rigen el movimiento. Para el entrenamiento de la potencia existen las siguientes posibilidades: aumento de la fuerza pura y perfeccionamiento de la coordinación.

- Fuerza muscular explosiva y fuerza de partida: La fuerza explosiva constituye el límite de desarrollo de la potencia o velocidad en la fuerza [20]. Aquí tiene un papel de gran importancia la velocidad. Esta cualidad es decisiva en el rendimiento debido al tiempo que transcurre dicha manifestación para lograrse. La fuerza explosiva determina el tiempo que transcurre para la realización de determinada acción de fuerza, lo cual la supedita a otro elemento que interviene: la fuerza de partida o reacción. Esta consiste en el tiempo que transcurre en llegar a manifestarse una tensión muscular determinada que con posterioridad podrá concretarse en un trabajo mecánico.

La potencia sólo se identifica a través de sus efectos. Cuanto mayor sea la aceleración que una persona pueda imprimir a su masa corporal en un tiempo determinado mayor será la potencia de que disponga [10].

Para que un movimiento pueda ser calificado de potente deben darse dos condiciones primordiales:

- El movimiento debe vencer relativamente grandes resistencias que lo dificulten.
- Deben alcanzarse relativamente grandes aceleraciones.

El tipo de trabajo a realizar, es decir, tipo de fuerza a ejecutar, determinará qué tipos de pesos debe seleccionarse. En caso de manejarse pesos menores, tendrá principal injerencia la fuerza en velocidad o potencia mientras que si realizamos trabajos con pesos máximos, el acento estará sobre la fuerza máxima [4].

CONSENSO Y ANÁLISIS DE SOLUCIONES

El uso de peso de arrastre, en un rango entre 60 a 120 kg, los cuales serán elevados por un mecanismo y este, debe ser dependiente de la potencia que ejerza el deportista durante su desplazamiento.

Se presentaron 3 propuestas, que se detallan a continuación:

Propuesta 1

La vista del primer modelo es mostrada en la figura 1, en la cual se describen los componentes más sobresalientes del equipo. El tambor superior (1) mantiene enrollado un cable de 12 metros de longitud. El tambor inferior (2) mantiene enrollado un cable de 2 metros de longitud y sujetará la canasta del peso de arrastre por la ranura inferior de la caja (5). Se emplea una caja de transmisión de engranes rectos (3), con relación 15:1

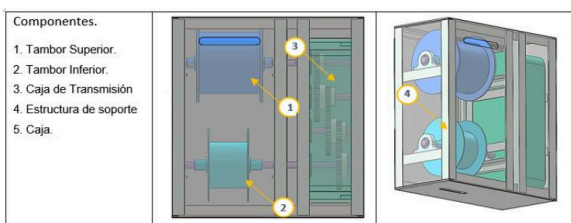


Figura 1.- Propuesta 1.

Propuesta 2

La figura 2 muestra una vista general de la segunda propuesta. La diferencia con respecto al primer modelo es la caja de transmisión (3) de engranes planetarios. Este tipo de mecanismo reduce notablemente el espacio, y permite posicionar el tambor superior (1) sobre el mismo eje con el tambor inferior (2).

La secuencia de operaciones complementarias equivale a la sugerida en el primer concepto, con la diferencia de la caja de transmisión.

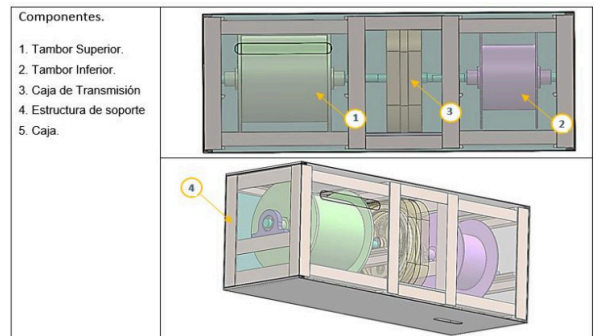


Figura 2.- Propuesta 2.

Propuesta 3

En la Figura 3, se aprecia la vista general del modelo 3, la diferencia entre los otros modelos se encuentra en la caja de transmisión (3) de catarinas y cadenas. Siendo los materiales comerciales hace de este modelo el más económico en comparación a los modelos anteriores.

La secuencia de operaciones complementarias es similar al modelo presentado en la figura 1.

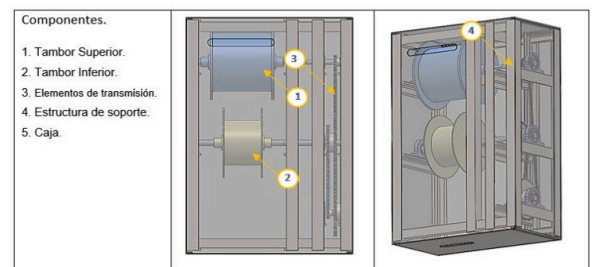


Figura 3.- Propuesta 3.

Para la selección de alternativas, se consideraron variables como costo de materiales, tiempo de adquisición de materiales, costos de fabricación, entre otros, los cuales se presentan en la tabla 1.

	Propuesta 1	Propuesta 2	Propuesta 3
Inversión.	Bajo	Alto	Bajo
Adquisición de elementos comerciales.	Intermedio	Alto.	Intermedio
Manufactura de elementos diseñados.	Bajo	Intermedio	Bajo
Ensamble	Intermedio	Intermedio	Intermedio

Tabla 1. Evaluación de características de alternativas presentadas.

Un factor importante considerado, es la selección de materiales comerciales para reducir costos y tiempos de adquisición de elementos comerciales y manufactura de elementos diseñados. Siendo las propuestas 1 y 3 ideales en este factor. Optando para desarrollar la 3.

MODELOS Y PROTOTIPOS.

Una vez que se tiene una propuesta preliminar del diseño básico, abordando los cálculos de los elementos diseñados, entre ellos, las flechas de transmisión mediante el diseño de esfuerzos combinados, el uso del software para cálculo de carretes de Ingersoll Rand© y el diseño por esfuerzos a cortante. Otro elemento de cálculo de diseño son la placa base de peso de arrastre, determinando el espesor mínimo de la placa y tubo estructural correspondiente.

Los elementos analizados para su diseño y requieren de algún cálculo son:

1. Flechas de transmisión de potencia.
2. Carretes para cable de acero.
3. Placa base de peso de arrastre.

Para efectos de cálculo, en la Figura 4.- Vista frontal con referencia al modelo. Elementos del sistema de transmisión de potencia. y Figura 5.- Vista superior con referencia al modelo. Elementos del sistema de transmisión de potencia., se presenta el esquema con los elementos que componen

al sistema mecánico de transmisión de la potencia.

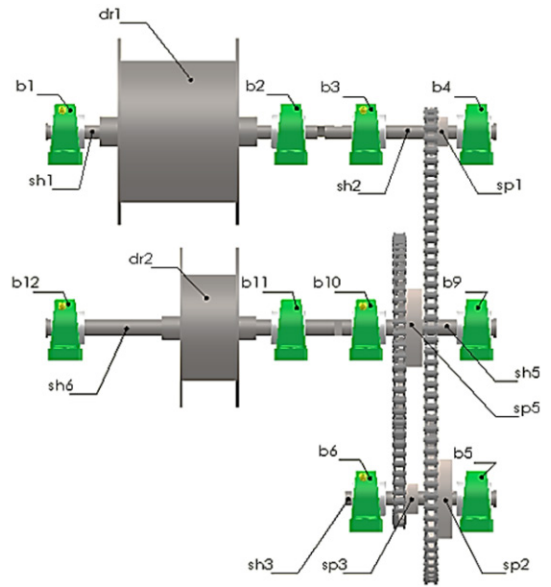


Figura 4.- Vista frontal con referencia al modelo. Elementos del sistema de transmisión de potencia.

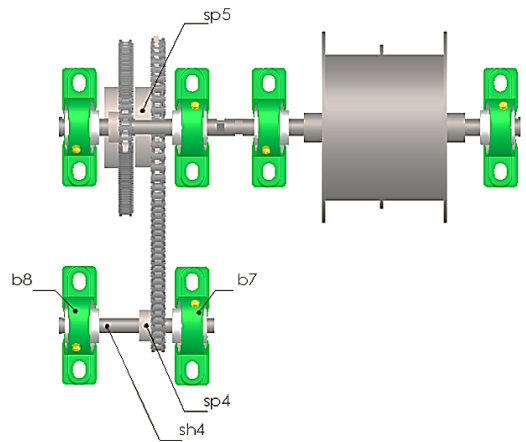


Figura 5.- Vista superior con referencia al modelo. Elementos del sistema de transmisión de potencia.

Donde b_1 - b_{12} son chumaceras radiales de piso, sh_1 - sh_6 son flechas de transmisión de potencia, sp_1 - sp_5 son catarinas y dr_1 , dr_2 son carretes para cables de acero.

Conocer el par de torsión T_0 es requerido para el análisis de los esfuerzos y diseño de las flechas de transmisión de potencia (sh_6 a sh_1). Este par se determina mediante el análisis estático en el carrete dr_2 , y es el par generado de la fuerza F_0 por el radio del carrete dr_2 .

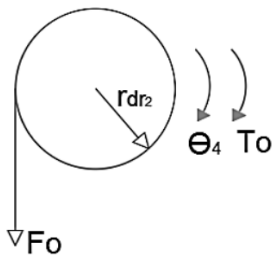


Figura 6.- Diagrama de cuerpo libre del carrete para cable dr_2 .

En función de la Figura 6.- Diagrama de cuerpo libre del carrete para cable dr_2 se determinan los siguientes aspectos:

$$F_0 = (m_d + m_{pb}) * g \quad (1)$$

Donde m_d es la masa en kg del peso de arrastre (120 kg) y m_{pb} es la masa en kg de la placa base que soporta el peso de arrastre (13.13 kg), g es la constante de gravedad.

$$\begin{aligned} (F_0 * r_{dr2}) - T_0 &= 0 \\ T_0 &= F_0 * r_{dr2} = 1.306 \text{ kN} * 0.06\text{m} \\ T_0 &= 78.36 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (2)$$

La dimensión requerida (diámetro mínimo) para las flechas, se obtiene calculando los esfuerzos máximos de cada material, mediante el diseño por [9].

- A. Diseño por combinación de esfuerzos.
- B. Diseño por esfuerzos a torsión.

El primer diseño se realiza considerando el área transversal mínima para cada flecha, debido a la concentración de esfuerzos máximos por torsión en esas zonas; el segundo cálculo de diseño se usa considerando toda la longitud de la flecha.

Después de determinado el par T_0 aplicado sobre la flecha y seleccionado el material de la flecha, el diseñador lleva los valores de T_0 y del esfuerzo máximo permisible a la fórmula de torsión elástica.

La selección de elementos comerciales, corresponde a la evaluación y selección de

cadena y catarinas, mediante el uso de tablas de fabricantes se seleccionan los elementos mecánicos de transmisión de la potencia. La selección de las chumaceras está determinado por los cálculos arrojados en el diseño de las flechas de transmisión.

Si la fuerza se transfiere hacia el eje y desde el por medio de engranes o ruedas dentadas, las fuerzas ejercidas sobre los dientes de los engranes son equivalentes a sistemas de pares de fuerzas aplicados en los centros de las secciones transversales correspondientes. Esto significa que el eje está sometido a una carga transversal y a una carga de torsión.

Los esfuerzos cortantes producidos en el eje por las cargas transversales por lo general son mucho más pequeños que los provocados por los pares de torsión, por lo cual no se incluirán en este análisis. Sin embargo, los esfuerzos normales debidos a las cargas transversales, pueden ser muy grandes y debiera tomarse en cuenta su contribución al esfuerzo cortante máximo τ_{max} .

Considerando $\sigma_m = Mc/I$ y $\tau_{max} = Tc/J$, se determina el valor del esfuerzo cortante máximo.

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{2}\right)^2 + (\tau_m)^2} = \sqrt{\left(\frac{Mc}{2I}\right)^2 + \left(\frac{Tc}{J}\right)^2} \quad (3)$$

Se deduce que la razón mínima permisible J/c para la sección transversal es

$$\frac{J}{c} = \frac{(\sqrt{M^2 + T^2})_{max}}{\tau_{perm}} \quad (4)$$

El mínimo valor permisible para el radio de la flecha es

$$c = \left[\frac{2(\sqrt{M^2 + T^2})_{max}}{\pi * \tau_{perm}} \right]^{1/3} \quad (5)$$

Donde c es el radio en mm; M es el momento de flexión máximo en Nm; T es el par de torsión máximo en Nm; τ_{perm} es el esfuerzo permisible del material en N/m^2 .

Para las diferentes flechas, se realiza un análisis tipo como el que se describe. Para efectos de cálculo, se supondrá una barra de 19mm diámetro para cada flecha, de material Acero AISI 1045, con una masa de 2.5 kg/m. Sobre la flecha sh_6 se ubica 2 chumaceras en cada extremo, también el carrete dr_2 . Determinando la fuerza W_{sh} , W_b ilustrado en la figura 7.

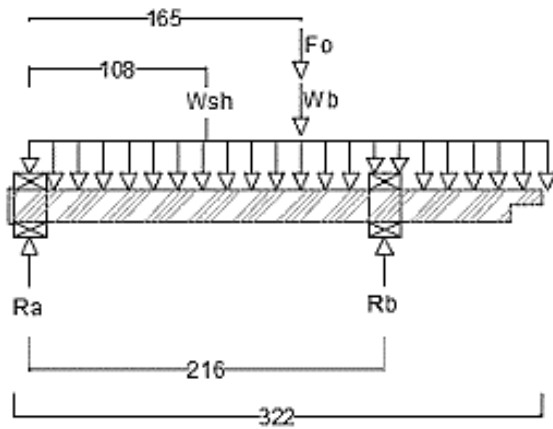


Figura 7.- Diagrama de cuerpo libre de la flecha sh_6 , W_{sh} es el peso de la flecha en N; W_b es el peso del carrete en N; F_o es la suma de los pesos de peso de arrastre y la placa base, en N; R_a y R_b son la fuerza de reacción en chumaceras, en N.

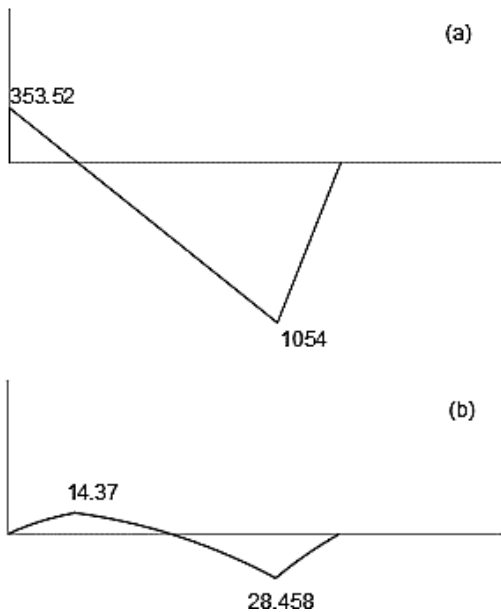


Figura 8.- Fuerzas que actúan sobre la flecha sh_6 ; (a) diagrama de cortante y (b) diagrama de momento.

Tomando la ecuación. (6) para el mínimo radio permisible de diseño.

El esfuerzo máximo por torsión ocurre en el área de sección transversal de menor dimensión, para este caso se produce en el extremo B, como se observa en la Figura 9, este cálculo se delimita al esfuerzo por torsión en el área B.

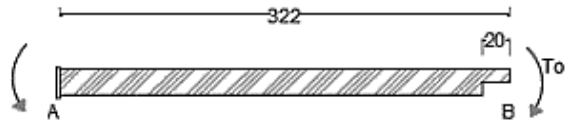


Figura 9.- Flecha sh_6 sometida a un par de torsión T_o .

Con base en los cálculos realizados similares a los descritos anteriormente, los resultados obtenidos se presentan las tablas 2 y 3, las flechas sh_2 y sh_4 no son críticas para el sistema por lo que se omiten los cálculos de diseño.

	Diámetro mínimo requerido. (mm)		
	AISI 1045	A36	Aluminio
sh_1	6.22	5.73	7.21
sh_2			
sh_3	9.42	8.82	12.19
sh_4			
sh_5	14.95	14.00	19.76
sh_6	15.23	14.31	19.76

Tabla 2.- Diámetro mínimo requerido para flechas [diseño por combinación de esfuerzos.]

	Diámetro mínimo requerido. (mm)		
	AISI 1045	A36	Aluminio
sh_1	7.64	7.16	9.89
sh_6	18.84	17.84	24.39

Tabla 3.- Diámetro mínimo requerido para flechas [diseño por esfuerzos a torsión en extremos con media caña.]

En el diseño de los carretes para cables se considera el sitio web de Ingersoll Rand, el cual cuenta con un simulador para estimar la capacidad del carrete. [13]

Figura 10.- Estimador de la capacidad del carrete. Fuente: Ingersoll Rand.

DESARROLLO DE LA ECUACIÓN DE POTENCIA

La flecha sh_1 , sh_2 cuenta con un θ_1 (desplazamiento angular), mientras la flecha sh_3 cuenta con θ_2 . Las flechas sh_4 y sh_5 , sh_6 con θ_3 y θ_4 , respectivamente.

Para sistemas con engranes, las impedancias mecánicas de rotación pueden ser reflejadas a través de los trenes de engranes por multiplicar la impedancia mecánica por la relación [15].

Donde la impedancia de la flecha de origen, es reflejada a la flecha destino.

Las bandas y cadenas sirven para el mismo propósito que el tren de engranes excepto que permiten la transferencia de energía sobre una distancia mayor sin utilizar un número excesivo de engranes [14].

En los presentes cálculos se suponen flechas rígidas, esto simplifica el desarrollo de la ecuación de potencia.

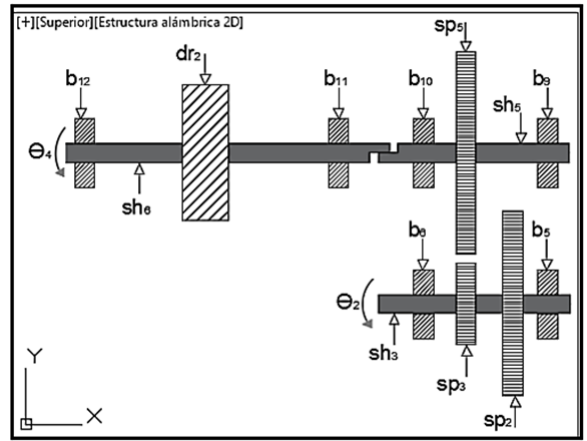


Figura 11.- Diagrama de componentes de las flechas sh_5 , sh_6 y sh_3 .

De la Figura 11, reflejando los elementos de impedancia mecánica sobre la flecha sh_5 - sh_6 en la flecha sh_3 .

$$J_{eq} = \left[(J_{sp_5} + J_{dr_2}) * \left(\frac{N_{sp_3}}{N_{sp_5}} \right)^2 + J_{sp_3} + J_{sp_2} \right] \ddot{\theta}_2 \quad (6)$$

$$b_{eq} = \left[(b_{12} + b_{11} + b_{10} + b_9) * \left(\frac{N_{sp_3}}{N_{sp_5}} \right)^2 + b_6 + b_5 \right] \dot{\theta}_2 \quad (7)$$

El par de torsión T_{sh_3} sobre la flecha sh_3 es

$$T_{sh_3} = \left[(J_{sp_5} + J_{dr_2}) * \left(\frac{N_{sp_3}}{N_{sp_5}} \right)^2 + J_{sp_3} \right] \ddot{\theta}_2 + \left[(b_{12} + b_{11} + b_{10} + b_9) * \left(\frac{N_{sp_3}}{N_{sp_5}} \right)^2 + b_6 + b_5 \right] \dot{\theta}_2 \quad (8)$$

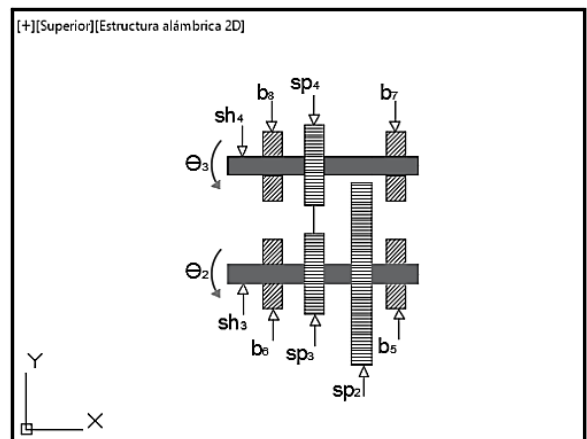


Figura 12.- Diagrama de componentes de las flechas sh_4 y sh_3 .

De la Figura 12, reflejando la flecha sh_4 en sh_3

$$J_{eq} = \left[(J_{sp4}) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp4}} \right)^2 \right] \ddot{\theta}_2 \quad (9)$$

$$b_{eq} = \left[(b_8 + b_7) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp4}} \right)^2 \right] \dot{\theta}_2 \quad (10)$$

Integrando la ecuación (8)

$$T_{sh3} = \left[(J_{sp5} + J_{dr2}) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp5}} \right)^2 + (J_{sp4}) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp4}} \right)^2 + J_{sp3} + J_{sp2} \right] \ddot{\theta}_2 \\ + \left[(b_{12} + b_{11} + b_{10} + b_9) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp5}} \right)^2 \right. \\ \left. + (b_8 + b_7) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp4}} \right)^2 + b_6 + b_5 \right] \dot{\theta}_2$$

Reflejando la flecha sh_3 en $sh_1 - sh_2$

$$J_{eq} = \left[\left[(J_{sp5} + J_{dr2}) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp5}} \right)^2 + (J_{sp4}) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp4}} \right)^2 \right. \right. \\ \left. \left. + (J_{sp3} + J_{sp2}) \right] * \left(\frac{N_{sp1}}{N_{sp2}} \right)^2 \right. \\ \left. + (J_{sp1} + J_{dr1}) \right] \ddot{\theta}_1 \quad (11)$$

$$b_{eq} = \left[\left[(b_{12} + b_{11} + b_{10} + b_9) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp5}} \right)^2 + (b_8 + b_7) \right. \right. \\ \left. \left. * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp4}} \right)^2 + (b_6 + b_5) \right] * \left(\frac{N_{sp1}}{N_{sp2}} \right)^2 \right. \\ \left. + (b_1 + b_2 + b_3 + b_4) \right] \dot{\theta}_1 \quad (12)$$

$$T_b = T_{sh1-sh2} = J_{eq} + b_{eq} \quad (13)$$

$$T_b = \left[\left[(J_{sp5} + J_{dr2}) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp5}} \right)^2 + (J_{sp4}) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp4}} \right)^2 \right. \right. \\ \left. \left. + (J_{sp3} + J_{sp2}) \right] * \left(\frac{N_{sp1}}{N_{sp2}} \right)^2 \right. \\ \left. + (J_{sp1} + J_{dr1}) \right] \ddot{\theta}_1 \\ + \left[\left[(b_{12} + b_{11} + b_{10} + b_9) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp5}} \right)^2 \right. \right. \\ \left. \left. + (b_8 + b_7) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp4}} \right)^2 + (b_6 + b_5) \right] \right. \\ \left. * \left(\frac{N_{sp1}}{N_{sp2}} \right)^2 + (b_1 + b_2 + b_3 + b_4) \right] \dot{\theta}_1 \quad (14)$$

Donde T_b es el par resultante de las impedancias mecánicas sobre la flecha $sh_1 - sh_2$. El cálculo de la fuerza par T_o , producido

por el peso de arrastre, se determina por el radio del carrete dr_2 y θ_4 (ver figura 6), en la flecha $sh_5 - sh_6$.

$$T_o = F_o * r_{dr2} * \theta_4 \quad (15)$$

Reflejando sobre la flecha $sh_1 - sh_2$

$$T_a = \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp5}} \right) * \left(\frac{N_{sp1}}{N_{sp2}} \right) * F_o * r_{dr2} \quad (16)$$

Integrando la ecuación (16) en (14).

$$T_b = \left[\left[(J_{sp5} + J_{dr2}) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp5}} \right)^2 + (J_{sp4}) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp4}} \right)^2 \right. \right. \\ \left. \left. + (J_{sp3} + J_{sp2}) \right] * \left(\frac{N_{sp1}}{N_{sp2}} \right)^2 \right. \\ \left. + (J_{sp1} + J_{dr1}) \right] \ddot{\theta}_1 \\ + \left[\left[(b_{12} + b_{11} + b_{10} + b_9) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp5}} \right)^2 \right. \right. \\ \left. \left. + (b_8 + b_7) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp4}} \right)^2 + (b_6 + b_5) \right] \right. \\ \left. * \left(\frac{N_{sp1}}{N_{sp2}} \right)^2 + (b_1 + b_2 + b_3 + b_4) \right] \dot{\theta}_1 \\ + \left[\left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp5}} \right) * \left(\frac{N_{sp1}}{N_{sp2}} \right) * F_o * r_{dr2} \right] \quad (17)$$

Las fuerzas que actúan sobre el carrete dr_1 es la tensión F_b sobre el cable de acero, el cual conecta el carrete dr_1 y el deportista, como se muestra en la figura 13,

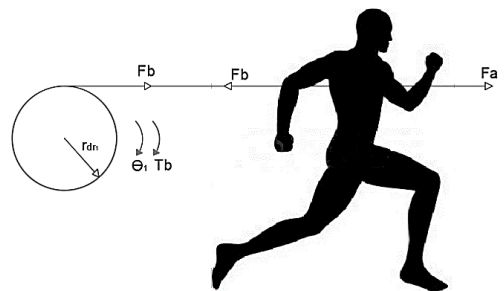


Figura 13.- Diagrama de fuerzas externas en el carrete dr_1 y el deportista.

Con el diagrama del cuerpo libre del deportista y aplicando la segunda ley de Newton, se determina la fuerza F_a en función de θ_1 .

$$\begin{aligned}
 F_a = & \left[(m_s * r_{dr1}) + \left[\left(\frac{J_{sp5} + J_{dr2}}{r_{dr1}} \right) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp5}} \right)^2 + \left(\frac{J_{sp4}}{r_{dr1}} \right) \right. \right. \\
 & * \left. \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp4}} \right)^2 + \left(\frac{J_{sp3} + J_{sp2}}{r_{dr1}} \right) * \left(\frac{N_{sp1}}{N_{sp2}} \right)^2 \right. \\
 & + \left. \left. \left(\frac{J_{sp1} + J_{dr1}}{r_{dr1}} \right) \right] \ddot{\theta}_1 \right. \\
 & + \left[\left(\frac{b_{12} + b_{11} + b_{10} + b_9}{r_{dr1}} \right) \right. \\
 & * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp5}} \right)^2 + \left(\frac{b_8 + b_7}{r_{dr1}} \right) * \left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp4}} \right)^2 \\
 & + \left. \left. \left(\frac{b_6 + b_5}{r_{dr1}} \right) * \left(\frac{N_{sp1}}{N_{sp2}} \right)^2 \right. \right. \\
 & + \left. \left. \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3 + b_4}{r_{dr1}} \right) \right] \dot{\theta}_1 \right. \\
 & + \left. \left[\left(\frac{N_{sp3}}{N_{sp5}} \right) * \left(\frac{N_{sp1}}{N_{sp2}} \right) * \frac{F_o * r_{dr2}}{r_{dr1}} \right] \right] \quad (18)
 \end{aligned}$$

Donde m_s es la masa del deportista en kg; F_o es la fuerza del peso de arrastre en N; $N_{\#}$ es el número de dientes de la catarina; $J_{\#}$ es el momento de inercia del elemento en kg-m²; $b_{\#}$ es la viscosidad en N-m-s; r_{dr1} y r_{dr2} son los radios de los carretes en m; $\ddot{\theta}_1$ es la aceleración angular en rad/s²; $\dot{\theta}_1$ es la velocidad angular en rad/s; y θ_1 es el desplazamiento angular de la flecha sh1 en rad.

Es posible conocer la potencia aplicada por el deportista, por la fórmula $P=F_a \times v$, donde F_a es la fuerza aplicada y v la velocidad en un instante dado.

$$P = F_a \times v \quad (19)$$

El uso del método de diferencias finitas de alta exactitud para estimar la velocidad y aceleración en un tiempo t , mediante el método de diferencias divididas finitas centradas [3,5], dado dos intervalos de tiempo consecutivos de la misma longitud (t_1, t_2) y (t_2, t_3) , puede estimarse la velocidad en el tiempo t_2 usando la fórmula

$$v(t_2) \approx \frac{\theta(t_3) - \theta(t_1)}{t_3 - t_1} \quad (20)$$

Con base en los cálculos realizados similares a los descritos anteriormente en la ecuación 20, es posible estimar la aceleración

a partir de la velocidad ya estimada.

$$a(t_2) \approx \frac{v(t_3) - v(t_1)}{t_3 - t_1} \quad (21)$$

DIBUJOS DE PRODUCCIÓN O FUNCIONAMIENTO

El diseño final se presenta en las siguientes figuras.

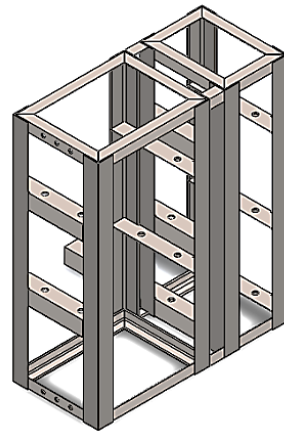


Figura 14.- Vista general de la estructura de base. Soporta los elementos de transmisión de potencia: carretes para cable de acero, catarinas, cadenas, chumaceras, etc.

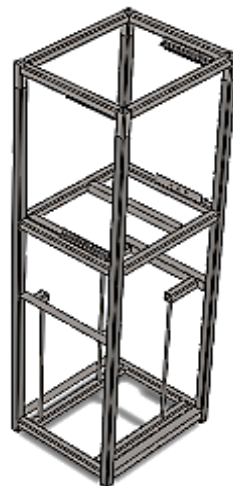


Figura 15.- Vista general de la estructura de soporte. Proporciona rigidez y sustento a la estructura de base, además, soporta el peso de arrastre junto con su plato base.

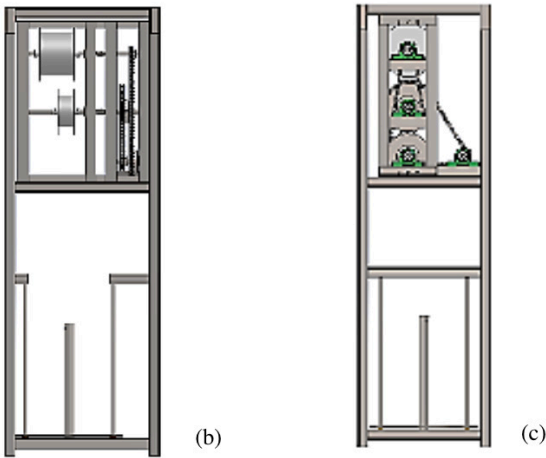
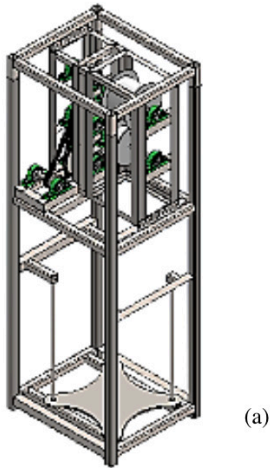


Figura 16.- Vista del modelo del equipo. (a) Vista en isométrico, (b) Vista frontal, (c) Vista lateral derecha.

RESULTADOS

El equipo descrito anteriormente, transitó de la etapa de diseño a la etapa de construcción. Las estructuras de base y de soporte (figuras 14 y 15), así como los elementos de diseño (carretes, plato para el peso de arrastre y flechas de transmisión) se fabricaron con perfiles estructurales comerciales, posteriormente el montaje en el equipo como se muestran las siguientes figuras.

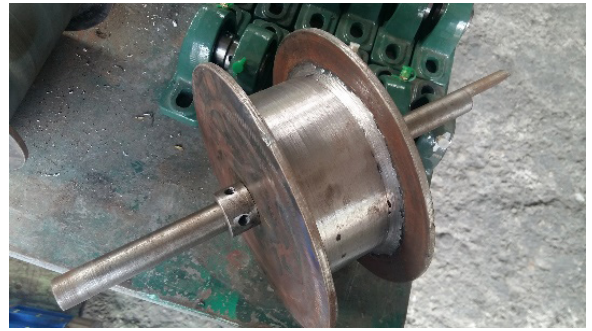


Figura 17. Manufactura de elementos mecánicos. Construcción de carretes para cable de acero.

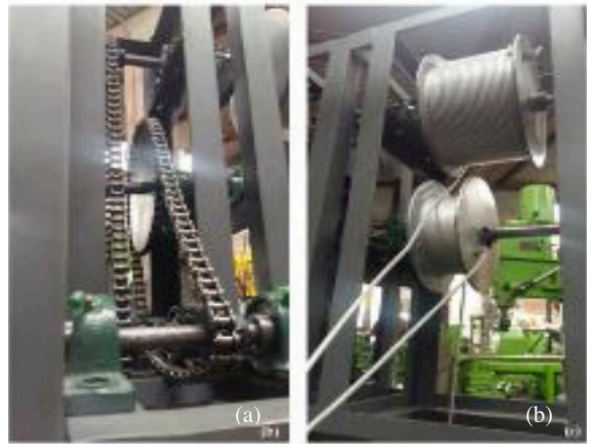


Figura 18. Montaje de elementos mecánicos. (a) Montaje de catarinas y cadenas y (b) Montaje de carretes con el mecanismo de transmisión.

La siguiente etapa fue la instrumentación, y actualmente se encuentra en fase de calibración dentro de una empresa dedicada al monitoreo de parámetros psicomotrices de atletas. Los primeros resultados de simulación muestran los siguientes datos.

	Tiempo (s)	Distancia (m)	Velocidad (m/s)	Aceleración (m/s ²)	Fuerza (N)	Potencia (W)
1	0.00	0.00	0.00	6.560	85.407	0.000
2	0.25	0.192	0.768	6.400	166.014	90.491
4	0.50	0.772	1.544	5.248	401.066	159.629
4	0.75	1.253	1.671	3.264	583.319	131.269
5	1.00	2.139	2.139	2.432	954.063	145.770
6	1.25	3.193	2.554	1.824	1399.788	154.618
7	1.50	4.367	2.911	1.024	1895.011	147.075
8	1.75	5.620	3.212	0.896	2432.622	157.100
9	2.00	6.936	3.468	0.896	2998.580	169.641
10	2.25	8.308	3.692	0.832	3587.932	177.660
11	2.50	9.734	3.893	0.864	4201.858	188.906
12	2.75	11.213	4.077	0.832	4837.940	196.206
13	3.00	12.745	4.248	0.800	5496.670	202.732

Tabla 4. Resultados de simulación del desplazamiento-tiempo de un deportista con 94 kg de masa corporal y 60 kg de peso de arrastre añadidos, durante 3 segundos, la información fue recogida cada 50 ms.

Los datos mostrados representan los tiempos parciales cada 250 milisegundos, a partir de los datos recogidos se calculó aproximaciones para la velocidad; de manera similar, se calcularon aproximaciones para las aceleraciones basados en las velocidades estimadas, con un porcentaje de error de 0.03% por redondeos numéricos en el análisis.

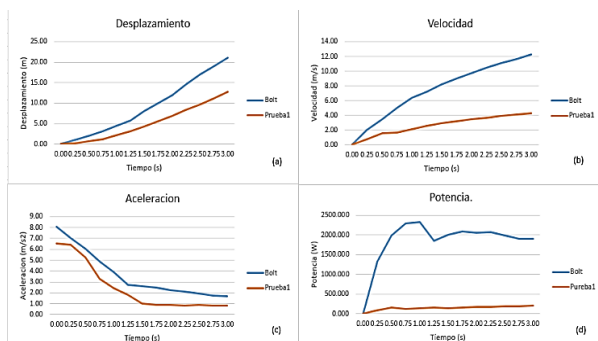


Figura 18. Resultados de simulación durante 3 s, comparados con la curva de potencia de Usain Bolt en las olimpiadas de Beijing 2008 [1,11]. a) desplazamiento lineal; b) velocidad; c) aceleración; d) potencia aplicada.

Los primeros comparativos de la ecuación de potencia contra los valores registrados se presentan en la figura 18. Se exponen las gráficas de potencia, velocidad, aceleración y desplazamiento entre un atleta de alto rendimiento y los resultados obtenidos de la simulación, durante 3 segundos.

En la figura 19 se representa la gráfica de fuerza aplicada, resultados obtenidos por simulación; con base en los datos registrados y la gráfica, se obtienen los valores de fuerza de arranque durante los primeros 200 ms, de 136.02 ± 0.03 N; la fuerza explosiva en el intervalo, 0.25 a .50 segundos, con una tasa de 470.1 ± 0.03 . La fuerza y velocidad son máximas a los 3 s con, 202.73 ± 0.03 W de potencia motora.

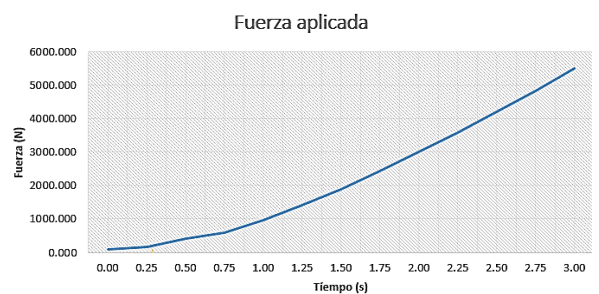


Figura 19. Resultados de simulación sobre la fuerza aplicada.

CONCLUSIONES

Al término de la presente investigación, se generó:

a) Un diseño donde se empleó etapas de la filosofía CAD/CAM, para ello se utilizó Solid Works™. El cual ha demostrado optimizar tiempo de diseño, sobre todo en la fase de ajuste antes de la construcción,

b) La fabricación de un equipo para determinar potencia en la velocidad motora, potencia en la fuerza motora, fuerza muscular explosiva y fuerza de arranque, con la restricción de tomar los datos para diferentes atletas con diferentes parámetros de carga en una distancia de 10 m.

c) Una serie de registros mediante simulación, los cuales fueron comparados con atletas de alto rendimiento, mostrando que nuestro modelo es viable al calcular los parámetros previstos.

Sin embargo, se debe instrumentar el equipo para obtener datos científicos y desarrollar modelos o pruebas estandarizadas para atletas.

REFERENCIAS

1. Barrow, J. D. (2012). *Mathletics: a scientist Explains 100 Amazing Things about the world of Sports*. New York. London: W. W. Norton & Company
2. Budynas, R., & Nisbett, J. (2012). *Diseño en Ingeniería Mecánica de Shigley*. Mc Graw Hill.
3. Burden, R. L., & Douglas Faires, j. (septima edicion). *Analisis numerico*. Distrito Federal, Mexico: Thomson Learning.
4. Burkett, B. (2010). *Sport Mechanics for Coaches*. U.S.A.: Human Kinetics.
5. Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2007). Metodos numericos para ingenieros. En S. C. Chapra, *Metodos numericos para ingenieros* (págs. 665-671). Distrito Federal, Mexico: Mc-Graw Hill Interamericana.
6. Corsino, E. L. (11 de Julio de 2000). *medicion de energia, trabajo y potencia y estimacion del gasto energetico*. Obtenido de Saludmed.com: <http://www.saludmed.com>
7. Cuadrado Sáenz, G., Pablos Abella, C., & García Manso, J. (2006). *Aspectos Metodológicos y Fisiologicos del Trabajo de Hipertrofia Muscular*. España: Wanceulen Editorial Deportiva.
8. Dietrich, M., Klaus, C., & Klaus, L. (2001). *Manual de metodologia del entrenamiento deportivo*. Barcelona: Editorial PAidotribo.
9. Ferdinand, B. P., Russell Johnston, Jr, E., DeWolf, J. T., & Mazurek, D. F. (5ta. edicion). diseño de ejes de transmision. En B. P. Ferdinand, J. E. Russell Johnston, J. T. DeWolf, & D. F. Mazurek, *Mecanica de materiales*. (págs. 165-168, 500-504). Mc Graw Hill
10. Gonzalez Badillo, J. J., & Gorostiaga Ayestarán, E. (2002). *Fundamentos del entrenamiento de la fuerza. Aplicacion al alto rendimiento deportivo*. Barcelona: INDE.
11. H.K., E., J. R., F., O., L., & I. K. , W. (2009). Velocity dispersions in a cluster of stars: How fast could Usain Bolt have run? *American Journal of Physics*, 224
12. Iglesias Pérez, O., Quetglas González, C. Z., Martínez Quetglas, R., Álvarez Herrera, I., & San Martín Pérez, J. (2013). Definición biomecánica de la fuerza explosiva. *EFdeportes.com*.
13. *Ingersoll Rand*. (s.f.). Obtenido de Ingersoll Rand: <https://www.ingersollrandproducts.com/en-us.html>
14. Kuo, B. C. (1996). *Sistemas de Control Automatico*. Naucalpan de Juarez, Edo. de Mexico: Prentice-Hall Hispanoamerica, S.A.
15. Nise, N. S. (2011). *Control Systems Engineering*. Jefferson: John Wiley & Sons, INC.
16. Ramón Suarez, G. (2009). *Biomecánica deportiva y control del entrenamiento*. Medellín, Colombia: Funámbulos editores
17. Ruiza de la Cruz, O. A., & Leal Rios, L. F. (2007). Fuerza Explosiva en el Futbolista Profesional del Club Deportivo Independiente Medellin durante la segunda temporada competitiva del 2006. *Instituto Universitario de Educacion Fisica Medellin*.

18. Soriano, p. p. (2004). Análisis de parámetros biomecánicos durante la recepción en colchonetas y su influencia en los mecanismos de lesión en gimnasia deportiva.
19. Vanlandenwijck, Y., Theisen, D., & Daly, D. (2001). Wheelchair propulsion biomechanics. Implication for wheelchair sports. *Sports Med*, 31.
20. Vargas, R. (2007). *Diccionario de teoría del entrenamiento deportivo*. Mexico: Universidad Nacional Autónoma de México.
21. Zissu, M. (2005- 2012). Evaluación biomecánica del atleta de alto rendimiento. *Instituto Nacional de Deportes Universidad Pedagógica Experimental Libertador – IPC*, 4-5.