

La marcha humana como fuente generadora de energía a pequeña escala: una revisión

Mónica Ayde Vallejo Velásquez

MSc en Ingeniería, Universidad de Antioquia,
Docente Tiempo Completo, Investigador Grupo GAUNAL,
Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Colombia
mavallejov@unal.edu.co

Laura Carolina Galvis Martínez

Ingeniera de Control, Universidad Nacional de Colombia
Medellín, Colombia
lcalvis@bt.unal.edu.co

Resumen— El estudio de fuentes alternativas de energía eléctrica ha experimentado un importante crecimiento en todo el mundo y son una opción energética para los dispositivos electrónicos de baja potencia que requieren baterías para su funcionamiento. Diferentes tipos de energías presentes en el ambiente son consideradas como posibles soluciones energéticas y otras fuentes como las basadas en el cuerpo humano muestran un futuro prometedor. El cuerpo humano es un depósito de energía, cada función vital o actividad que realiza puede ser tomada como posible fuente energética. Caminar o marchar es una actividad física que se puede aprovechar para convertirla en fuente eléctrica útil, mediante el uso de transductores piezoeléctricos, los cuales resultan apropiados para implementarlos en vestuario y calzado. Los materiales piezoeléctricos cuando son sometidos a una deformación mecánica generan un campo eléctrico y viceversa. Cuando una persona camina, al asentar la planta del pie sobre una superficie se hace la presión necesaria para generar un campo eléctrico, si se tiene un material piezoeléctrico como elemento de transducción. En este trabajo se estudia el proceso de captación de energía a partir del ciclo de marcha humana como una fuente alternativa de energía eléctrica mediante la conversión con un dispositivo de transducción eléctrica.

Palabras clave— Energías alternativas colectadas, Energía Biomecánica, Energía corporal, piezoeléctricos.

Abstract— The study of alternative sources of electricity has grown dramatically worldwide and are an energy option for the electronic devices of low-power that require batteries to operate. Different types of energies present in the environment are being considered as energy solutions, and other sources, such as based on the human body show a promising future. Human body is an energy repository, every vital function or activity realized could be considered as a possible energy source. To walk is a physical activity which could be considered as a possible energy source harnessed to turn it into useful electrical power by using piezoelectric transducers as the most appropriate devices to be used on clothes and footwear. Through the mechanical piezoelectric deformation is generated an electric field as well as in the contrary situation. Settling the sole on a surface induces the necessary pressure to generate an electric field by using a piezoelectric as transduction device. This paper presents a compilation about

the energy harvesting process from the human displacement from walking movement as an alternative source of electric energy through conversion into electrical power by electrical transduction device.

Keywords— Biomechanical Energy, Human-Powered, Harvesting energy, piezoelectric device.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de fuentes alternativas de energía eléctrica ha experimentado un importante crecimiento en todo el mundo y es una opción energética para los dispositivos electrónicos de baja potencia que requieren baterías para su funcionamiento. Diferentes tipos de energías presentes en el ambiente son consideradas como posibles soluciones energéticas y otras fuentes como las basadas en el cuerpo humano muestran un futuro prometedor. Actualmente, gran parte de las investigaciones se centran en el estudio de la energía solar, la energía de radiofrecuencia, la energía térmica y de vibración [1] con el fin de transformarlas en energía eléctrica.

La energía solar es una fuente de potencia que se encuentra disponible en el ambiente [2]. Para su aprovechamiento, requiere de una combinación de suficiente luz y un área superficial estratégica para ubicar la celda solar, siempre se busca la mayor radiación para el sistema [2]. La conversión de energía solar en energía eléctrica se realiza mediante el efecto fotovoltaico dado por la interacción entre la luz y el material de las celdas solares que, en su mayoría, están hechas de materiales semiconductores; a través de este proceso, se absorbe el fotón y la celda fotovoltaica genera corriente eléctrica. El rango de producción de potencia se presenta entre milivatios hasta megavatios [3].

La energía por radio-frecuencia usa las señales de radio y dispositivos móviles como fuente de radia-

ción. Este tipo de fuente tiene límites de potencia y requiere amplias áreas para la ubicación de antenas recolectoras de ondas que deben estar ubicadas cerca a la fuente de radiación [2], [5], [7]. La conversión se realiza directamente de energía de microondas a energía eléctrica mediante una antena rectificadora que recibe el nombre de rectena [4].

El calor es una fuente de potencia que se desperdicia y puede servir para generar energía eléctrica; su eficiencia está dada por la eficiencia de Carnot, cuyo cálculo proporciona el límite de la energía obtenida [5]. La energía térmica se aprovecha a través de la transferencia de calor entre ambientes a diferentes temperaturas. Esta diferencia de temperatura fue una de las primeras maneras de generar energía [3]. Algunos de los métodos usados para convertir el gradiente de temperatura en energía eléctrica son el generador termoeléctrico y el generador piroeléctrico [2], [6] entre otros.

Por otra parte, la energía cinética en forma de movimiento o vibración es generalmente la más versátil [8]. Su principal ventaja es que se encuentra en todo momento en el entorno [4] y alcanza tensión suficiente para generar energía útil para su conversión. Se usan generalmente tres tipos de transductores: electromagnéticos, electrostáticos y piezoeléctricos [3], [5], [8].

Este trabajo se enfoca principalmente en el estudio de la energía eléctrica que puede generarse por el movimiento corporal, especialmente aquella generada por la acción de caminar. El artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se describe cómo el cuerpo humano genera energía tanto a través de sus funciones vitales (la respiración y la presión sanguínea, entre otras), como de diferentes actividades físicas, específicamente se muestra el modelo físico del ciclo de marcha humana. En la sección 3 se presentan los métodos de transducción eléctrica usados para realizar las conversiones de energías, haciendo énfasis en el método de transducción piezoeléctrico. Y finalmente en la sección 4 se describe los resultados obtenidos en la fase experimental con materiales piezoeléctricos.

II. ENERGÍA CORPORAL

El cuerpo es un depósito de energía que podría ser utilizado para generar energía eléctrica por el

funcionamiento del organismo o por la realización de diferentes actividades que pueden ser aprovechadas como el calor corporal, la respiración, presión arterial, movimiento de los brazos y caminar [9], [10], [11].

El calor corporal generado principalmente en estado de actividad podría aprovecharse, sin embargo se pierde en gran parte por la piel mediante la evaporación del sudor. Esta pérdida por evaporación representa el 25% de la disipación total de calor y la máxima potencia disponible se encuentra entre 2.8W- 4.8W [7], [11]. La cantidad de energía obtenida por el cuerpo depende de los segmentos corporales que se utilizan, la condición física y mental del usuario y el diseño de la interfaz entre el usuario y el generador [12]. Su principal desventaja se debe a que la practicidad, comodidad y eficiencia de los sistemas recolectores de energía son limitados.

El proceso de respiración es una actividad continua que genera energía, su desventaja radica en la dificultad para capturarla, debido a que requiere el uso de máscaras [7], [9].

Hay diferentes actividades físicas humanas que se pueden aprovechar para coleccionar energía, entre éstas se encuentra el movimiento de los brazos y antebrazos para generar energía eléctrica mediante bobinas. En modos más avanzados se puede usar materiales piezoeléctricos pero su implementación podría ocasionar cargas a los brazos y causar inconvenientes [11]. Otra actividad física importante es caminar; esta actividad no es continua, pero la energía que se produce puede ser almacenada para proporcionar una fuente constante hasta en los momentos en que el usuario se encuentra en reposo. La conversión se puede llevar a cabo con diferentes métodos mediante dispositivos piezoeléctricos y generadores de rotación magnética, los cuales depende del acoplamiento, eficiencia e implementación en los zapatos para no causar perjuicios al usuario [13], [14]. En [7] se calcula que la potencia que puede ser generada sólo por la caída del talón de una persona de 68 kg de masa y dos pasos por segundo a una altura de 0,05 m., es de 67W.

A. Modelo de la marcha humana

El movimiento humano está controlado por el sistema neuromuscular y puede entenderse como un modelo mecánico pasivo [15]. Caminar es un

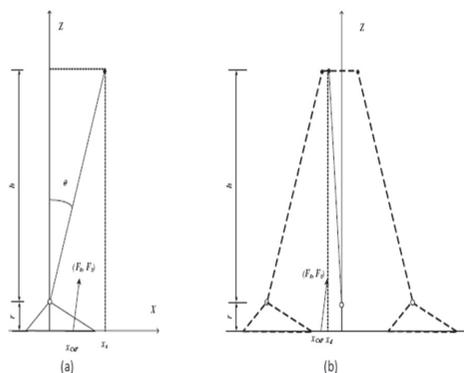
movimiento que se realiza para desplazarse en el cual interviene los pies, piernas y rodillas. El modelo generalmente aceptado para esta actividad está dado por el modelo del péndulo invertido, cada pierna al ser apoyada en el suelo se convierte en un nuevo péndulo, que ocasiona un cambio de energía de un paso a otro [16],[17],[18],[19],[20], [21].

Estudios recientes de la biomecánica muestran que existen momentos angulares para todo centro de gravedad (CoG). Komura en [22] propuso un modelo de péndulo invertido mejorado para tener en cuenta dos tipos de momentos angulares, el primero se da en el punto cero cuando el movimiento se da sobre el suelo y el segundo donde el vector de fuerza de reacción (CoF) de la tierra no tiene que estar paralelo a la posición del centro de gravedad.

El modelo propuesto por Tang en [23] es una extensión del trabajo de Komura [22] en el cual la marcha humana se alterna entre dos fases. La fase unilateral o de apoyo simple, cuando un pie está apoyado y el otro hace el recorrido en el aire para dar el paso y la fase de apoyo doble, cuando ambos pies se encuentran apoyados en la superficie. Ambas fases se muestran en la Fig 1.

En este artículo se aborda el modelo matemático presentado por Tang en [23] el cual es un modelo completo, ampliamente explicado y que simula cercanamente el movimiento de la marcha humana. Este modelo tiene en cuenta el plano horizontal (eje X) y el plano frontal (eje Y) tanto para la fase de apoyo simple como para la fase de doble apoyo.

FIG. 1. MODELO DEL PÉNDULO INVERTIDO: (A) FASE DE APOYO SIMPLE, (B) FASE DE DOBLE APOYO



Fuente (Tang, Joo Er, et al, 2008) [23]

En el modelo matemático [23], las ecuaciones (1a) y (1b) modelan el movimiento en el eje x para la fase de apoyo simple, donde, x_s es la posición

del centro de gravedad, h es la longitud del péndulo, r es la distancia del tobillo al suelo y a_{xs} es el parámetro que define la relación lineal entre el centro de gravedad y la fuerza de reacción, g es un parámetro constante dado por el valor de la aceleración de la fuerza de gravedad; $g=9.8m/s^2$ y A_{xs} y B_{xs} son los valores de los vectores para el eje horizontal en la fase de apoyo simple.

$$A_{xs} = x_s^5 g(1 - a_{xs}) + 2x_s^3 h^2(1 + g - ga_{xs}) + x_s h^4(2 + g - ga_{xs}) \quad (1a)$$

$$B_{xs} = r(h^4 + 2x_s^2 h^2 + x_s^2) \quad (1b)$$

Las ecuaciones (2a) y (2b) modelan el movimiento en el eje y para la fase de apoyo simple, y_s es la posición del centro de gravedad, a_{ys} el parámetro que define la relación entre el centro de gravedad y la fuerza de reacción y donde A_{ys} y B_{ys} son los valores de los vectores en el eje frontal en la fase de apoyo simple.

$$A_{ys} = y_s^5 g(1 - a_{ys}) + 2y_s^3 h^2(1 + g - ga_{ys}) + y_s h^4(2 + g - ga_{ys}) \quad (2a)$$

$$B_{ys} = r(h^4 + 2y_s^2 h^2 + y_s^2) \quad (2b)$$

Con un análisis similar se obtienen las ecuaciones para la fase de doble apoyo. En las ecuaciones de movimiento del plano horizontal dadas por (3a) y (3b) A_{yd} y B_{yd} son los valores de los vectores de posición referente al plano horizontal en la fase de apoyo doble y la trayectoria que se obtiene en el caso del centro de gravedad es mayor y esta denotada con x_d . Para la solución analítica de las ecuaciones del modelo se tienen las condiciones de frontera presentadas en [23] y con estas condiciones la trayectoria del centro de gravedad del MPI puede obtenerse numéricamente.

$$A_{xd} = x_d^5 g(1 - a_{xd}) + 2x_d^3 h^2(1 + g - ga_{xd}) + x_d h^4(2 + g - ga_{xd}) \quad (3a)$$

$$B_{xd} = r(h^4 + 2x_d^2 h^2 + x_d^2) \quad (3b)$$

Las ecuaciones (4a) y (4b) modelan la ecuación de movimiento en el plano frontal, y_d es la posición del centro de gravedad, a_{yd} el parámetro que define la relación entre el centro de gravedad y la fuerza de reacción y A_{yd} y B_{yd} los valores de los vectores de posición en el plano frontal en la fase de apoyo doble. Para las condiciones de frontera en este plano se debe tener en cuenta que en el eje Y el movimiento es simétrico [23].

$$A_{yd} = y_d^5 g(1 - a_{yd}) + 2y_d^3 h^2(1 + g - ga_{yd}) + x_d h^4(2 + g - ga_{yd}) \quad (4a)$$

$$B_{yd} = r(h^4 + 2y_d^2 h^2 + y_d^2) \quad (4b)$$

B. Caracterización energética

La potencia, en forma de energía cinética, que el cuerpo debe proporcionar para mantener una velocidad constante durante la marcha está dada por (5), donde V_{top} es la velocidad en el punto máximo, θ los grados de un paso, m la masa, l la longitud del péndulo y g la aceleración de la fuerza de gravedad [23]. Gran parte de esta energía es disipada en los zapatos, huesos y músculos, y representa un porcentaje que puede ser usado para suministrar energía a dispositivos electrónicos de baja potencia

$$E_{cine} = mgl(1 - \cos\theta) + 1/2mv_{top}^2 \quad (5)$$

III. MÉTODOS DE TRANSDUCCIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA A ENERGÍA ELÉCTRICA

Para la generación de energía a pequeña escala se usan principalmente técnicas de transducción tales como: transducción electrostática, generación por rotación electromagnética y transducción piezoeléctrica [24],[25], [26].

Los generadores electrostáticos son capacitores variables los cuales están formados por placas separadas por el movimiento de la fuente y en el cual las fuerzas mecánicas son empleadas para realizar un trabajo contra la atracción de cargas opuestas; se pueden dividir en dos tipos, de carga fija y de voltaje fijo [1], su desventaja es que requiere precarga para el funcionamiento.

El generador de rotación electromagnética se basa en la ley de Faraday: un cambio en el flujo magnético en una bobina induce un voltaje, conduciendo una corriente por un circuito cerrado, su principal desventaja es un acoplamiento difícil que al ser implementado, por ejemplo, en los zapatos puede ocasionar molestias al caminante [27].

Los dispositivos piezoeléctricos permiten transformar la energía mecánica en energía eléctrica [28], [29], [30]; los materiales naturales que ofrecen esta propiedad son el cuarzo, la piel humana, los huesos humanos, y materiales industriales como el fluoruro de polivinilo, el plomo, y el zirconato de titanio [7].

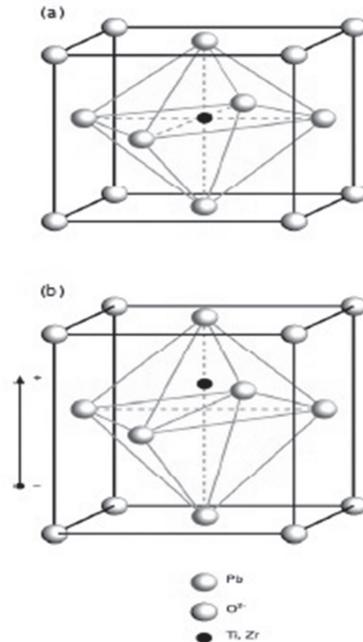
A. Propiedades de los materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos son cristales naturales o sintéticos que no poseen centro de simetría. Los piezoeléctricos cerámicos se han desarrollado con propiedades mejoradas a los naturales, algunos de ellos son: los materiales

cerámicos ferro-eléctricos poli-cristalinos como BaTiO3, el zirconato de titanio y de plomo (PZT) y polímeros piezoeléctricos, siendo el PZT el más usado en aplicaciones como actuadores y sensores [31],[32],[33],[34]. Los PZT toman propiedades piezoeléctricas al ser sometidas a polarización como se muestra en la Figura 2.

Los polímeros piezoeléctricos, comparados con los piezoeléctricos cerámicos PZT son livianos, flexibles y de fácil manipulación. A partir de la observación del efecto piezoeléctrico en el fluoruro de polivinilo, el campo de investigación en PVDF se ha abierto con otros compuestos poliméricos utilizados como piezoeléctricos [3],[33].

FIG. 2. CELDA ELEMENTAL PIEZOELÉCTRICA: (A) ANTES DE POLARIZARSE, (B) DESPUÉS DE POLARIZARSE



Fuente (Rodríguez & Garza, 2000) [31]

En la Tabla I, se muestra un resumen de las propiedades de los materiales piezoeléctricos.

Tabla I. propiedades de piezoeléctricos.

propiedades	unidades	PVDZ Film	PZT-5A	BaTiO3
Densidad	103Kg/m3	1.78	7.5	5.7
permisividad relativa	e/e0	12	1200	1700
d32	10-22C/N	23	-171	78
g32	10-3Vm/n	216	-11.4	5
K32	10-2	12	34.4	21
d33	10-12C/N	-33	374	149
g33	10-3Vm/N	-330	24.8	14.1
K33	10-2	15	70.5	48

Fuente: (González, Rubio & Moll, 2002) [32]

B. Modelo de un piezoeléctrico

Los materiales piezoeléctricos son estructuras tridimensionales y las tensiones mecánicas o eléctricas pueden ser aplicadas en uno de los tres ejes de posición. El modelo matemático del comportamiento piezoeléctrico [32] está dado por (6) y (7).

$$D = dX + \epsilon^x E \quad (6)$$

$$\chi = s^E X + dE \quad (7)$$

La ecuación (6) relaciona el desplazamiento eléctrico D , con una tensión mecánica X aplicada, el campo eléctrico E , la constante de proporcionalidad d y la constante dieléctrica medida a una tensión constante ϵ^x .

La ecuación (7) relaciona la tensión mecánica que se produce cuando un campo eléctrico E es aplicado, con constante de proporcionalidad d y coeficiente de elasticidad medida a un campo eléctrico constante s .

Los modos más habituales de funcionamiento de los generadores son: generador por compresión paralela y generador por tensión transversal. En el primer modo, el campo eléctrico se genera en el mismo eje donde se aplica la tensión externa. En el segundo modo, la fuerza se aplica en un eje diferente a los electrodos, por lo tanto la superficie donde se aplica la fuerza como donde se recoge la carga son independientes. Esta última forma de generación es la más conveniente para el acoplamiento en ropa y zapatos [35].

IV. EXPERIMENTACIÓN Y RESULTADOS

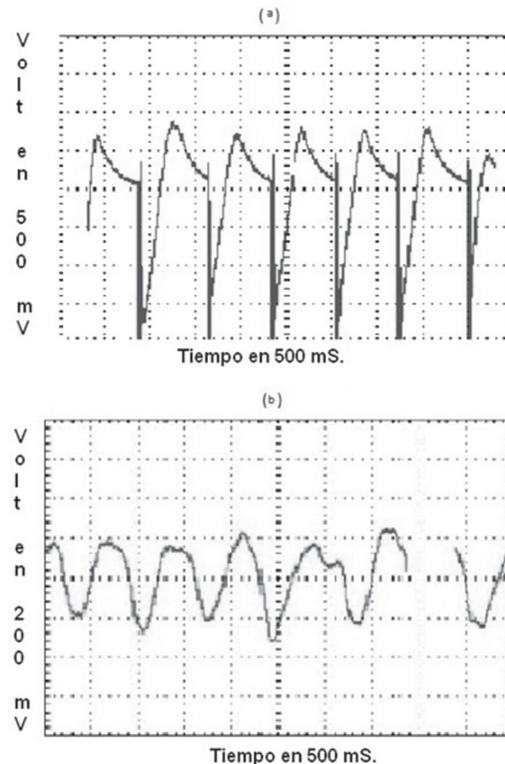
El modelo eléctrico que describe el comportamiento de un material piezoeléctrico se puede dar en dos formas, cuando el material piezoeléctrico es afectado por vibración el modelo es un circuito RLC y cuando el material piezoeléctrico no es afectado por las vibraciones, el circuito eléctrico equivalente está dado por un capacitor en serie con una fuente de voltaje.

FIG. 3. MONTAJE DE LABORATORIO CON EL PIEZOELÉCTRICO AUD-020



Mediante el montaje mostrado en la Fig. 3 y el uso de un piezoeléctrico polimérico de audio de referencia AUD-020, se verificó el comportamiento del dispositivo transductor ante dos casos. Para el primer caso se dejó caer sobre el material un peso de 300 gramos desde una altura de 0,05 m, como se muestra en la Fig. 4a, se genera un impulso como respuesta cada vez que cae el peso evidenciando que el piezoeléctrico entrega un voltaje cuando hay una tensión mecánica. El segundo caso consistió en realizar una presión constante en periodos de tiempo con un peso de 300 gramos sobre el elemento piezoeléctrico, como resultado, el cual se muestra en la Fig. 4b, se genera una señal de voltaje entre 2V y -2V pico a pico.

FIG. 4. RESULTADOS DEL COMPORTAMIENTO DEL PIEZOELÉCTRICO AUD-020: A) CASO 1, B) CASO 2



A partir de los resultados se puede afirmar que el circuito equivalente requerido para ser usado en una aplicación en zapatos y obtener de esta forma la energía producida al caminar está dado por un capacitor en serie con una fuente de voltaje, debido a que la actividad del caminar no es constante y solamente se haría la conversión cuando al material se le ejerza presión.

REFERENCIAS

- [1] Mitcheson, P.D.; Yeatman, E.M.; Rao, G.K.; Holmes, A.S.; Green, T.C.; , "Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices," Proceedings of the IEEE , vol.96, no.9, pp.1457-1486, Sept. 2008.
- [2] Paradiso, J.A., "Systems for human-powered mobile computing," Design Automation Conference, 2006 43rd ACM/IEEE , vol., no., pp.645-650.
- [3] Penella, J. B., "Smart Materials for Microrobotic Motion Control and Power Harvesting". PhD Thesis. Universidad de Barcelona. 2005
- [4] Sáez, M. L., "Energy Harvesting from Passive Human Power", PhD Thesis. 2004.
- [5] Paradiso, J.A.; Starner, T.; "Energy scavenging for mobile and wireless electronics," Pervasive Computing, IEEE , vol.4, no.1, pp. 18- 27, Jan.-March 2005.
- [6] Paulides, J.J.H., Jansen, J.W., Encica, L., Lomonova, E., Smit, M."Human-powered small-scale generation system for a sustainable dance club". Proceedings IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09, 3-6 May 2009, Maimi, Florida. (pp. 439-444).
- [7] T. Starner and J.A. Paradiso, Human generated power for mobile electronics. In: C. Piguet, Editor, Low power electronics design, CRS Press (2004).
- [8] Rocha, J.G.; Goncalves, L.M.; Rocha, P.F.; Silva, M.P.; Lancers-Méndez, S., "Energy Harvesting from Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear," Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol.57, no.3, pp.813-819, March 2010.
- [9] Jansen, A.J.; Stevels, A.L.N.; , "Human power, a sustainable option for electronics," Electronics and the Environment, 1999. ISEE -1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on , vol., no., pp.215-218, 1999
- [10] Gilmore. Human Power: Energy Recovery from Recreational Activity. Guelph Engineering Journal, (1), 8 - 16. ISSN: 1916-1107. ©2008.
- [11] Starner, T.,; "Human-powered wearable computing," IBM Systems Journal , vol.35, no.3.4, pp.618-629, 1996.
- [12] Jansen, A.J.; Stevels, A.L.N.;, "Human power, a sustainable option for electronics," Electronics and the Environment, 1999. ISEE -1999. Proceedings of the 1999 IEEE International Symposium on , vol., no., pp.215-218, 1999.
- [13] Kendall, C.J., "Parasitic Power Collection in Shoe Mounted Devices," BS Thesis, Department of Physics and Media Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, June 1998
- [14] Shenck, N.S.; Paradiso, J.A.; "Energy scavenging with shoe-mounted piezoelectrics," Micro, IEEE , vol.21, no.3, pp.30-42, May/June 2001
- [15] Garica, M., Ruina, A., Coleman, M., & Chatterjee, A "Passive-Dynamic models of human gait". Proc. of the Engineering Foundation: Biomechanics and Neural Control of Movement, Mt. Sterling, Ohio, June, 1996.
- [16] A. Karlsson and T. Persson, "The ankle strategy for postural control: a comparison between a model-based and a marker-based method," Computer Methods and Programs in Biomedicine, vol 52, no. 3, pp. 165-173, Mar. 1997.
- [17] F. Moll, and A. Rubio, "An approach to the analysis of wearable body powered systems", proceedings of the MIXDES 2000, June 2000.
- [18] Kuo, A.; Maxwell Donelan, J.; Ruina, A.; Energetic Consequences of Walking Like an Inverted Pendulum: Step-to-Step Transitions. Exercise and Sport Sciences Reviews, 88-97. (2005).
- [19] F.L. Buczek, K. M. Cooney, M. R. Walker, M. J. Rainbow, M. C. Concha and J. O. Sanders, "Performance of an inverted pendulum model directly applied to normal human gait," Clinical Biomechanics, vol. 21, no. 3, pp. 288-296, Mar. 2006.
- [20] Kuo A.D., (2007) "The six determinants of gait and the inverted pendulum analogy: A dynamic walking perspective", Human Movement Science, pp. 617-656.
- [21] Contreras Bravo L. E.; Roa Garzón M.A.; Modelamiento de la marcha humana por medio de gráficos de unión. Con-Ciencia; Tecnura. 26-42. 2005
- [22] T. Komura, A. Nagano, H. Leung and Y. Shinagawa, "Simulating pathological gait using the enhanced linear inverted pendulum model," IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 52, no. 9, pp. 1502 - 1513, Sept. 2005
- [23] Zhe Tang; Meng Joo Er; Chien, C.-J.; , "Analysis of human gait using an Inverted Pendulum Model," Fuzzy Systems, 2008. FUZZ-IEEE 2008. (IEEE

- World Congress on Computational Intelligence). IEEE International Conference on , vol., no., pp.1174-1178, 1-6 June 2008.
- [24] Mateu L.; Moll F.; Review of Energy Harvesting Techniques and Applications for Microelectronics. Proceedings of the SPIE Microtechnologies for the New Millenium, 2005.
- [25] Justin R. Farmer. A comparison of power harvesting techniques and related energy storage issues M.S Thesis. Dept. Mech. Eng., Virginia Polytechnic Institute and State Univ. Blacksburg, VA; 2007.
- [26] Khaligh, A.; Peng Zeng; Cong Zheng; "Kinetic Energy Harvesting Using Piezoelectric and Electromagnetic Technologies—State of the Art," Industrial Electronics, IEEE Transactions on , vol.57, no.3, pp.850-860, March 2010
- [27] Kymissis, J.; Kendall, C.; Paradiso, J.; Gershenfeld, N.; , "Parasitic power harvesting in shoes," Wearable Computers, 1998. Digest of Papers. Second International Symposium on , vol., no., pp.132-139, 19-20 Oct 1998.
- [28] Liang, J.; Liao, W.; "Energy Harvesting and Dissipation with Piezoelectric Materials. IEEE International Conference on Information and Automation", 446-451. (2008).
- [29] Sodano, H. A.; Parkb, G.; Inmana, D. J.;" Review of Power Harvesting Advances and Applications". Proceedings of the 22st annual International Modal Analysis Conference, 11. (2004).
- [30] J. Yang, Z. Chen, and Y. Hu, "An exact analysis of a rectangular plate piezoelectric generator," IEEE Trans. Ultrason., Ferroelectr., Freq.Control, vol. 54, no. 1, pp. 190–195, Jan. 2000
- [31] Cupich Rodríguez, M., & Elizondo Garza, F. J. "Actuadores Piezoeléctricos". En. Ingenierias Vol III , 22-28. (2000).
- [32] González, J. L., Rubio & Moll. "Human Powered Piezoelectric Batteries to Supply Power to Wearable Electric Devices". International journal of the Society of Materials Engineering for Resources, 34-40.(2002).
- [33] Sodano, H. A., Parkb, G., & Inmana, D. J.' A Review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials. The Shock and Vibration Digest", 197-205. (2004).
- [34] J.G. Rocha, L.M. Goncalves, P.F. Rocha, M.P. Silva and S. Lanceros-Méndez, Energy harvesting from piezoelectric materials fully integrated in footwear, IEEE Transactions on Industrial Electronics 57 (3) (2010), pp. 813–819
- [35] J.C. Moreno, J.F. Fernández, P. Ochoa, R.Ceres, L. Calderón, E. RocOn, J.L. Pons, "Aplicación de sensores piezoeléctricos cerámicos a la caracterización biomecánica". Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, ISSN 0366-3175, Vol. 43, N°. 3, 2004