

Propuesta de un péndulo electromagnético para la recolección de energía en usuarios de dispositivos de soporte de la marcha

V. Ramos Rosales^{1*}, R. E. González Landaeta¹

¹Instituto de Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Ciudad Juárez, México

*al199005@alumnos.uacj.mx

Abstract—People with motor disabilities usually have slow movement patterns, which means that very little biomechanical energy can be harvested using wearable or portable sensors. In this work, an electromagnetic harvester is proposed to harvest energy during the gait of subjects using gait-support devices, in this case, a walker. The harvester consists of a simple pendulum where the suspended weight is formed by two neodymium permanent magnets. Three static coils connected in series have been arranged in such a way that their position coincides with the swinging movement of the suspended weight. So, when the pendulum is moved sideways from its resting, a gradient of the magnetic field is produced in each coil, generating an electromotive force. The performance of the proposed pendulum has been tested in bench conditions and in real conditions using a walker for the elderly. When the subject began or finished the gait with the walker, the pendulum moved sideways, making the magnets to move back and forth generating a peak-to-peak voltage of 2.2 V. This back-and-forth movement remains until the suspended weight reaches the equilibrium position due to the restoring force of the gravity. The generated voltage was not affected by the velocity of the gait, but by the beginning and ending of the gait. The proposed electromagnetic pendulum has demonstrated to be suitable to harvest energy from people with slow gait without attaching any sensor to the subject.

Palabras clave— Generador electromagnético, péndulo electromagnético, recolección de energía, soporte de la marcha.

I. INTRODUCCIÓN

Para los dispositivos electrónicos vestibles y portátiles orientados al monitoreo de actividades físicas y/o fisiológicas, el suministro de energía es una limitante importante para aplicaciones que requieren un funcionamiento periódico o continuo. Normalmente, la fuente de energía de este tipo de sistemas proviene de baterías recargables, cuya vida útil depende de los periodos de carga y descarga. La vida limitada de dichas baterías no solo reduce la autonomía de estos sistemas, sino que también conlleva a problemas de contaminación derivados de los materiales que contienen. Para intentar prescindir del uso de baterías, o al menos alargar la vida útil de las mismas, se han propuesto métodos de recolección de energía, donde se aprovecha la energía disponible en el ambiente (lumínica, térmica y de radiofrecuencia –RF–) o en el cuerpo humano (térmica, biomecánica, bioquímica) para transformarla en energía eléctrica [1, 2]. Un sistema de recolección de energía está compuesto por una fuente de energía, un recolector de energía (sensor), un circuito de acondicionamiento y gestión de

energía, un elemento de almacenamiento de energía, un regulador de tensión y una carga eléctrica [3].

En lo que respecta al cuerpo humano, debido a su naturaleza dinámica, la energía biomecánica ha demostrado ser una excelente alternativa para prescindir del uso de baterías en sistemas vestibles y/o portables [4, 5]. La energía biomecánica puede recolectarse directamente adaptando un sistema de recolección a algún apéndice o articulación del cuerpo o, indirectamente, adaptando dicho sistema a dispositivos vestibles o a sistemas utilizados por el usuario, como bastones [6], mochilas [7], sillas de ruedas [8] o zapatos [9, 10], entre otros.

La mayoría de las propuestas de recolección de energía biomecánica están enfocadas en el uso de sistemas vestibles y/o portables [10-13]. Sin embargo, en personas con ciertas limitaciones físicas o que presentan dificultades motrices, debido a que los movimientos de las extremidades suelen ser muy limitados, este tipo de estrategias puede no ser muy efectiva, sobre todo si hay que colocar sensores en el sujeto.

Son muy pocos los trabajos que han enfocado la recolección de energía mediante dispositivos de rehabilitación o de soporte de la marcha. Tal es el caso del trabajo presentado por Sánchez [6], donde se propuso el uso de recolectores piezoeléctricos para aprovechar la energía mecánica mientras un sujeto usa un bastón durante la marcha. Por otro lado, Nguyen *et al.* [8], propusieron un sistema de recolección de energía híbrido, el cual se adaptó a una silla de ruedas eléctrica para aprovechar la energía solar y la energía RF disponibles en el entorno circundante, complementando entre sí la falta de uno o del otro tipo de energía.

En un sistema de recolección de energía, el sensor utilizado depende de la energía que se desea recolectar del ambiente o del cuerpo humano. Para el caso de la energía biomecánica, los sensores piezoeléctricos, electromagnéticos y electroestáticos son los más utilizados [1, 13].

Un recolector de energía electromagnético utiliza la energía cinética para transformarla en energía eléctrica mediante la Ley de Inducción de Faraday; según el movimiento que se quiera aprovechar para la recolección de energía, estos recolectores pueden tener diferentes configuraciones, por ejemplo, vigas en voladizo, masas de deslizamiento libre, estructuras de masa de resorte, y estructuras de rotación [1]. También hay diversos ejemplos de recolectores de energía electromagnéticos con estructuras en forma de péndulo, donde se presentan diferentes diseños de péndulos electromagnéticos para la recolección de energía,

esto es, péndulo simple, péndulo “sintonizable” y péndulo con movimiento anti-fase [14-16].

En este trabajo se presenta el diseño de péndulo electromagnético para su aplicación en una herramienta de soporte de la marcha, específicamente en un andador. Debido a que normalmente las personas que usan este tipo de herramientas suelen tener un patrón de marcha lento y pausado, la intención es aprovechar la aceleración y la desaceleración del andador, de tal forma que esto produzca una energía cinética en el péndulo para que se transforme en energía eléctrica, aún en un patrón de marcha lento.

La estructura de este trabajo es la siguiente: primero, se describe el diseño y la fabricación del péndulo propuesto, posteriormente, se describe la metodología usada para la caracterización del péndulo. Finalmente, se presentan y se discuten los resultados y se presentan las conclusiones más importantes del trabajo

II. DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL PÉNDULO ELECTROMAGNÉTICO

La recolección de energía electromagnética está determinada por el gradiente del campo magnético y el tiempo de inducción, por lo que la tensión generada se puede incrementar aumentando el campo magnético y reduciendo el tiempo de inducción [16].

La ley de Faraday describe matemáticamente la fuerza electromotriz (fem) generada en una bobina que es sometida a un gradiente de campo magnético, donde la bobina se puede mover respecto a un campo magnético constante o, un campo magnético constante se puede mover respecto a la bobina. En ambos casos, se expresa como [18]:

$$fem = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

donde N es el número de espiras de la bobina y $d\phi/dt$ es la variación del flujo magnético respecto al tiempo.

El movimiento de un péndulo simple viene expresado en términos de longitud (L), altura (H) y ángulo de arco (θ), esto es [17]:

$$H = L(1 - \cos\theta) \quad (2)$$

Si la masa suspendida de un péndulo consta de un imán permanente que se mueve relativamente a una bobina estática, se puede generar una fem que dependerá de la velocidad del movimiento, la cual está definida por:

$$V_{m\acute{a}x} = \sqrt{2gL(1 - \cos\theta)} \quad (3)$$

donde g es la aceleración de la gravedad.

El péndulo electromagnético presentado en este trabajo se muestra la Fig. 1. Consiste en un péndulo simple cuya masa suspendida consta de dos imanes adheridos entre sí con la intención de aumentar el campo magnético. Tres bobinas fijas se colocan paralelas al movimiento oscilatorio de los imanes

para producir gradientes de campo magnético en cada una. Para disminuir la fricción del movimiento ondulatorio y evitar pérdidas de energía, se coloca un sistema de rodamiento en el pivote del péndulo. Para crear este diseño se tomó en cuenta el comportamiento del péndulo simple. La Fig. 2 muestra la relación entre el diseño propuesto en este trabajo y la trayectoria regular de un péndulo, donde la velocidad máxima de la masa suspendida se alcanza en el centro del recorrido (punto B), mientras que en los puntos A y A' la velocidad es mínima. La idea, pues, de usar tres bobinas es aprovechar el movimiento ondulatorio en su estado de máxima y mínima velocidad.

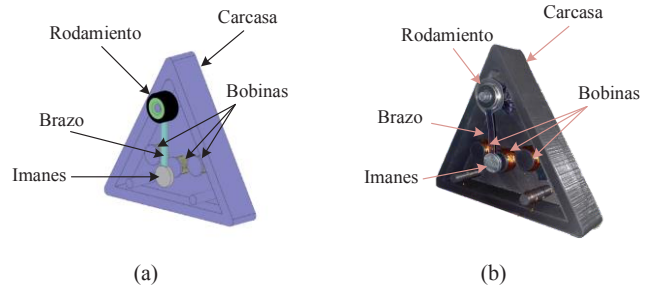


Fig. 1. Péndulo electromagnético propuesto: (a) diagrama, (b) prototipo fabricado.

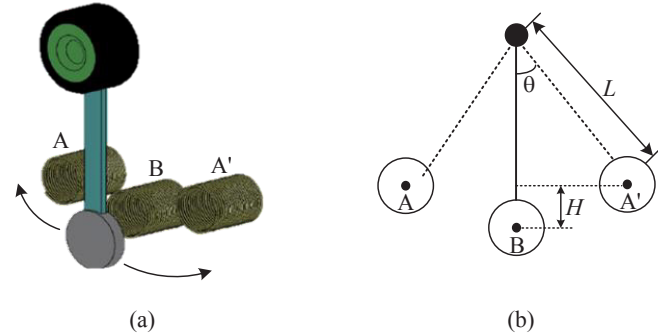


Fig. 2. Dinámica del movimiento del péndulo: (a) diagrama, (b) ilustración adaptada de [17].

El diseño del péndulo también está pensado para que pueda adaptarse a la estructura de un andador para personas mayores (Fig. 3) sin que su presencia interfiera con la marcha del usuario. En ese sentido, la masa del prototipo (péndulo + carcasa = 346 g), no altera considerablemente la masa del andador, evitando así un gasto metabólico extra para el usuario. Considerando la posición del péndulo, como se muestra en la Fig. 3, cada vez que el sujeto comience y termine un movimiento con el andador, se generan fuerzas laterales de aceleración y desaceleración, respectivamente. Estas fuerzas provocan que el brazo del péndulo se mueva, haciendo que los imanes realicen un recorrido a través de las tres bobinas, generando así una fem en cada una según la velocidad de los imanes respecto a cada bobina.

III. METODOLOGÍA

En la Tabla I se muestran las principales características del diseño del péndulo electromagnético propuesto. Las 3

bobinas se construyeron de 150 vueltas cada una, con alambre de 30 AWG. Para el campo magnético se usaron dos imanes de neodimio de 18 mm de diámetro, cada uno. La estructura del péndulo se diseñó en SolidsWork y se construyó mediante impresión 3D usando PLA (ácido poliláctico).

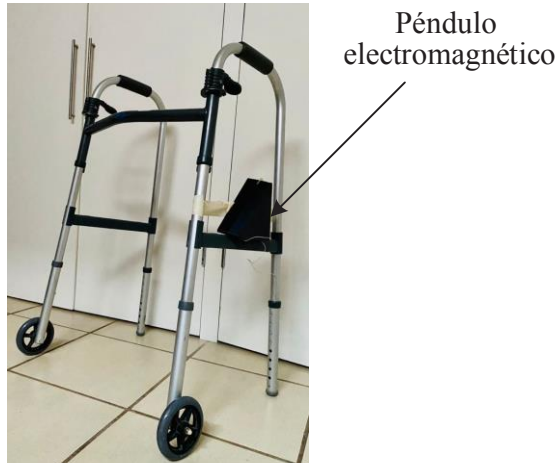


Fig. 3. Péndulo electromagnético incorporado en la estructura de un andador para personas mayores.

TABLA I.
PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DEL PÉNDULO
ELECTROMAGNÉTICO PROPUESTO.

Propiedad	Valor	Unidades
Diámetro de cada bobina	15	mm
Número de vueltas en cada bobina	150	--
Longitud del brazo del péndulo	60	mm
Masa suspendida	8	g
Masa del péndulo + carcasa	346	g
Base	170	mm
Altura	150	mm

Para estimar la tensión generada por el péndulo en diversos escenarios, se realizaron las siguientes pruebas:

Prueba 1: Desplazando los imanes a una altura H ; luego, partiendo de un estado de reposo, se libera para que el péndulo se mueva por acción de la gravedad. Se mide la tensión generada en tres bobinas ubicadas en los puntos A, B, A' (Fig. 2), conectadas en serie.

Prueba 2: Implementando el péndulo electromagnético en el andador (Fig. 3) y provocando movimientos de aceleración y desaceleración durante el inicio y el fin de la marcha, respectivamente. Se mide la tensión generada en tres bobinas ubicadas en los puntos A, B, A' (Fig. 2), conectadas en serie.

En cada una de las pruebas, la tensión generada se midió usando un sistema Arduino Uno de 10 bits conectado a una laptop (Fig. 4); se utilizó la herramienta LabVIEW™ para visualizar y registrar los datos.

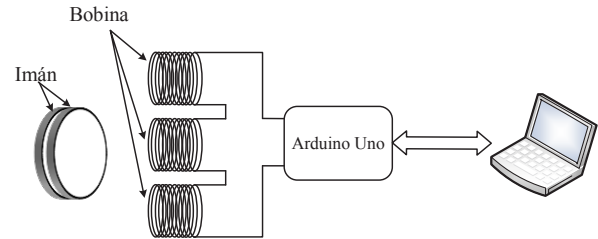


Fig. 4. Configuración para medir la tensión generada por las tres bobinas conectadas en serie.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Considerando la longitud (L) del brazo y el ángulo (θ), según (3), la velocidad del imán en los puntos A y A' es de unos 0.77 m/s, mientras que en el punto B, alcanza una velocidad de 1.08 m/s, aproximadamente. Según (1), esto implica que la mayor tensión se genera en el punto B, no obstante, al usar 3 bobinas, también se genera una tensión, aunque menor, en las bobinas ubicadas en los puntos A y A'.

La Fig. 5 muestra la tensión generada con el péndulo electromagnético en la prueba 1. Debido a que la tensión generada es la suma de la tensión generada por cada bobina, cada pico (máximo y mínimo) de la señal de la Fig. 5 representa el momento en que los imanes pasan por las bobinas ubicadas en los puntos A, B, y A' (Fig. 2). Por tanto, se aprovecha, no solo el momento de máxima velocidad ondulatoria (Punto B), sino también la velocidad mínima (Puntos A y A'). Durante esta prueba, la tensión de pico a pico generada fue de unos 210 mV de pico a pico.

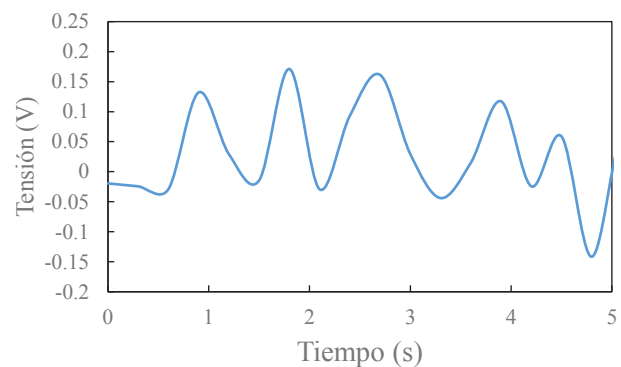


Fig. 5. Tensión generada en tres bobinas conectadas en serie a partir del movimiento de los imanes provocado manualmente (Prueba 1).

La Fig. 6 muestra la tensión generada a partir de la marcha del andador, donde se muestran el momento del inicio y fin de la marcha. Antes del inicio de la marcha, al no haber ninguna fuerza que genere un movimiento en los imanes del péndulo, la tensión generada es casi nula. En el momento del inicio de la marcha, la fuerza de empuje, para mover el andador desde su estado de reposo, provoca que el brazo del péndulo se mueva, haciendo que los imanes se muevan respecto a las bobinas, provocando un gradiente de campo magnético en las bobinas A, B y A'. Al momento de finalizar la marcha, la desaceleración del andador provoca un efecto

similar al descrito anteriormente, no obstante, al no haber ninguna fuerza adicional a la de la gravedad, la generación de tensión perdura hasta que el movimiento ondulatorio del brazo del péndulo cese. La tensión pico a pico (máxima) generada durante esta prueba fue de unos 2.2 V. Desde el punto de vista de recolección de energía, este nivel de tensión permitiría almacenar una cantidad de energía importante sin necesidad de usar convertidores DC-DC tipo Boost, como el que usan en [8]. La ventaja de esta propuesta es que la tensión generada no depende de la velocidad del andador, sino de la fuerza de empuje al iniciar la marcha y la desaceleración al momento de finalizar la marcha. Esto se adapta al patrón de marcha de este tipo de herramientas de soporte, pues normalmente es usado por personas que presentan un patrón de marcha lento.

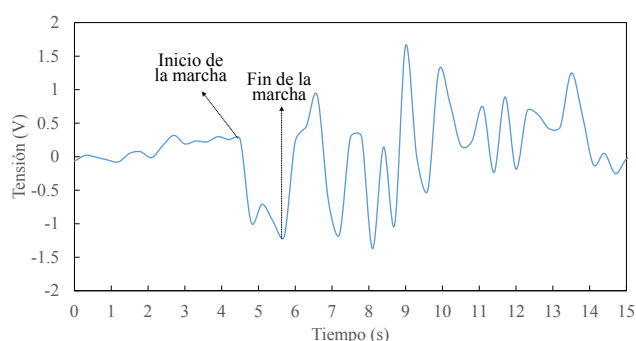


Fig. 6. Tensión generada por el péndulo electromagnético durante el inicio y fin de la marcha con el andador (Prueba 2).

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha propuesto un recolector de energía tipo péndulo para que sea usado en una herramienta de soporte de la marcha, como un andador. El diseño se basa en un péndulo electromagnético, donde la masa suspendida consta de dos imanes que se mueven respecto a tres bobinas fijas conectadas en serie, con el fin de generar una fuerza electromotriz, no solo en el punto donde la velocidad de la masa suspendida sea máxima, sino también en los puntos donde la velocidad sea mínima. El prototipo se implementó en la estructura de un andador, donde su masa (346 g) no altera considerablemente la masa del andador. Se pudo generar una tensión pico a pico de unos 2.2 V, la cual no depende de la velocidad de la marcha del andador, sino de las fuerzas de empuje y desaceleración de este. Es decir, con esta propuesta, se puede recolectar energía incluso en patrones de marcha lentos, lo cual se adapta al patrón de marcha de personas con ciertas limitaciones físicas para caminar. Este trabajo forma parte de una propuesta que busca recolectar energía usando herramientas de soporte de la marcha, con la finalidad de alimentar sistemas electrónicos de bajo consumo que sean incorporados en dichas herramientas, para así monitorear o supervisar variables físicas y fisiológicas de los usuarios de este tipo de herramientas, sin necesidad de usar baterías.

REFERENCIAS

- [1] L. Mateu, T. Dräger, I. Mayordomo, M. Pollak, "Energy harvesting at the human body," *Wearable Sensors*, pp. 235-298, 2014, DOI 10.1016/B978-0-12-418662-0.00004-0.
- [2] C. Xu, Y. Song, M. Han, H. Zhang, "Portable and wearable self-powered systems based on emerging energy harvesting technology," *Microsystems & Nanoengineering*, vol. 7, no. 1, pp. 1-14, 2021, DOI 10.1038/s41378-021-00248-z
- [3] M. Niroomand, H. Reza-Foroughi, "A rotary electromagnetic microgenerator for energy harvesting from human motion," *J. appl. res. Technol.*, vol. 14, no. 4, pp. 259-267, 2016, DOI 10.1016/j.jart.2016.06.002.
- [4] M. Cai, J. Wang, W. H. Liao, "Self-powered smart watch and wristband enabled by embedded generator," *Applied Energy*, vol. 263, April 2020, DOI. 10.1016/j.apenergy.2020.114682.
- [5] Z. Yang, Y. Yang, F. Liu, Z. Wang, Y. Li, J. Qiu, X. Xiao, Z. Li, Y. Lu, L. Ji, Z. Lin, J. Cheng, "Power Backpack for Energy Harvesting and Reduced Load Impact," *ACS Nano*, vol. 15, no. 2, pp. 2611-2623, Feb 2021, DOI. 10.1021/acsnano.0c07498.
- [6] C. Sánchez, "Desarrollo de un sistema para la recolección de energía mediante un bastón a partir de la actividad realizada durante la marcha," Tesis Maestría, DIEC, UACJ, Ciudad Juárez, Chih, 2019.
- [7] C. Saha, T. O'donnell, N. Wang, P. McCloskey, "Electromagnetic generator for harvesting energy from human motion," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 147, no. 1, pp.248-153, Sep 2008, DOI 10.1016/j.sna.2008.03.008.
- [8] V. C. Nguyen, M. Nguyen, T. Van Quyen, A. M. Le, A. Masaracchia, Ha. Nguyen, H. P. Nguyen, N. Long, H. Nguyen, N. Quang, "Hybrid Solar-RF Energy Harvesting Systems for Electric Operated Wheelchairs," *Electronics*, vol. 9, no. 752, Mayo 2020, DOI 10.3390/electronics9050752
- [9] W. Yang, "A footwear energy harvesting system," US Patent 7.956,476 B2. June 7, 2011.
- [10] M. Cai, J. Wang, W. H. Liao, "A smart harvester for capturing energy from human ankle dorsiflexion with reduced user effort," *Smart Mater. Struct.*, vol. 28, no. 1, Dec 2018, DOI 10.1088/1361-665X/aaed66.
- [11] H. Lee, J. Roh, "Wearable electromagnetic energy-harvesting textiles based on human walking," *Textile Research Journal*, vol. 89, no. 13, pp. 2532-1541, DOI. 10.1177/0040517518797349.
- [12] O. Méndez-Lira, E. Sifuentes, R. González-Landaeta. (2019) Energy Harvesting from Fingers Motions Using a Wearable System: An Experimental Analysis. Presented at Latin American Conference on Biomed. Eng. [On line]. Available: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-30648-9_113
- [13] Y. Liu, H. Khanbareh, A. Halim, A. Feeney, X. Zhang, H. Heidari, R. Ghannam, "Piezoelectric energy harvesting for self-powered wearable upper limb applications," *Nano Select*, Feb. 2021, DOI. 10.1002/nano.202000242.
- [14] D. Castagnetti, "A simply tunable electromagnetic pendulum energy harvester," *Meccanica*, vol. 54, pp. 749-760, 2019, DOI. 10.1007/s11012-019-00976-7.
- [15] M. Marszal, B. Witkowski, K. Jankowski, P. Perlikowski, T. Kapitaniak, "Energy harvesting from pendulum oscillations," *International Journal of Non-Linear Mechanics*, vol. 94, pp- 251-256, Sep 2017, DOI 10.1016/j.ijnonlinmec.2017.03.022
- [16] B. Lee, G. Chung, "Design and analysis of a pendulum-based electromagnetic energy harvester using anti-phase motion," *IET Renewable Power Generation*, vol. 10, no. 10, pp.1625-1630, Nov 2016. DOI 10.1049/iet-rpg.2015.0396.
- [17] M. Kiziroglou, E. Yeatman, "Materials and techniques for energy harvesting," *Functional Mat. Sust. Energy App.*, pp. 541-575. Sep 2012, DOI. 10.1533/9780857096371.4.539
- [18] A. Donate, "Inducción electromagnética. Bobinas II," in *Principios de electricidad y electrónica II*, Barcelona, España: Marcombo, 1999, ch. 4, pp. 80-81.