

Cargador manual de baterías: prototipo académico

Manual Battery Charger: an Academic Prototype

John Sneider Vanegas Varon,¹ Marco Antonio Latorre González,²
José Danilo Rairán Antolines^{3,*}

Profesor en Universidad Distrital Francisco José de Caldas,^{1,2,3}

* correspondence email: drainan@udistrital.edu.co

Received: 24/08/2015. Modified: 14/10/2015. Accepted: 15/12/2015

Resumen

Contexto: Cuando se construye un cargador manual de baterías se garantiza una potencia de salida, pero normalmente se omite la eficiencia a la cual se hace la carga. Sin embargo, en el contexto actual de preocupación por el cambio climático, la selección entre un equipo u otro debe hacerse en términos del valor de la eficiencia.

Método: Se estiman las potencias de entrada y de salida, necesarias en el cálculo de la eficiencia. Estas estimaciones requieren la aproximación de la velocidad angular y del torque en una manivela, y del voltaje y la corriente en la batería, las cuales se realizan mediante un procedimiento experimental y el uso de un circuito diseñado para tal fin.

Resultados: Se construye un prototipo para dar un ejemplo de la medición de eficiencia, y se encuentra que mientras la potencia de entrada se acerca a 12 W, la potencia de salida es de 3 W, por lo cual la eficiencia es aproximadamente 25%.

Conclusiones: El método de medición propuesto permite estimar la eficiencia de dispositivos manuales cargadores de baterías. Así, trabajos futuros pueden enfocarse en mejorar el diseño de los cargadores, para incrementar el valor de la eficiencia.

Palabras clave: estimación del torque, medida de eficiencia, recarga de baterías.

Abstract

Context: The building process of a manual charger allows designers to guarantee an output power, but the efficiency of the process usually remains unknown. However, in the current context of preoccupation for the climate change, the selection of a device should regard the efficiency value.

Method: This paper presents the input and output power estimation, as the efficiency computation requires. These estimations involve approximating angular speed and torque in a hand crank, as well as voltage and current in the battery, which depends on an experimental procedure and the use of a circuit designed for that purpose.

Results: The design and building of a prototype allow authors to present an example of the efficiency measurement, which resulted in an input power approaching 12 W, whereas the output power is 3 W, thus the efficiency approximates 25%.

Conclusions: The proposed method of measurement enables the estimation of efficiency for manual battery chargers. Thus, future works can focus efforts on improving the design of the chargers in order to increase the efficiency value.

Language: spanish.

Keywords: battery recharge, efficiency measurement, torque estimation.

Open access



Citación: Vanegas, J. S., Latorre, M. A. y Rairán, J. D. (2016). Cargador manual de baterías: prototipo académico. En: Ingeniería, Vol. 21, No. 1, pp. 83–95

© los autores; titular de derechos de reproducción Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

En línea DOI: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.reveng.2016.1.a06>

1. Introducción

Regulaciones como la política nacional de conservación de 1978 y la política energética de Estados Unidos de 1992 y de 2005, según se reporta en [1], tienen como finalidad incentivar el uso eficiente de la energía y el desarrollo de energías renovables, en contraposición con los gases de efecto invernadero y a la volatilidad del costo de los combustibles fósiles. Por ende, este trabajo fue enfocado a la recuperación de energía a partir del movimiento.

Cualquier dispositivo que recupere energía está compuesto de tres componentes básicos: un transductor, el cual transforma energía a tipo eléctrico; un circuito controlador, que permite el paso de energía; y la batería, donde se almacena la energía eléctrica. Bajo el enfoque de recuperación de energía en este artículo se implementó un prototipo que utiliza el giro de una manivela, el cual es multiplicado en velocidad mediante un juego de engranajes. La energía se almacena en un juego de supercapacitores, los cuales cargan una batería según comando de un circuito de control. El giro de la manivela puede provenir del giro de una rueda en una bicicleta, donde se recuperaría parte de la energía utilizada por el usuario.

En la literatura científica se han reportado trabajos similares encaminados al transductor. A manera de ejemplo está la recuperación de energía del movimiento de una persona mientras camina [2], el aprovechar el movimiento de la rodilla con base en un juego de engranajes para mejorar la eficiencia [3], un transductor mecánico de movimiento vertical, el cual aprovecha la energía de un grupo de personas que generan un movimiento vertical mientras bailan y las traduce a rotación, produciendo entre 2 y 8 vatios por persona [4] y finalmente en [5] dispositivos que utilizan fricción y presión para activar los LED y otros dispositivos de bajo consumo con promedio de 44 mili-vatios.

Otra alternativa que se ha explorado para recuperar energía son los elementos piezoeléctricos resonantes y no resonantes, los cuales pueden generar potencia en el orden de los mili vatios y una potencia promedio de 10 mW recuperable por el movimiento de cada parte del cuerpo [6]; lo cual motivó a los autores de este artículo a desarrollar el dispositivo presentado.

En [7] se reporta que en la estación de Marunouchi en Tokio-Japón se llegó a recuperar hasta 10 kW/día, energía proveniente del paso de los pasajeros por la taquilla, con lo cual se alimentaron algunas lámparas en la misma estación. Un trabajo adicional en este sentido, busca utilizar la generación piezoeléctrica que puede darse en un peaje al paso de los vehículos [8], en este estudio se cuantifica la energía que se recuperaría por año, y si bien se reconoce que la tecnología no es madura, se promueve su utilización.

Referente a la batería se encuentran trabajos en la literatura cuya finalidad es conocer su capacidad de almacenamiento, como en [9], donde se recupera la energía de cada pisada de una persona. Esa energía sirve para alimentar algún dispositivo que se lleve puesto (*wearable devices*), para lo cual se asume una energía promedio por pisada. Además de la capacidad de la batería, según el trabajo en [10], es importante conocer las condiciones nominales para la carga de la batería, tal como el voltaje nominal de transferencia. Esta transferencia se realiza normalmente mediante el uso de un juego de condensadores, los cuales almacenan energía, y elevan su voltaje hasta el valor ideal, a través de un circuito electrónico que permite la transferencia de energía. Finalmente, en [11] los autores muestran un circuito controlador óptimo con el fin de minimizar las pérdidas de transformación.

2. Método

En esta sección se describe en primera instancia la batería a ser utilizada para almacenar energía y posteriormente se detalla el prototipo construido, el cual fue diseñado para medir potencia y energía en él, centrado en el proceso de la conversión de energía cinética a eléctrica y no en la selección de la fuente de energía cinética, la cual podría provenir a manera de ejemplo del giro en una bicicleta.

La eficiencia η se define como la relación entre la potencia de entrada *versus* la salida, este es el parámetro de diseño más importante, razón por la cual mide la potencia de entrada al dispositivo (la cual proviene de un movimiento giratorio), y la potencia de salida (es decir la velocidad con que se almacena energía en la batería).

La potencia de entrada ($p_m = \tau\omega$) requiere la medición de torque τ y la velocidad ω . El torque es medido indirectamente a partir de la medición de corriente eléctrica, como se presenta al final de esta sección, dado que la relación entre estas dos variables puede considerarse lineal para una máquina de corriente directa. De otra parte, la velocidad es medida con un encoder incremental, construido para tal fin. La potencia de salida ($p_e = v i$) requiere la medición del voltaje v y la corriente en la batería i . Estos dos parámetros son medidos a través de una resistencia de medida.

2.1. Caracterización de la batería

En este artículo se utilizó una batería NiMH tamaño AAA, con voltaje 1.2 V y capacidad de 700 mAh, lo cual equivale a $0.7(\text{A}) \times 3600(\text{s}) = 2520 \text{ C}$. Para analizar el comportamiento experimental de la batería se cargó totalmente y luego se descargó a través de una resistencia de 2Ω (figura 1). El tiempo de descarga depende del valor de la resistencia de carga, y en menor medida de la temperatura y de las veces que se ha usado la batería [12].

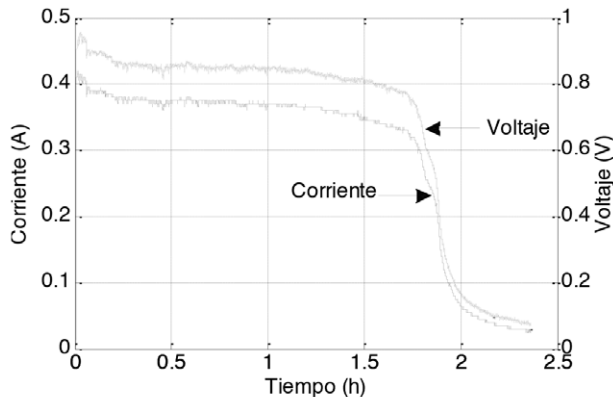


Figura 1. Descarga batería NiMH.

Nótese la caída de tensión, de 1.2 V nominales a 0.8 V, dado el tamaño de la resistencia, la cual se aproxima a la resistencia interna de la batería. El resultado de integrar la corriente es la carga eléctrica que entrega la batería, la cual es de 2900 C, es decir, superior al valor nominal.

La descarga de estas baterías comienza con un transitorio corto, de apenas unos minutos, donde se presentan voltajes y corrientes mayores al valor nominal. Posteriormente se presenta el comportamiento nominal, durante la mayor parte del ciclo de descarga. El comportamiento es constante por casi dos horas (figura 1), luego de lo cual se presenta una caída súbita, como también se indica en [12], cuando puede considerarse que la batería se ha descargado.

2.2. Descripción del prototipo

Del prototipo se distinguen tres partes: la mecánica, la electromecánica, y la electrónica. La primera parte está constituida por una manivela y un juego de engranajes; la segunda, por una máquina de corriente directa; y la tercera, por un supercapacitor, un tiristor, la batería y elementos para visualizar el estado de la carga. La energía fluye de la parte mecánica a la electrónica, pasando por la electromecánica. Así, un giro en la manivela produce corriente eléctrica en el generador, y finalmente la carga eléctrica es almacenada en la batería.

La conversión de energía cinética a eléctrica comienza con la acción de la manivela (parte 1.1, de la figura 2.b). La selección de este dispositivo tiene que ver con los valores bajos de potencia que se puede recuperar de un movimiento humano, lo cual obliga a descartar movimientos como el de los dedos, la cabeza, etc., para limitarse a un movimiento que se pueda dar por varios minutos sin cansancio o lesiones, en este caso el del brazo. La manivela tiene una longitud de 16 cm, este valor resultó de la experimentación; medidas inferiores dificultan el giro, mientras superiores causan molestias en el hombro.

La manivela hace girar un grupo de engranajes (parte 1.2), los cuales hacen que la máquina de corriente directa (parte 2) gire catorce veces más rápido que la manivela. Esta relación de transmisión equipara la velocidad que puede alcanzarse en la manivela (alrededor de 2 revoluciones por segundo), con la velocidad nominal del motor, es decir, 1800 revoluciones por minuto. Relaciones superiores o inferiores reducen la eficiencia de la conversión de energía, porque la máquina no trabajaría en condiciones nominales. La máquina de corriente directa es de modelo PC280LG-022, el cual fue seleccionado dada su popularidad y bajo costo. El trabajo de esta máquina es convertir la energía cinética en su eje a voltaje, es decir, trabaja como generador de energía eléctrica.

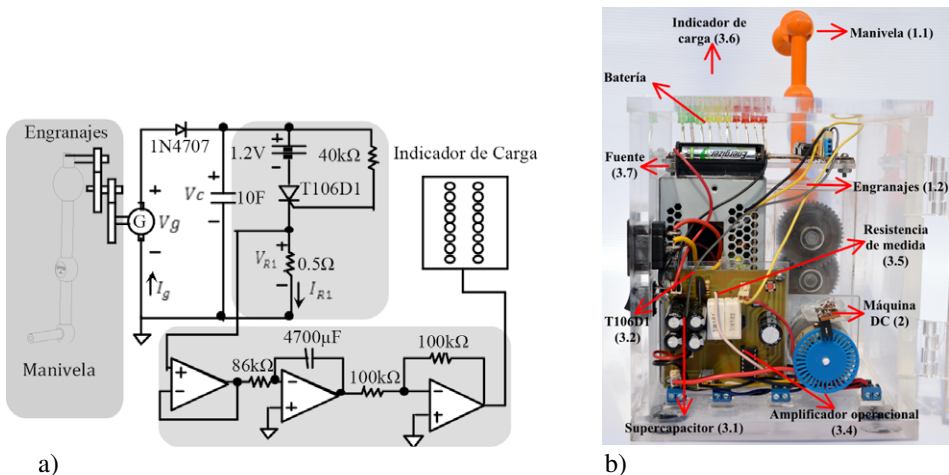


Figura 2. Prototipo para la recuperación de energía, a) esquema, b) prototipo.

El proceso de conversión de energía continúa con el almacenamiento de la carga eléctrica proveniente del generador en un supercapacitor (parte 3.1), el cual es indispensable como elemento intermedio de almacenamiento, porque soporta voltajes altos desde el generador, mientras que es recomendable recargar la batería solo cerca del valor nominal, el cual es ofrecido por el supercapacitor.

La selección del supercapacitor tiene que ver con el tiempo que una persona puede estar girando la manivela, y que aun así el cansancio le permite continuar hasta cargar la batería. Pruebas experimentales dejan ver que ese tiempo es aproximadamente de 80 s. En ese tiempo, y dado el tamaño del generador, es posible extraer una carga q de 35 C. La transferencia de carga comienza en 5.6 V, que es el máximo voltaje en los supercapacitores usados, y termina en 2.1 V, que es el voltaje al cual se iguala la tensión en la batería y el supercapacitor. Así dado que $C=q/\Delta V (F)$, entonces $C=10 F$.

La carga acumulada en el supercapacitor es transferida a la batería, con el comando del tiristor T106D1 (parte 3.2), el cual requiere de un juego de resistencias para mantener el circuito abierto, para que inicialmente no se transfiera carga a la batería (parte 3.3). La conducción comienza cuando se alcanza un umbral de 5.6 V en el supercapacitor, el cual corresponde al voltaje máximo de este dispositivo. En ese momento el tiristor permite el flujo de carga hacia la batería, hasta cuando ya no se transfiere más carga del supercapacitor a la batería, y entonces el tiristor abre el circuito.

En el momento de la transferencia de la carga hacia la batería, y con el propósito de visualizar el estado de la carga, se utilizan dos amplificadores operacionales (parte 3.4). El primero es un seguidor de voltaje, el cual sensa la tensión en la resistencia de medida $R1$ de 0.5Ω (parte 3.5). La tensión en el seguidor alimenta un segundo operacional, configurado como integrador. La constante de tiempo de ese integrador es RC , donde $R=86 k\Omega$ y $C = 4.7 mF$, según indica la parte a) de la Figura 2, por tanto, esa constante es 404.2 s. El propósito de esta constante es hacer que la carga nominal de la batería, 2520 C, corresponda con el voltaje máximo en el indicador, es decir, 5 V.

El estado de carga es visualizado mediante el manejo de voltaje que hace el integrado lm3914, el cual sirve como vúmetro. Se utilizan dos de estos circuitos, uno para la salida del integrador del párrafo anterior y otro para la tensión en el supercapacitor. Cada integrado activa proporcionalmente a su voltaje de entrada entre uno y diez leds (parte 3.6). Estos leds forman una escala de colores: rojo para la carga mínima, amarillo para la carga media, y verde para el máximo de carga.

Véase que el prototipo incluye una fuente de computador (parte 3.7), como se ve en la parte b) de la figura 2, esta tiene por objetivo alimentar los amplificadores operacionales, los vúmetros y los leds, los cuales sirven solo como indicadores, y no son parte del proceso de conversión de energía.

2.3. Medición de torque

La medición del torque requirió del montaje en la Figura 3. En esta prueba se alimentó la máquina de corriente continua con un voltaje constante, y como resultado la manivela se movió, pero solo hasta donde lo permitió un dinamómetro. Posteriormente se varió la posición del dinamómetro (cambiando la posición del brazo mecánico), hasta que la manivela estuvo a

90° con respecto al dinamómetro, y se tomó esa lectura de fuerza. El producto entre fuerza y brazo es el torque.

El procedimiento en el párrafo anterior se repitió para varios valores de voltaje, observando en cada caso la relación entre el corriente y torque. Dada la longitud de la manivela (0.16 m), y las lecturas de corriente y fuerza, la relación par corriente es el indicado en la ecuación 1.

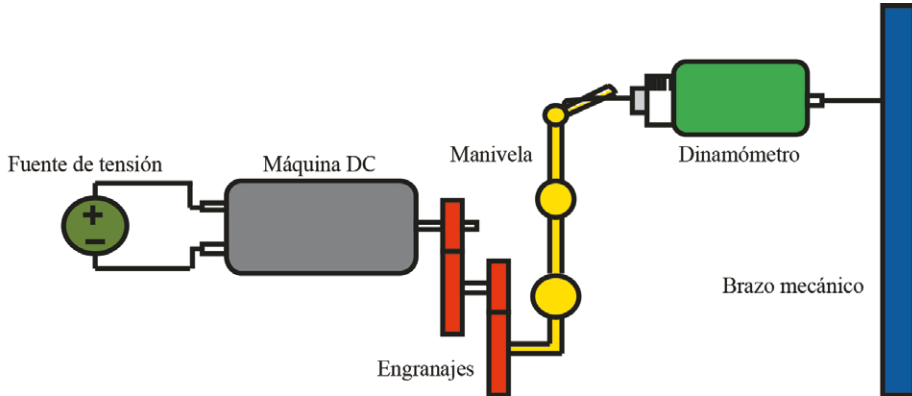


Figura 3. Medición del torque en la máquina DC.

$$\tau = 1.13i \quad (Nm) \quad (1)$$

3. Resultados

En esta sección se calculará la potencia que puede entregar una persona al prototipo, y la potencia a la cual se carga la batería, con las cuales se determina la eficiencia. Finalmente se discuten los resultados encontrados.

3.1. Medición de torque

El cálculo de potencia implica la medición de corrientes y voltajes, por lo tanto, en esta sección se comienza con el análisis del voltaje y la carga por medio de dos experimentos. El primero centrado en el supercapacitor, mientras el segundo observa todo el prototipo.

El primer experimento emula la acción de una persona cuando esta aplica torque sobre la manivela. Se supone un tiempo de acción y otro de descanso iguales, mediante una señal pulso con un periodo de 7 s y una amplitud de 7 V (figura 4). Este voltaje proviene de una fuente de tensión, la cual reemplaza el generador. Véase que el voltaje en el supercapacitor aumenta hasta 5.6 V, el cual corresponde con la carga máxima, y en ese momento se activa la transferencia de carga hacia la batería. Luego de la primera transferencia de carga, el voltaje se estabiliza en 2.1 V, donde se iguala la tensión de supercapacitor con la de la batería y no fluye más corriente.

En el segundo experimento se observa el comportamiento normal del prototipo, es decir, cuando la energía proviene de una persona. Para comenzar la persona aplica torque, buscando una

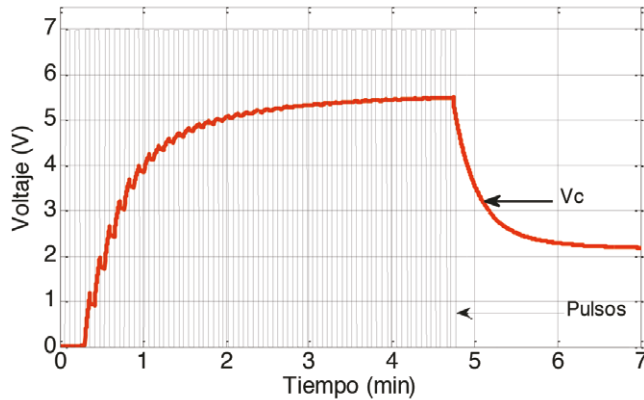


Figura 4. Comportamiento del supercapacitor.

velocidad de giro constante. El valor inicial de corriente en el supercapacitor es el máximo, debido a que se encuentra descargado, y a medida que se carga, la corriente disminuye (figura 5.b).

De otra parte, el voltaje en el generador V_g aumenta hasta 6.4 V (figura 5.a). Este aumento es proporcional al aumento del voltaje en el supercapacitor V_c . La diferencia entre estos voltajes se debe principalmente a la operación del diodo a través del cual se dirige la dirección de la corriente, Figura 2.a. Cuando V_c alcanza el umbral de 5.6 V, el tiristor se cierra y comienza a transferir carga del supercapacitor a la batería. Esta transferencia es sensada con la resistencia de medida R_I . De otra parte, nótese que durante la descarga del supercapacitor no se aplica torque a la manivela, por tanto, V_g es cero.

El supercapacitor entrega un máximo de 63% de su carga a la batería en cada transferencia. Esto se debe a que la transferencia solo se da si el voltaje en el supercapacitor es mayor que en la batería, para que la carga fluya hacia esta última. En la práctica, y debido a la configuración del tiristor, se encontró que durante la primera transferencia ese voltaje debe ser mayor o igual que 2.1 V. De otra parte, el voltaje en el supercapacitor cae en la misma proporción que se transfiere carga, como indica la siguiente expresión: $q = CV_c$ (C). Así, la transferencia equivale a $(5.6 - 2.1)/5.6 = 0.63$, es decir, 63%.

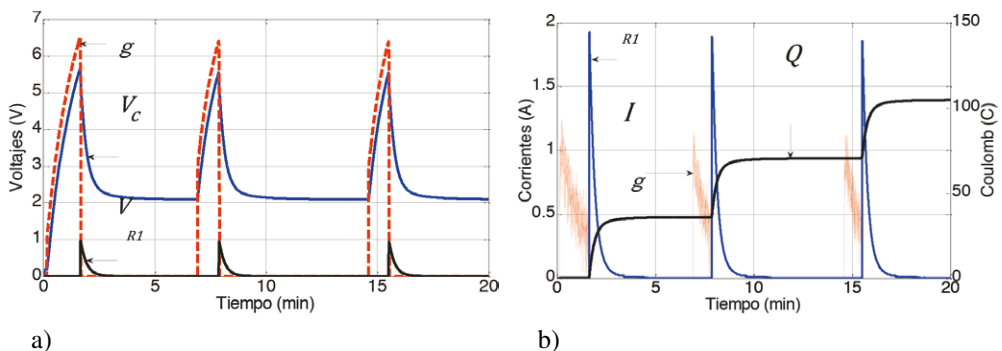


Figura 5. Medidas experimentales, a) voltajes, b) corrientes y carga.

La primera transferencia es de 35 C, dado que $q = 10(5.6-2.1)$ C. Este valor disminuye levemente a medida que se carga la batería, porque el voltaje en la batería aumenta. Así, dada la carga nominal de la batería 2520 C, en lugar de requerir 72 transferencias ($2520/35$), en realidad se requieren 74.

La corriente de carga I_{R1} tiene un máximo de 1.8 A, y decrece en forma similar a una exponencial. I_{R1} alcanza su valor nulo luego de unos cinco minutos (figura 5.b). Este procedimiento de carga del supercapacitor y posterior transferencia se repite hasta cargar la batería. Si se gira la manivela durante el periodo de transferencia a la batería, esa carga generada se reparte entre el supercapacitor y la batería, y dada las conexiones del circuito, se igualan los voltajes a un valor cercano a 3 V.

La medición de los voltajes en la figura 5.a se realizó por medio de la tarjeta de adquisición de datos PCI 6024E de National Instruments y Simulink de Matlab. A partir de estas lecturas se obtienen las curvas en la figura 5.b, de acuerdo con las expresiones en la ecuación 2.

$$\begin{aligned} I_{R1} &= V_{R1}/R1 \quad (A) \\ I_g &= C \frac{dV_c}{dt} \quad (A) \\ q &= \int I_{R1} dt \quad (C) \end{aligned} \quad (2)$$

3.2. Potencia y eficiencia

En esta sección se presenta la medición de los parámetros eléctricos y mecánicos, y a partir de ellos se calculan las potencias, posteriormente se calcula la eficiencia.

3.2.1. Medición de potencia

En las mediciones de las potencias eléctrica pe y mecánica pm , se utiliza una tarjeta de adquisición de datos PCI 6024E, configurada con un periodo de muestreo de 100 ms. Estas mediciones se realizan durante el primer ciclo de carga, cuando la batería y el supercapacitor están descargados, porque este es el caso extremo. En cualquier otro ciclo la potencia de entrada es menor y por tanto la eficiencia es mayor.

Para medir la potencia eléctrica se aplica torque a la manivela, buscando que la velocidad de giro sea constante, y se miden los voltajes V_c y V_g . Dado que durante la carga del supercapacitor se halla en serie con el generador, entonces pe es igual a $V_g C(dV_c/dt)$. El resultado de este cálculo se muestra en la Figura 6.b, donde la potencia promedio es de 3 W. Adviértase que, si bien V_c y V_g parecen ser curvas suaves, la potencia pe presenta saltos, debido al efecto de la derivada dV_c/dt .

Para medir la potencia mecánica (la que produce la persona), se debe estimar el par y la velocidad en la manivela. Se comenzará con la explicación de la medida de velocidad y luego se hablará de la medida del torque.

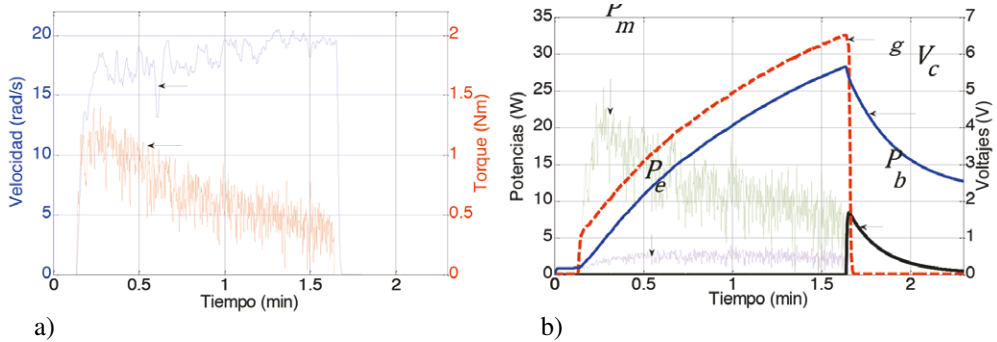


Figura 6. Medida de potencia, a) par y velocidad, b) potencias y voltajes.

La medida de velocidad se hace con un encoder incremental de 36 ranuras, el cual no está ubicado en la manivela, sino en el eje del generador. Esto se hace por facilidad de instalación y porque la estimación presenta errores menores a velocidades altas. Así, la aproximación de la velocidad de giro se hace con el contador de pulsos de la tarjeta de adquisición de datos, según se indica en la ecuación 3, donde l_i es el conteo de pulsos actual; l_{i-1} es el conteo anterior; 0.1 es el tiempo de muestreo; $2\pi/36$ es una constante para pasar pulsos/s a rad/s; y $1/14$ es la relación de transmisión de los engranajes.

$$\omega = \frac{l_i - l_{i-1}}{0.1} \frac{2\pi}{36} \frac{1}{14} \quad (3)$$

El resultado de la medición de la velocidad se observa en la figura 6.a, en la cual puede verse que la velocidad de giro está alrededor de 18 rad/s. Nótese que no es posible mantener ω constante, porque el par de oposición al giro de la manivela es proporcional a la corriente en el supercapacitor, y esta cambia. Inicialmente esa corriente es máxima y luego decrece a medida que el supercapacitor se carga. Existen otras razones, como las diferencias entre los dientes de los engranajes o el hecho de que el brazo de una persona no puede aplicar el mismo torque en todas las posiciones de la manivela.

El método para obtener el par se presentó en la sección 2.3. Recuerdese la ecuación 1 en la sección 2.3, donde $i=I_g$. De esta forma, el resultado del cálculo de potencia mecánica se consigna en la figura 6.b. Véase que la potencia mecánica tiene un valor máximo al comienzo, de alrededor de 25 W, luego de lo cual decrece hasta unos 5 W. El máximo se presenta porque para hacer girar la manivela con el supercapacitor descargado hay que aplicar un par alto. Luego, ese par decrece hasta cuando el supercapacitor queda cargado, momento en el cual la potencia mecánica necesaria es solo para vencer fricciones y la inercia del sistema.

3.2.2. Cálculo de la eficiencia

La carga de la batería requiere dos procesos. El primero es cargar el supercapacitor y el segundo es transferir esa carga a la batería. Mientras el primer proceso es electromecánico el segundo es eléctrico. En el primer proceso se convierte energía mecánica en eléctrica, mientras en el segundo la entrada y la salida son energía eléctrica. El cálculo de la primera eficiencia

consiste en realizar el cociente $\eta_m = p_e/p_m$, el cual se presenta en la figura 7. En esa figura se observan tres ciclos de transferencia. Véase que la eficiencia de la parte electromecánica del prototipo no supera el 26%.

El cálculo de la segunda eficiencia implica el cálculo de la potencia eléctrica en el supercapacitor, denotada como p_c durante la transferencia a la batería y de la potencia en la batería p_b . La potencia en el supercapacitor es la indicada en la ecuación 4.

$$p_c = V_c C \frac{dV_c}{dt} \quad (\text{W}) \quad (4)$$

De otra parte, p_b equivale al producto del voltaje por la corriente en la batería. En lugar de medir directamente ese voltaje, se utiliza la diferencia entre V_c y V_{R1} porque estas señales ya están en la tarjeta de adquisición de datos. La lectura de corriente también se hace de manera indirecta, a través de la resistencia de medida, según se indica en la ecuación 5.

$$p_b = (V_c - V_{R1}) \frac{V_{R1}}{R1} \quad (\text{W}) \quad (5)$$

Así, la eficiencia es $\eta_e = p_b/p_c$. Esta vez la eficiencia supera el 80%, y se acerca a 100% a medida que la corriente baja (figura 7).

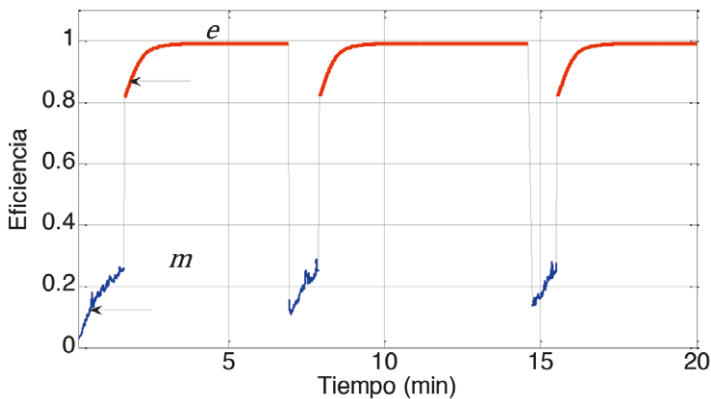


Figura 7. Eficiencia en la transformación de energía.

3.3. Discusión

El aporte más importante en este artículo es la presentación de un procedimiento para la medida de la eficiencia de dispositivos que cargan manualmente baterías. Esto, debido a que, si bien la literatura reporta la construcción de cargadores manuales de baterías, no se dan razones de los parámetros de diseño, es decir, a aspectos tales como el tamaño, el cual es una de las variables que define la potencia de salida. En lugar de ello, trabajos como [13], [14] y [15] se dedican a medir la potencia de salida, lo cual se entiende dada la dificultad para medir la potencia de entrada.

La potencia en los prototipos para cargar baterías de forma manual depende de los engranajes, del generador y sobre todo de cómo se introduce la energía. Ahora, dada la variabilidad en estos componentes, no debe descartarse una aplicación u otra por el valor de potencia de salida. En su lugar, el parámetro final de diseño es la eficiencia. Esta es la razón por la cual en este artículo se propone un procedimiento para medir la eficiencia, el cual es confirmado mediante la medición de eficiencia en un prototipo académico.

El prototipo diseñado no se construyó para maximizar la eficiencia, ni para lograr que esta fuera mayor que la de dispositivos comerciales, sino para presentar el proceso de medida de la eficiencia. En este sentido, se resaltan algunos componentes que no se encuentran en un prototipo comercial, a manera de ejemplo la visualización del estado de carga de la batería, la estimación de la carga almacenada en el supercapacitor, o la instalación de un encoder incremental. Otros aspectos de diseño que distinguen este prototipo académico de uno comercial son lo visible de cada componente, dada la carcasa de acrílico transparente y la forma y el tamaño. Estos últimos parámetros fueron seleccionados para extender la durabilidad del prototipo y su robustez, de manera que pueda presentarse en distintos espacios, además del laboratorio.

En contraposición a las ventajas del prototipo en el párrafo anterior, se listan dos desventajas. Primero, si bien el prototipo es modular, no es posible cambiar el generador, dadas las distancias entre los engranajes y el encoder, lo que implica que no es posible estudiar el efecto del cambio de generador. Segundo, el tamaño del prototipo hace difícil acoplarlo a otros dispositivos, por ejemplo, a una motocicleta. Esto se menciona porque se prevé que la investigación a futuro debería buscar aplicaciones para la recuperación de energía, además de la búsqueda de la mejora de la eficiencia.

Si bien el objetivo general de este trabajo no es optimizar la eficiencia, en trabajos futuros esa optimización debería enfocarse en el diseño de la manivela, de los engranajes y del generador. El diseño de la manivela implica la optimización del tamaño y de la forma, de manera ergonómica, para aprovechar la mayor cantidad de energía proveniente del usuario sin causar problemas en la mano o brazo. En cuanto a los engranajes, además de la relación de dientes, se pueden estudiar otros aspectos, como el tipo de engranaje, el cual influye directamente en las pérdidas de fricción que se presentan.

El componente que más influye en la eficiencia es el generador. Si se utiliza uno comercial ya hay una cota cercana al 60% en el valor de la eficiencia. De esta manera superar esa eficiencia implica el diseño electromagnético de otro dispositivo, el cual implicaría teoría de máquinas eléctricas y el uso de herramientas de programación como los elementos finitos. En cualquier caso, el prototipo que se diseñe debe garantizar las condiciones para que se dé la eficiencia máxima. De estas condiciones, la más importante es la velocidad de giro del generador.

4. Conclusiones

En este artículo se presenta la implementación de un prototipo para convertir energía cinética a energía eléctrica, la cual es almacenada en una batería. Como aportes fundamentales del trabajo se encuentra la formulación de un procedimiento para medir la eficiencia, en el cual no se requiere la medida del torque para determinar la potencia de entrada, sino que el torque se mide indirectamente a partir de la lectura de corriente en el generador. Este procedimiento puede ser replicado sobre cualquier dispositivo que utilice una máquina de corriente directa para generar la carga eléctrica.

La conversión de energía en el prototipo puede dividirse en dos procesos: uno electromecánico y uno eléctrico. En el primero se pasa del giro en una manivela al voltaje en el generador, el resultado es una eficiencia alrededor de 25%. En el segundo proceso, desde el voltaje en el generador hasta que la carga eléctrica es almacenada en una batería, se alcanza una eficiencia cercana al 100%, reducida solo por el consumo en una resistencia adicionada para medir.

Trabajos futuros deben estar encaminados en primera instancia a incrementar la eficiencia de la parte electromecánica del prototipo. Luego de lo cual también es importante reducir el tiempo de transferencia del supercapacitor a la batería, el cual puede verse como un tiempo muerto por parte del usuario. Finalmente, puede ser interesante experimentar con el uso de sistemas embebidos para reemplazar la electrónica implementada en este trabajo. Esto reduciría pérdidas, ampliaría posibilidades de manipulación de las señales eléctricas y reduciría el tamaño del dispositivo.

Referencias

- [1] Y. Song, "American policy on renewable energy and its inspiration", en *Management Science and Engineering (ICMSE)*, 2010 International Conference, Melbourne, VIC, noviembre 24-26, 2010, pp. 1513-1519, doi: 10.1109/ICMSE.2010.5719987
- [2] A. Hamid, M. Navid y N. Saied, "Human passive motions and a user-friendly energy harvesting system", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 25, n° 8, pp. 923-936, 25 mayo 2014, doi: 10.1177/1045389X13502854
- [3] Q. Li, V. Naing, J. A. Hoffer, D. J. Weber, A. D. Kuo y J. M. Donelan, "Biomechanical energy harvesting: Apparatus and method", en *Robotics and Automation*, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on, Pasadena, CA, mayo 19-23, 2008, pp. 3672-3677, doi: 10.1109/ROBOT.2008.4543774
- [4] J. J. H. Paulides, J. W. Jansen, L. Encica, E. A. Lomonova y M. Smit, "Human-powered small-scale generation system for a sustainable dance club", en *Electric Machines and Drives Conference*, 2009. IEMDC '09. IEEE International, Miami, FL, mayo 3-6, 2009, pp. 439-444, doi: 10.1109/IEMDC.2009.5075243
- [5] M. E. Karagozler, I. Poupyerv, G. K. Fedder, y Y. Suzuki, "Paper Generators: Harvesting Energy from Touching, Rubbing and Sliding", en *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User Interface Software and Technology*, New York, NY, octubre 8-11, 2013, pp. 23-30, doi: 10.1145/2501988.2502054
- [6] R. Caliò, U. B. Rongala, D. Camboni, M. Milazzo, C. Steganini, G. de Petris, y C. M. Oddo, "Piezoelectric Energy Harvesting Solutions", en *Journal Sensors*, marzo 10, 2014, vol. 14, núm. 3, pp. 4755-4790, doi: 10.3390/s140304755
- [7] Z. Lei y T. Xiudong, "Large-scale vibration energy harvesting", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 24, n° 11, pp. 1405-1430, 2013, doi: 10.1177/1045389X13486707
- [8] A. Kokkinopoulos, G. Vogas, y P. Papageorgas, "Energy harvesting implementing embedded piezoelectric generators – The potential for the Atiiki Odos traffic grid", en *The International Conference on Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability*, TMREES14, Beirut, Lebanon, Abril, 2014, pp. 1070-1085.
- [9] V. Goudar, R. Zhi, P. Brochu, P. Qibing y M. Potkonjak, "Optimizing the configuration and control of a novel human-powered energy harvesting system", en *Power and Timing Modeling, Optimization and Simulation (PATMOS)*, 2013 23rd International Workshop, Karlsruhe, septiembre 9-11, 2013, pp. 75-82, doi: 10.1109/PATMOS.2013.6662158
- [10] T. Galchev, J. McCullagh, R. L. Peterson y K. Najafi, "Harvesting traffic-induced bridge vibrations", en *Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference (TRANSDUCERS)*, 2011 16th International, Beijing, junio 5-9, 2011, pp. 1661-1664, doi: 10.1109/TRANSDUCERS.2011.5969860

- [11] K. Dongwon, G. A. Rincon-Mora y E. O. Torres, "Harvesting Ambient kinetic energy with switched-inductor DC-DC converters", en *Circuits and Systems (ISCAS), Proceedings of 2010 IEEE International Symposium*, Paris, mayo 30, 2010, pp. 281-284, doi:10.1109/ISCAS.2010.5537878
- [12] A.C. Hua y B. Z. Syue, "Charge and discharge characteristics of lead-acid battery and LiFePO4 battery", en *Power Electronics Conference (IPEC)*, 2010 International, Sapporo, junio 21-24, 2010, pp.1478-1483, doi: 10.1109/IPEC.2010.5544506
- [13] L. Linqiang, W. Dahu, Z. Tong, y H. Mingke, "A Manual Mobile Phone Charger", en *Electrical and Control Engineering (ICECE)*, 2010 International Conference on, Wuhan, junio 25-27, 2010, pp. 79-82, doi: 10.1109/ICECE.2010.28
- [14] L. Wu, A. Zachas, R. Harley, T. Habetler, y D. Divan, "Design of a portable hand crank generating system to power remote off-grid communities", en *Power Engineering Society Conference and Exposition in Africa*, 2007. PowerAfrica '07. IEEE, Johannesburg, julio 16-20, 2007, pp. 1-8, doi: 10.1109/PESAFR.2007.4498043
- [15] D. Dai y J. Liu, "Human powered wireless charger for low-power mobile electronic devices", en *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 3, pp. 767-774, agosto 27, 2012, doi: 10.1109/TCE.2012.6311316

John Sneider Vanegas Varon

Tecnólogo en Electricidad, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; auxiliar de investigación en el Grupo de Investigación en Control Electrónico, GICE, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Contacto: jsvanegasv@correo.udistrital.edu.co

Marco Antonio Latorre González

Tecnólogo en Electricidad, Universidad Distrital Francisco José de Caldas; auxiliar de investigación en el Grupo de Investigación en Control Electrónico, GICE, de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Contacto: malatorreg@correo.udistrital.edu.co

José Danilo Rairán Antolines

Ingeniero electricista, Universidad Nacional de Colombia; magíster en Automatización Industrial, Universidad Nacional de Colombia; PhD en la Universidad Nacional de Colombia; docente en el área de control de sistemas dinámicos, en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas; director del Grupo de Investigación en Control Electrónico, GICE, el cual estudia la aplicación de técnicas de control a sistemas dinámicos.

Contacto: drairan@udistrital.edu.co

