



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

ARTÍCULO CIENTÍFICO

TEMA

**“DISEÑO DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA PARA UNA PRÓTESIS
BIOMEATRÓNICA DE RODILLA APROVECHANDO LA ENERGÍA
MECÁNICA”.**

**Autor: Andrés Edir Peralta Pozo
Director: Ing. Diego Ortiz**

**IBARRA - ECUADOR
2017**

DISEÑO DEL SUMINISTRO DE ENERGÍA PARA UNA PRÓTESIS BIOMECASTRÓNICA DE RODILLA APROVECHANDO LA ENERGÍA MECÁNICA.

Andrés Edir Peralta Pozo
Carrera de Ingeniería en Mecatrónica, Universidad Técnica del Norte
Ibarra, Ecuador
andresperaltapozo@gmail.com

Resumen

Ecuador al ser un país inmerso en conflictos bélicos ha experimentado en años pasados, una gran cantidad de accidentes de tránsito, problemas derivados de patologías médicas, y enfermedades como la diabetes, ha generado una gran demanda de dispositivos protésicos para tratar de ayudar a la población, pero lastimosamente los afectados por esta problemática no cuentan con los recursos económicos necesarios para adquirir una prótesis inteligente y eficiente, limitándose en muchos de los casos a utilizar equipos netamente estéticos, que no garantizan una incursión en la sociedad actual.

Por tal motivo el desarrollo de ésta investigación pretende ayudar a la construcción de prótesis mecatrónicas a bajo costo, eficientes, estéticas, y auto recargables, utilizando energías limpias y lo mejor de todo de construcción ecuatoriana, que facilitará el desarrollo normal de las actividades diarias de los pacientes, tomando en cuenta que aprovecharemos los movimientos propios del cuerpo humano en el desarrollo de la marcha diaria.

Los componentes mecánicos usados están diseñados para brindar comodidad y confort al usar el dispositivo, Los mismos fueron mecanizados en nylon bajo los espesores de diseño planteados, pero tras varias pruebas se determinó que en nuestro entorno no es posible manufacturar estos elementos por falta de equipo específico, por lo cual se estableció el funcionamiento bajo simulación por software.

El resultado del trabajo fue la determinación del diseño así también el modelamiento matemático y simulación del dispositivo.

Palabras Clave: Energía, Biomecatrónica, Generación de Energía, Modelo Matemático, Energía Mecánica, Marcha humana, Simulación.

Abstract

Ecuador being a country immersed in war conflicts has experienced in the past years, a great number of traffic accidents, problems derived from medical pathologies, and diseases such as diabetes, has generated a great demand for prosthetic devices to try to help the population , But unfortunately those affected by this problem do not have the economic resources to acquire an intelligent and efficient prosthesis, limiting in many cases to use purely aesthetic equipment, which does not guarantee an incursion into today's society.

Therefore, the development of this research aims to help the construction of mechatronic prostheses at low cost, efficient, aesthetic, and self-rechargeable, using clean energy and the best of Ecuadorian construction, which will facilitate the normal development of daily activities of The patients, taking into account that we will take advantage of the movements of the human body in the development of daily walking.

The mechanical components used are designed to provide comfort and comfort when using the device, they were machined in nylon under the proposed design thicknesses, but after several tests it was determined that in our environment it is not possible to manufacture these elements due to lack of specific equipment by which the operation was established under software simulation.

The result of the work was the determination of the design as well as the mathematical modeling and simulation of the device.

Keywords: Energy, Biomecatronics, Energy Generation, Mathematical Model, Mechanical Energy, Human March, Simulation.

1. Introducción

La energía es la capacidad de los cuerpos para realizar un trabajo y así producir cambios en los cuerpos que se aplica, o en otros cuerpos que interaccionan. Es decir, la energía es la capacidad de hacer funcionar las cosas mediante diversas formas. [1] Usando este concepto y con la ayuda de la tecnología actual, la ciencia de los materiales, la mecánica y los conocimientos de ingeniería se denomina al proyecto como una “Cosechadora de energía”.

De la misma manera en la última década, la sociedad se ha vuelto cada vez más dependiente de los dispositivos electrónicos como: teléfonos celulares, tabletas electrónicas, computadores personales y también dispositivos médicos como marcapasos, todos estos alimentados eléctricamente por baterías. [2] Por ello el desarrollo de este proyecto, permitirá recargar las baterías de los diversos dispositivos de utilización masiva en la actualidad y también abre la posibilidad para recargar baterías de prótesis biomecánicas de última generación.

Los recientes avances en el campo de la recolección de energía han conducido al desarrollo eficiente y sostenible usando tecnologías capaces de aprovechar la energía mecánica producida por el movimiento humano. [2] Estas tecnologías presentan una alternativa, la energía eléctrica, corriente suministrada por cualquiera baterías o pilas e incluso el combustible.

En este trabajo, se analiza en primer lugar la caminata humana o biomecánica y los métodos de recolección de energía más relevantes luego, el diseño de la cosechadora de energía biomecánica y el modelo matemático del sistema.

2. METODOLOGÍA

2.1. La Caminata Humana

El hombre se traslada de un sitio a otro debido a la acción de sus músculos, por medio de tres procesos que son: la marcha, la carrera y la natación; de estos tres procesos es necesario conocer la marcha y la carrera por lo tanto la marcha inicia con una inclinación del cuerpo hacia delante para encontrar equilibrio y evitar la caída, una de las piernas, se levanta del suelo y avanza esto se conoce como el paso, esto se repite con la pierna contraria llegando así a tener una sucesión de pasos conocido como marcha o caminata. La carrera en cambio es la sucesión de pasos pero el cuerpo nunca queda sobre sus dos pies como en la marcha, el cuerpo queda un instante totalmente suspendido. [3]

Para una recolección eficiente de energía se considera los conceptos básicos del movimiento de la rodilla tales como:

La Flexión, Consiste en el acercamiento de un cuerpo hacia otro específicamente acercar lo más posible la pierna al muslo.

La Extensión, es el proceso inverso a la flexión, los segmentos que habían sido acercados en la flexión ahora se separan.

2.2. Métodos de recolección de energía

En la actualidad existen muchas investigaciones relacionadas a la captación de energía, principalmente por el movimiento humano, la mayor parte de ellas se basan en capturar la energía cinética que produce el movimiento del cuerpo, y así poder convertirla en electricidad. Entre las principales investigaciones de captación energética se cita las más relevantes para el estudio.

Mochila de captación de energía

Este método captura el movimiento de los pies, mediante un par de cables independientes, que transmiten el movimiento a un sistema mecánico, capturado por un generador eléctrico, logrando generar en una marcha modesta desde 0,5W y en marcha normal a rápida hasta 7, 4 W. [4]

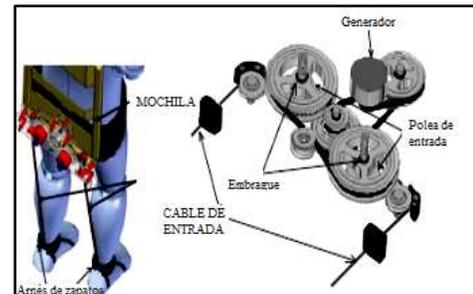


Fig. 1. mochila cosecha (A) Energía. (B) Los componentes de la energía mochila cosecha. [5]

Vigor impacto

Este sistema se aloja en el talón de un zapato, y consta de dos pequeños generadores más una caja de engranajes, adicionalmente una palanca para choque o impacto al caminar y apoyar el talón, logra generar 1.61 Watts durante el golpe de talón y una potencia media de 58,1 mW a través de toda la locomoción. [5]

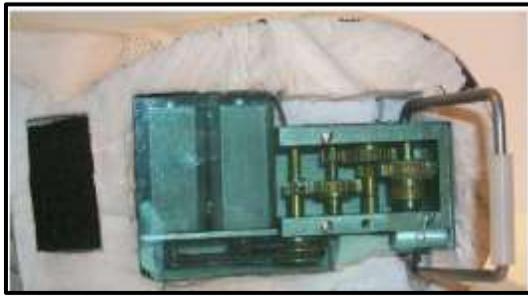


Fig. 2. Sistema de impacto en el talón de un zapato. [5]

Redes poliméricas interpenetrantes

Este sistema consta de un polímero dieléctrico, que al comprimirse y descomprimirse logra generar una potencia significativa máxima de 800mW

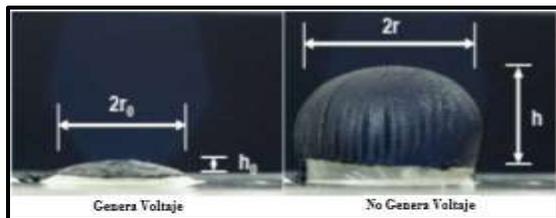


Fig. 3. Dispositivo electroelastometro [6]

Dispositivos piezoelectricos

Estos sistemas son capaces de generar una baja potencia eléctrica pero aun así cumplen un rol, muy importante en la generación de energía llegando a producir hasta 0.8W de potencia eléctrica. Generalmente son ubicados bajo la plantilla de un zapato siendo así casi imperceptibles. [7]

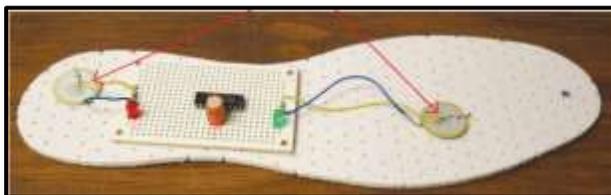


Fig. 4. Dispositivos piezoeléctricos en una plantilla. [7]

2.3. Generador de energía utilizando la locomoción humana.

En la actualidad no existe una investigación detallada del tipo de control y dispositivo mecánico que sea capaz de generar energía para la recarga energética de una prótesis biomecánica, especialmente con energías limpias, aprovechando el desarrollo de los movimientos humanos, y si las existieran no se tiene un conocimiento sobre el tipo y calidad de sistema de control instalado.

De la misma forma los estudios realizados por investigadores tienen problemas con el peso del dispositivo, la comodidad del equipo y los costos de fabricación [8] por tal motivo el sistema a desarrollarse intenta corregir estos parámetros negativos en los prototipos creados en el mundo dándole el elemento añadido de generar la energía básica para recargar una batería de una prótesis transfemoral para eliminar la molesta sombra que persigue a los desafortunados pacientes que por una u otra condición tuvieron que ser amputados una de sus extremidades inferiores dándoles la ventaja de utilizar una prótesis auto recargable la cual les mejore su inserción social y su entorno laboral ya que no dependerán de una toma eléctrica convencional por que la energía para la recarga la obtendrán con el desarrollo de su vida rutinaria.

El sistema consta de tres partes esenciales:

El acoplamiento **mecánico**, el cual toma el movimiento de la rodilla para convertirlo en un movimiento giratorio eficiente el cual permite obtener las revoluciones necesarias y una potencia suficiente para cargar la batería, además debe ser liviano y no producir un desgaste metabólico al ser humano.

El **control** debe tener la capacidad de conectar y desconectar el sistema mecánico ya que en todo el movimiento de la caminata humana es decir entre flexión y extensión no se produce energía, por lo tanto, el sistema de control brinda soporte para no perderla, también es el encargado de informar mediante señales visuales o sonoras que la batería ha bajado su carga.

La **generación** consta de un mini generador el cual convierte el movimiento mecánico en una fuerza eléctrica para cargar la batería; Todo este conjunto en un dispositivo capaz de mejorar y corregir los problemas encontrados en los diseños propuestos a nivel mundial.

3. PROCESO DE DISEÑO

Teniendo en consideración que el musculo vasto lateral y el vasto externo en una persona medianamente activan mide entre 8 y 13 cm, da la limitante que, toda la estructura no puede sobrepasar estas dimensiones [9], El sistema no debe ser de un elevado peso debido a que podría causar un esfuerzo excesivo y a la vez causante de una lesión parcial o permanente en la pierna que lo use.

Durante el proceso de locomoción se da un ciclo de aprovechamiento, es decir durante la fase flexo extensora de la rodilla, en la cual se aprovecha el ángulo de generación energética de 1 rad/s [8]

Aprovechando el ángulo proporcionado por la rodilla y las restricciones anatómicas de peso y dimensión se define el sistema de generación de energía, como una maquina

compuesta capaz de producir energía limpia por medio de la marcha.

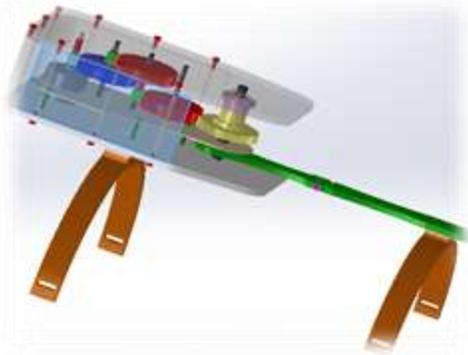


Fig. 5. Sistema de generación de energía aprovechando la energía mecánica de la rodilla

La transmisión de movimiento y aprovechamiento del ángulo de generación es transmitida de la pantorrilla hasta la articulación mediante una palanca de dos piezas las cuales son desacopladas para el transporte del dispositivo estas palancas son manufacturadas en polímero resistente de 6 milímetros y un perno tipo mariposa m3 para su unión.

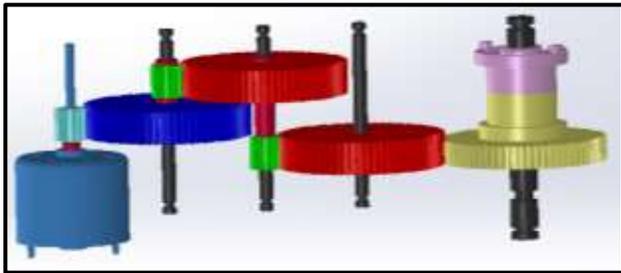


Fig.6. Tren de engranajes, ejes, sistema de acople y desacople generador y estabilizadores.

Tomando un análisis matemático se define el número de engranajes necesarios para amplificar las revoluciones por minuto producidas por la rodilla y obtener el mayor desempeño del generador, partiendo de las revoluciones generadas por la rodilla y el trabajo a máxima eficiencia del generador se establece que la relación de transmisión requerida por el sistema es igual a:

$$R_{max} = \frac{W \text{ de entrada al generador}}{W \text{ proporcionada por la rodilla}}$$

$$R_{max} = 219$$

Ecuación 1. Relación de transmisión requerida por el sistema

Conocida la relación rodilla generador se busca obtener la relación de transmisión de cada engrane piñón por su número de dientes.

$$R_{eng} = \frac{z \text{ de dientes engrane}}{z \text{ dientes piñón}}$$

$$R_{eng} = 5.81$$

Ecuación 2. Relación de transmisión Piñón – Engranaje.

Con las dos relaciones de transmisión más críticas del sistema se sustentará la utilización de tres pares de engranes.

$$R_{eng}^n = R_{max}$$

$$n = 3.1 \text{ veces}$$

Ecuación 3. Relación de transmisión requeridas.

El número de repeticiones o relaciones de transmisión requeridas permite diseñar la parte crítica del sistema, los engranajes los mismos que son encargados de transmitir, amplificar y acoplar la potencia del movimiento flexo – extensor de la rodilla y el generador.

REVOLUCIONES DE INGRESO AL GENERADOR

Para este cálculo es necesario obtener el equivalente de la relación de transmisión entre los engranajes conductores y conducidos.

$$e_{eq} = \frac{\text{producto de los conductores (dientes)}}{\text{producto de los conducidos (dientes)}}$$

$$e_{eq} = 198.496$$

$$RPM \text{ in} = e_{eq} \times rpm$$

$$RPM \text{ in} = 1984,96 \text{ rpm}$$

Ecuación 4. RPM de ingreso al generador

DISEÑO DE ENGRANAJES

Tomando las ecuaciones de diseño de engranajes rectos se tiene las ecuaciones y variables que llevan a generar el CAD de los engranajes. [10]

Datos de entrada.		Piñón	Engrane
Ángulo de presión (PA)		20,00	20,00
Número de dientes (N)		16,00	93,00
Módulo (MDL)		0,50	0,50
Diámetro de paso (PD)mm		8,00	46,00
Addendum (ADD) mm		0,50	0,50
Dedendum (DED) mm		0,579	0,579
Profundidad total (WD) mm		1,079	1,079
Holgura (CL) mm		0,079	0,079
Diámetro externo (OD) mm		9,00	47,50
Diámetro de raíz (RD) mm		6,843	45,343
Círculo base (BC) mm		7,518	43,696
Paso circular (CP) mm		1,571	1,571
Espesor circular diente (T) mm		0,785	0,785
Espesor de cabeza de diente (ADDc) mm		0,519	0,503
Profundidad de trabajo (WKG) mm		1,00	1,00
Ángulo del diente (grados)		11,250	1,935
GENERAL			
Radio exterior del piñón (Rop)		4,5	
Radio del círculo de base del piñón (Rbp)		1,632	
Radio exterior del engranaje (Roe)		23,75	
Radio del círculo de base del engranaje (Rbe)		9,4879	
Distancia entre centros (C)		27,25	
Relación de contacto (m)		1,69677	
Paso diametral(L)		2	

Fig.7. Resumen características de engranes y piñones.

4. MODELAMIENTO MATEMÁTICO

Para la obtención del modelo matemático del generador se analiza una muestra de valores de entrada en rpm y de salida de voltaje del generador con ayuda de un motor de 12 V de serie IG220019X00015R que posee un encóder magnético incremental el cual permite obtener el conteo de rpm enviadas al generador para luego ser señales de voltaje todo esto es posible por la interacción del software LabVIEW que brinda la facilidad de visualizar dichos cambios en tiempo real en el ordenador.



Fig.8. Motor y Generador para toma de muestra

Para tener una muestra significativa se toman cien datos a distintas revoluciones por minuto de entrada y los respectivos voltajes de salida del generador obteniendo así las primeras curvas de generación de voltaje y rpm de entrada, para luego ser utilizadas en el software MATLAB e identificar la función de transferencia idónea del comportamiento del generador.

Función de transferencia 3

Nº de polos: 2

Nº de ceros: 0

% de estimación: 88.98%

336.4

$$s^2 + 3280 s + 3.923e05$$

Considerando las características mecánicas del Nylon se desprecia la fricción y el rozamiento pues no se produce un desgaste excesivo en este material y la función de transferencia del tren de engranajes se basa en la iteración de la relación entre dientes de cada piñón conductor y conducido y la variación de rpm de la entrada de la rodilla.

$$\theta_4 = \frac{N_1 N_3 N_5}{N_2 N_4 N_6} \theta_1$$

Ecuación 5. Modelo matemático engranajes

MODELO DEL SISTEMA

Determinado el modelo matemático del generador Dc y el tren de engranajes se establece el modelo matemático del sistema completo partiendo de la rodilla hasta la salida eléctrica del sistema.

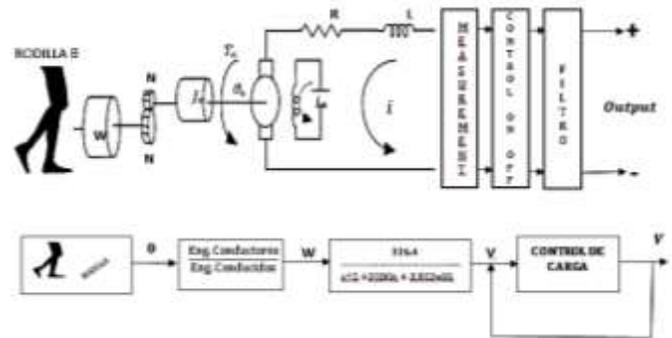


Fig. 9. Modelo matemático y de bloques

5. PRUEBAS Y RESULTADOS

Si se analiza un solo paso en la marcha se puede ver en la gráfica de voltaje vs RPM de entrada que es alta mente ascendente ya que a medida que se aumenta las revoluciones y el ángulo de ataque o generación, el voltaje va aumentando llegando a tener un voltaje de 1,7 en un solo paso y a condiciones ideales.

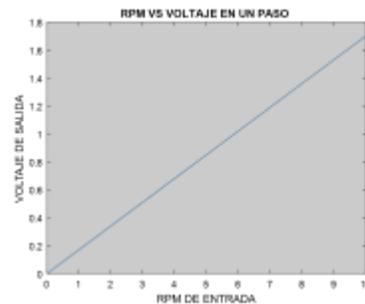


Fig. 10. Voltaje vs RPM en un paso

Si se toma en cuenta que en una marcha o caminata se va a dar muchos pasos y por ello muchas rpm seguidas lo cual producirá una multiplicación de rpm y un aumento de voltaje, lógicamente con una pérdida en el cambio de ciclo de caminado pero las estimaciones generadas en la experimentación y el modelo matemático se obtiene una gráfica de generación en 10 pasos a una marcha normal obteniendo 119100 rpm a la salida del tren de engranajes y generando un voltaje de 10.21 V suficiente para alimentar de energía circuitos electrónicos y generar carga para una batería, en la tablas siguientes puede observar los valores de experimentación de rpm y voltajes generados así también el estimado en pérdidas de un 5% en el cambio de ciclo.

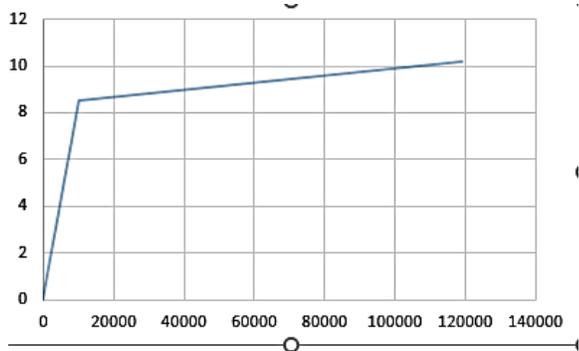


Fig.11. Voltaje vs RPM caminata 10 pasos

Los resultados que se observan en este proceso es:

- Se obtuvo valores de voltaje de entre 1 y 1.7 Voltios en un solo paso.
- Se logró el objetivo de un diseño llamativo y poco ridículo el cual brinde confort y utilidad.
- Existe efectividad en el diseño del sistema de cambio de ciclo.
- Se logró la generación de energía limpia con métodos mecánicos y aprovechando la marcha del hombre.

En general se puede decir que con un excelente maquinado de los elementos principales se estima que la generación mínima de energía estará bordeando los 10 a 15 voltios y a una corriente de 1 amperio lo cual permitiría en gran medida cargar una batería de litio sin problema como también suministrar energía a circuitos electrónicos.

6. Conclusiones

La presente investigación, permitirá obtener logros importantes, ya que los resultados obtenidos contribuirán a alcanzar el objetivo planteado. Este tipo de investigación es una experiencia inolvidable, debido a que mediante los conocimientos obtenidos en la carrera y los aportes de ésta investigación, generarán satisfacción e inquietud al ver el proceso cumplido, y el impacto social que tendrá en la comunidad.

Los resultados y el modelo matemático del sistema permitirán avanzar con la investigación de este diseño en trabajos posteriores, en donde se pretende que la energía renovable sea la primordial en el país desechando así las energías convencionales.

7. Recomendaciones

Analizar el cambio de sistemas mecánicos por sistemas electrónicos o magnéticos los cuales mejoren el diseño y puedan ser desarrollados con la tecnología y el talento humano de nuestro entorno.

Se recomienda llevar a cabo pruebas de nuevos materiales de menor peso y mayor resistencia que garantice la

utilización del dispositivo en distintos ambientes y en varios escenarios.

Profundizar en el análisis estructural de la sujeción del dispositivo tomando en cuenta la musculatura de las personas de distintas edades y sexo.

Referencias

- [1] E. EDUCA, «endesaeduca,» 2014. [En línea]. Available: http://www.endesaeduca.com/Endesa_educa/recursos-interactivos/conceptos-basicos/i.-la-energia-y-los-recursos-energeticos. [Último acceso: 11 03 2015].
- [2] A. Tapia, «constructor electrico,» 29 12 2014. [En línea]. Available: <http://constructorelectrico.com/energia-que-emerge-al-paso/>. [Último acceso: 11 03 2015].
- [3] P. V. Luna, Biomecánica de la marcha humana normal y patológica, Valencia: IBV, 1999.
- [4] Michael Sheperdycky, Jun-Tian Zhang, Yan-Fei Liu, and Qingguo Li, «Development of an Energy Harvesting Backpack,» *IEEE International Conference on Rehabilitation Robotics*, p. 6, 2013.
- [5] J. Maxwell Donelan, Veronica Naing and Qingguo Li, «Biomechanical Energy Harvesting,» 2009.
- [6] Soon Mok Haa, Il Seok Parkb, Michael Wisslerc, Ron Pelrined, Scott Stanfordd, Kwang J. Kimb., «High Electromechanical Performance of Electroelastomers Based on Interpenetrating Polymer Networks,» Nevada, 2008.
- [7] J. Y. Hayashida, «Unobtrusive Integration of Magnetic Generator Systems into,» MASSACHUSETTS, 2000.
- [8] Q. Li, V. Naing, J.A. Hoffer, D.J. Weber, A.D. Kuo and J. M. Donelan, «Biomechanical Energy Harvesting: Apparatus and Method,» 2008.
- [9] M. E. Dihigo, Anatomía Fisiología e Higiene, Habana: Impresores Habana, 1938, pp. 67-110.
- [10] R. L. Mott, Diseño de elementos de Máquinas, Mexico: PEARSON, 2006.
- [11] Anónimo, «INFOMED RED DE SALUD DE CUBA,» [En línea]. Available: http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-bio/usd_rodilla._texto.pdf. [Último acceso: 08 06 2015].
- [12] D. Knudson, Fundamentals of Biomechanics, segunda ed., California USA: Springer, 2007.