

# Sistema Autónomo de Generación de Energía Mediante el Accionamiento de Pedales

D. Meneses, D. Diaz, P. Alou, J. A. Oliver, O. García, J. A. Cobos

Centro de Electrónica Industrial  
Universidad Politécnica de Madrid  
C/José Gutiérrez Abascal N°2  
28006 Madrid, España

**Abstract** — En este artículo se presenta un sistema de alimentación autónomo que gestiona la energía generada por el accionamiento de unos pedales acoplados a un generador de continua. La gestión energética se realiza mediante un control en banda de histéresis que regula el par mecánico que debe realizar el usuario, complementado con un almacenamiento intermedio de energía. El sistema de alimentación aquí presentado se ha desarrollado para una aplicación concreta, la alimentación de un ordenador portátil. Por ello se ha caracterizado el consumo del mismo, así como la energía suministrada por los pedales utilizados para la generación de la potencia necesaria.

## I. INTRODUCCIÓN

En Abril de 2007, INTEL lanzó una competición entre universidades europeas (Competition On Renewable Energies, CORE), cuyo objetivo era fomentar la generación de ideas y el desarrollo de sistemas capaces de alimentar un ordenador portátil durante una hora, utilizando exclusivamente fuentes de energía renovables. Las condiciones bajo las que se desarrolla el concurso son las siguientes:

- El ordenador, que es el mismo para todas las universidades participantes, debe tener habilitada la conexión inalámbrica
- La batería debe estar desconectada
- La solución presentada debe funcionar durante una hora.
- La aplicación que se ejecuta durante la prueba es la misma para todos los equipos participantes y consiste en la reproducción de un video facilitado por INTEL.
- Como condición extra, los equipos participantes deben estar formados por estudiantes, supervisados por uno o más profesores.

Finalmente fueron 7 las universidades participantes en la competición: Technische Universiteit Delft (Holanda), Katholieke Hogeschool Kempen (Bélgica), Ludwig Maximilian University Munich y Technische Universität Dresden (ambos de Alemania), Dublin Institute of Technology (Irlanda), Politecnico de Milano (Italia) y la Universidad Politécnica de Madrid (España).

Como representante de la Universidad Politécnica de Madrid, el Centro de Electrónica Industrial (CEI) apostó por el desarrollo de dos ideas:

- Utilización de paneles solares, en la que el CEI posee una mayor experiencia,
- Generación de energía mediante pedales accionados por una persona, que constituía un reto mayor puesto que el grupo de trabajo no poseía experiencia previa en la parte mecánica necesaria para la implementación de esta solución.

Finalmente, esta segunda solución fue proclamada ganadora de la competición de entre las soluciones presentadas por los participantes, que incluían la utilización de pilas de combustible o motores de biocombustible. El jurado valoró en esta decisión los beneficios de las soluciones propuestas en distintos ámbitos: simplicidad, fiabilidad, viabilidad comercial, flexibilidad en la implementación y la promoción de una forma de vida activa.

En el presente artículo se va a describir el diseño de la parte eléctrica y electrónica del sistema, desarrollando convenientemente los diversos bloques que componen el mismo, prestando especial atención al elemento más importante del sistema, la bomba de energía.

## II. SOLUCIÓN PRESENTADA

La solución presentada en este artículo, que se corresponde con la opción ganadora mencionada anteriormente, responde a un esquema de bloques general como el mostrado en la figura 1. El sistema está constituido por un motor de continua utilizado como generador, acoplado a los pedales mediante una reductora y una correa, un convertidor continua-continua que actúa como bomba de energía, unos ultracondensadores que realizan la función de “back-up” de energía y por último otro convertidor que adapta el nivel de tensión al adecuado para alimentar correctamente el ordenador portátil.

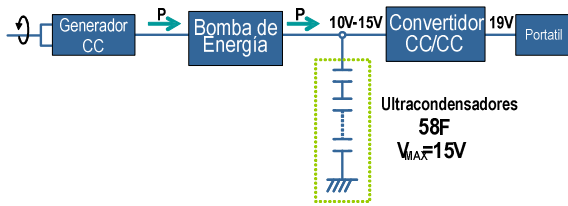


Fig. 1. Diagrama de bloques general de la solución finalmente presentada al concurso.

### III. CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO DEL ORDENADOR PORTÁTIL Y DEL GENERADOR DE CONTINUA

El proceso de diseño comienza con la caracterización del ordenador portátil que se debe alimentar, pues se debe conocer la potencia demandada por el mismo para dimensionar y diseñar el resto de elementos que componen la solución presentada.

#### A. Caracterización del Consumo del Ordenador Portátil:

Para caracterizar la potencia demandada por el ordenador portátil se han realizado distintas medidas variando las condiciones de funcionamiento, modificando la configuración de brillo en la pantalla, estimando el incremento de consumo que produce el ejecutar la aplicación de prueba desde llaves USB y desde la unidad lectora de CD o modificando la frecuencia de funcionamiento de la CPU.

Como resultado de estas medidas, se ha constatado que en todos los casos la tensión de alimentación es de 19V, variando la corriente, y por lo tanto el consumo, según las pruebas realizadas:

- El consumo base del ordenador se ha estimado en 40W (figura 2).
- La disminución del brillo de la pantalla a su valor mínimo, supone un ahorro de 5W.
- Puesto que la prueba consiste en ejecutar un video, se ha analizado el consumo del ordenador cuando la reproducción se realiza desde el reproductor de CDs. Con esta operación el consumo se incrementa hasta los 52W, como puede apreciar en la figura 2, en la que se muestra el consumo medido, antes y después de ejecutar un video desde el reproductor de CD.

A la vista de las medidas realizadas, el medio desde el que se ejecutará la aplicación de prueba de la competición será finalmente el disco duro pues el consumo es menor, respecto a si se reproduce el video directamente desde un CD.

#### B. Generador de Continua.

En la caracterización del consumo del ordenador portátil se ha estimado el mismo en 40W, lo que da lugar a la necesidad de generar alrededor de 80W de potencia mecánica para impulsar los pedales, si se supone un rendimiento global del sistema del 50%.

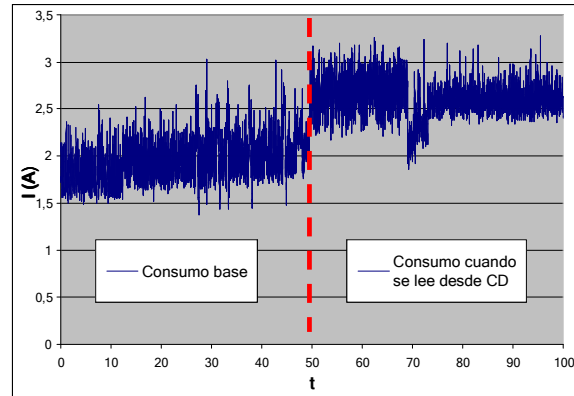


Fig. 2. Consumo base del ordenador portátil, e incremento sobre el mismo cuando se lee desde el CD.

Dadas estas características, se ha optado por utilizar un motor de continua de 100W de potencia, con una tensión nominal de 48V a 3000rpm. Esta velocidad de giro no es adecuada para una persona pedaleando por lo que es imprescindible la utilización de una reductora acoplada al generador a utilizar. La relación de reducción utilizada es de 25 a 1, de manera que suponiendo una velocidad de pedaleo de una pedalada por segundo (60 rpm), que se ha tomado como un ritmo de pedaleo aceptable para una persona sana, se obtiene una tensión media de 25V.

Para caracterizar la tensión y la potencia que se obtienen del motor, cuyas características teóricas se acaban de enunciar, se han realizado medidas sobre el mismo, que quedan reflejados en la figura 3. En estas medidas se puede apreciar como la tensión media obtenida en el generador es algo superior a los 25V, sin embargo es una tensión muy variable que presenta oscilaciones de la tensión instantánea entre los 15V y los 40V.

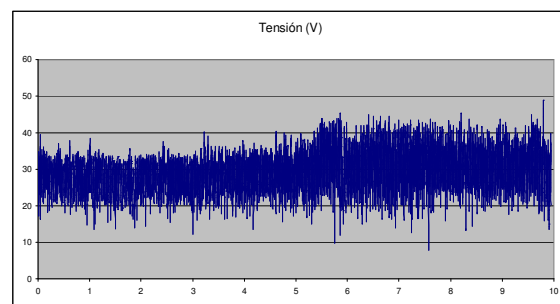


Fig. 3. Tensión medida en el generador.

Una tensión como la reflejada en la figura 3 no es adecuada para alimentar de forma directa el ordenador portátil, pues éste necesita una tensión de alimentación estable de 19V. A este hecho debe sumarse el que la potencia proporcionada por el generador acoplado a los pedales no es constante.

#### IV. ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA: ULTRACONDENSADORES

Como resultado de la caracterización del generador de continua, se ha visto necesario un elemento que estabilice la energía fluctuante proporcionada por el generador de continua, que es muy dependiente de la cadencia de pedaleo. Este elemento supone introducir en el sistema un almacenamiento de energía, que puede ser aprovechado para facilitar la tarea del ciclista permitiendo pequeños momentos de relajación, e incluso de descanso.

Como elementos almacenadores de energía se valoró la posibilidad de utilizar la propia batería del ordenador, una batería de condensadores, o una combinación de ambos elementos [1]. Finalmente se ha optado por utilizar únicamente una batería de ultracondensadores, cuya capacidad total es de 58F. Los ultracondensadores que se van a utilizar tienen una restricción de tensión máxima de 15V.

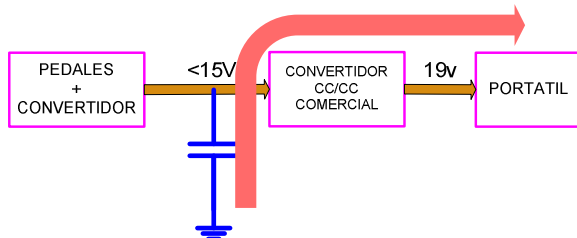


Fig. 4. Funcionamiento del sistema durante el tiempo de descanso del ciclista, se utiliza la energía acumulada en los condensadores.

Durante los descansos del usuario, no se inyecta energía en el sistema de manera que la energía demandada por el ordenador portátil está suministrada totalmente por los ultracondensadores, tal y como se ha reflejado en la figura 4.

Para estimar el tiempo de descanso del que se puede disfrutar cuando los ultracondensadores se encuentran cargados, se puede recurrir a la energía almacenada en estos condensadores.

$$\frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_1^2 - V_2^2) = P \cdot t \quad (1)$$

Según (1) si el ordenador demanda una potencia de 40W y la tensión de los condensadores antes del descanso es de 14V, el tiempo máximo de descanso es de 142s, si se deja que los condensadores se descarguen por completo. Sin embargo, entre los ultracondensadores y el ordenador portátil se ha utilizado un convertidor comercial, para adaptar la tensión a la de alimentación del ordenador portátil, cuya tensión de entrada mínima de funcionamiento es de 9V. De esta manera el tiempo de descanso para que no se apague el ordenador se estima en 84s.

#### V. BOMBA DE ENERGÍA

La bomba de energía es un convertidor continua-continua que trabaja prácticamente todo el tiempo en condiciones de arranque, cargando a los ultracondensadores que se encuentran a la salida del mismo. Es el encargado de demandar energía al generador de continua y cederla a los ultracondensadores. Este convertidor es esencial para el correcto funcionamiento del sistema, pues no sólo debe encargarse de cargar los ultracondensadores de 58F, sino que, al mismo tiempo, debe limitar la corriente de entrada durante el arranque del sistema cuando los condensadores de salida se encuentran totalmente descargados. Este último aspecto es fundamental, pues la corriente media demandada al generador de continua es proporcional al par que se debe ejercer sobre el mismo para una velocidad de giro dada, y por lo tanto cuanto menor sea la corriente de entrada, menor será el esfuerzo del usuario. De esta manera, se persigue controlar el convertidor para que el esfuerzo del ciclista sea razonable y suficiente para suministrar la potencia necesaria.

Para conseguir la funcionalidad perseguida, se ha considerado que el convertidor debe tener las siguientes características:

- Relación de transformación reductora de tensiones, de manera que se favorezca el tener una corriente pequeña en primario.
- Demandar un flujo de energía lo más constante posible.

La bomba de energía se ha diseñado teniendo en cuenta las características mencionadas, y está compuesta por un convertidor Flyback, dada su buena capacidad de regulación, con control en banda de histéresis de la corriente magnetizante. En [2] se puede ver un estudio de topologías y métodos de control que motivan esta decisión. La figura 5 muestra un diagrama de la corriente magnetizante y la banda de histéresis durante el arranque (izquierda de la imagen) y en régimen permanente (parte derecha de la imagen). En esta imagen se ha representado en rojo la corriente demandada al generador en el arranque del sistema, así como su valor medio en verde, que es proporcional al par mecánico que debe vencer el usuario como ya se comentó anteriormente.

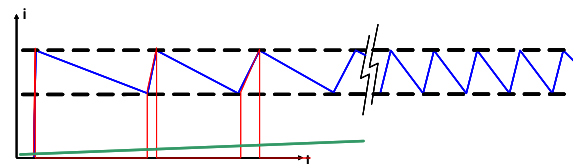


Fig. 5. Corriente magnetizante (azul), corriente en primario del Flyback (rojo) y corriente media demandada al generador (verde).

Puede apreciarse en la figura 5 como esta corriente media es baja en el arranque y aumenta

progresivamente, aumentando de esta manera el esfuerzo que el ciclista debe realizar.

*A. Reconstrucción de la corriente magnetizante y control en banda de histéresis:*

El sistema de control elegido presenta un inconveniente fundamental, que es la imposibilidad de medir la corriente magnetizante de forma directa. Este problema se puede solventar reconstruyendo la corriente magnetizante, si se tiene en cuenta que ésta es la suma de la corriente en el interruptor de primario más la corriente por el diodo de secundario.

$$i_{Lmag} = i_S + i_D \quad (2)$$

Para la realización de esta reconstrucción se ha seguido el esquema presentado en la figura 6. La medida de las corrientes del interruptor y del diodo se realizan mediante sendas resistencias ( $R_{sense1}$  y  $R_{sense2}$ ), que se eligen de manera que la caída de tensión máxima sea del orden de 0.5V, disipando la menor cantidad de potencia posible.

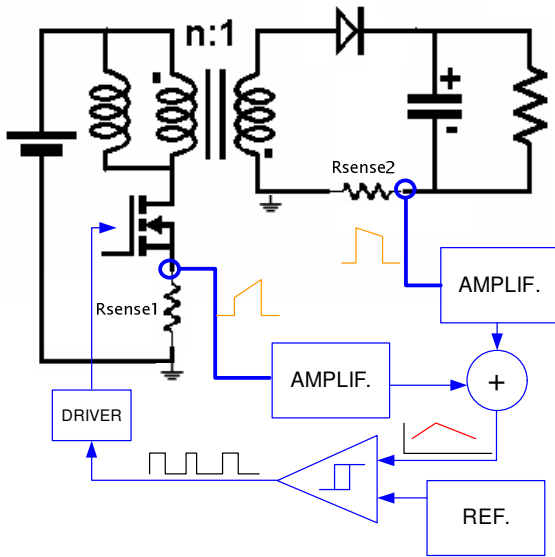


Fig. 6. Esquema de control y reconstrucción de la corriente magnetizante.

*B. Fuente de arranque:*

Debido a las condiciones del concurso, el sistema debe ser autónomo y por lo tanto el control debe alimentarse sin necesidad de recurrir a fuentes de alimentación externas. Para la alimentación del control se ha decidido utilizar una segunda salida tipo flyback en la bomba de energía. El principal problema de esta opción se presenta durante el arranque del convertidor, ya que la tensión de los ultracondensadores de salida es nula y la tensión de entrada es poco homogénea y puede dar lugar a situaciones de mal funcionamiento del control.

Como solución se ha implementado una rama de arranque, figura 7, que permite una conexión directa entre la entrada y la salida de alimentación del control en el momento del arranque. Esta rama que tiene un regulador lineal de 12V, alimenta el control hasta que el condensador de la salida auxiliar alcanza este valor de tensión, dejando de conducir el diodo de la rama de arranque y quedando el convertidor funcionando de forma autónoma.

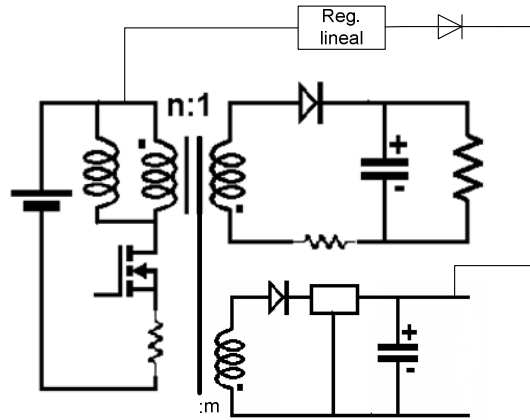


Fig. 7. Fuente de arranque de la alimentación de control.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Teniendo en cuenta las caracterizaciones realizadas en el ordenador portátil y en el generador, se ha diseñado un convertidor flyback de 40W de potencia, con tensión de salida de 15V y un rango de tensiones de entrada entre 15V y 45V.

*A. Implementación física del sistema:*

El aspecto que presenta la solución que fue presentada al concurso CORE de Intel y que se ha reflejado en este artículo, se muestra en la figura 8.

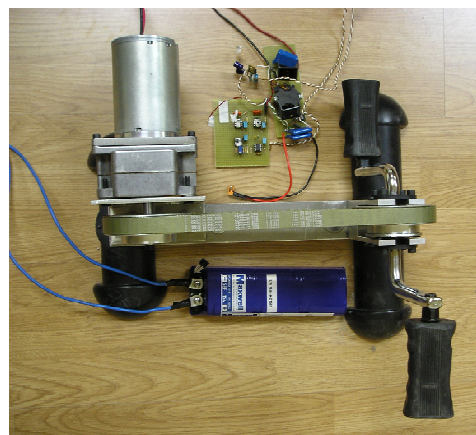


Fig. 8. Sistema completo.

Como detalle de funcionamiento de la bomba de energía, específicamente diseñada para esta solución, se presentan en la figura 9 la forma de onda de la corriente sensada en primario, así como la reconstrucción realizada de la corriente magnetizante, dentro de su banda de histéresis.

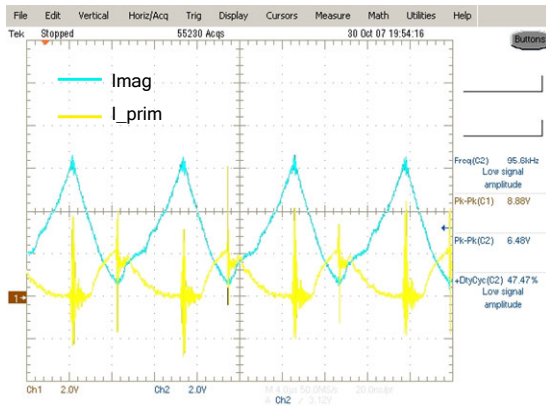


Fig. 9. Reconstrucción de la corriente magnetizante.

Por último se muestra, en la figura 10, una fotografía de una persona utilizando el sistema de alimentación presentado en el artículo. Un vídeo en el que se realiza una demostración del sistema puede verse en la siguiente dirección web:

[http://www.upmdie.upm.es/fichero/Pedal\\_Energy\\_Generator.flv](http://www.upmdie.upm.es/fichero/Pedal_Energy_Generator.flv)



Fig. 10. Ejemplo de utilización del sistema de alimentación autónomo.

## VII. CONCLUSIONES

Se ha desarrollado un sistema de alimentación autónomo basado en un control en banda de histéresis. Este sistema de alimentación suministra de forma continua una potencia de 40W, siendo necesario un pedaleo continuo por parte del usuario. En la solución presentada existe un almacenamiento intermedio de energía, que permite efectuar descansos inferiores a un minuto y medio.

Se ha demostrado experimentalmente que el control con histéresis utilizado es adecuado para esta aplicación, pues se realiza una adecuada gestión de la energía. La corriente que se demanda al generador es constante en régimen permanente, lo que supone un flujo de energía constante dado que la corriente del generador es proporcional al par que se debe ejercer sobre el mismo y por lo tanto al esfuerzo que realiza el ciclista.

La aplicación que se presenta en este artículo consiste en la alimentación de un ordenador portátil, pudiendo adaptarse el sistema de alimentación diseñado a otras aplicaciones tales como la carga de baterías del propio ordenador portátil, baterías de teléfonos móviles, PDAs u otros dispositivos portátiles.

## REFERENCIAS

- [1] L. Palma, P. Enjeti, J. W. Howze, "An Approach to Improve Battery Run-Time in Mobile Applications with Supercapacitors" *IEEE 2003*.
- [2] O. García, P. Alou, J.A. Cobos, J. Uceda y J. Casero. "Practical implementation of a charger of a battery of capacitors (0.5F) for X-ray applications". pp. 2156-2161. *European Power Electronics Conference (EPE'97)*. Trondheim. Noruega. Septiembre 1997.
- [3] N. O. Sokal y R. Redl, "Control Algorithms and Circuit Design for Optimally Flyback Charging an Energy-storage Capacitor". *IEEE Applied Power Electronics Conference, APEC'90*.