

# Solar Cybertech: Competición de Coches con Control Digital Alimentados desde un Panel Solar

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

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

**Abstract** — En el año 2007 se celebró la primera edición de Solar Cybertech, un concurso constituido como asignatura, en el cual equipos de estudiantes toman contacto con la electrónica y las energías renovables. Además de estos objetivos, se pretende motivar a los estudiantes en el trabajo en equipo, así como en la utilización de los conocimientos teóricos adquiridos en una aplicación práctica. El concurso consiste en diseñar y construir un vehículo alimentado desde paneles solares que sea capaz de recorrer un circuito con tramos en pendiente y sombra. Para la gestión de la energía desde los paneles solares hacia el motor del coche solar, se utilizará un convertidor cc/cc. El control del mismo será implementado digitalmente con un algoritmo de búsqueda del punto de máxima potencia.

## I. INTRODUCCIÓN

El concurso Cybertech surge en el año 2001 en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de Madrid con una única prueba, la de rastreadores, que tiene como objetivo diseñar y construir un robot que sea capaz de completar un recorrido formado por una línea negra sobre un fondo blanco. Con el paso de los años se fueron añadiendo pruebas, tales como diseñar un robot capaz de encontrar la salida de un laberinto, o realizar un robot “torero” capaz de interactuar con un robot “toro” creado por la organización.

En el año 2007 se introdujo en el marco de este concurso una nueva prueba, que obedece al creciente interés en las energías renovables. Esta nueva prueba consiste en completar un circuito con varias dificultades, en el menor tiempo posible, utilizando como única fuente de energía un panel solar.

Las dificultades que se han introducido en el circuito son:

- Tramo de subida.
- Tramo de sombra.

Estas dificultades permiten realizar un circuito en forma de 8 con dos guías para realizar competiciones de dos coches en paralelo y teniendo ambas guías la misma longitud. En la Fig. 1 se muestra una fotografía del aspecto final del circuito durante la celebración de la prueba, en la que se pueden apreciar los mencionados

obstáculos, que surgen de forma natural al realizar un puente para dar la forma deseada al circuito.

Teniendo en cuenta estas dificultades en el avance de los vehículos, se convierte en prioritario el realizar un buen manejo de la energía obtenida de una fuente que proporciona una potencia limitada. Por ello cada vehículo incorpora un convertidor continua-continua para realizar una adecuación de la potencia generada en el panel solar, a la demandada por los motores que impulsan el vehículo.

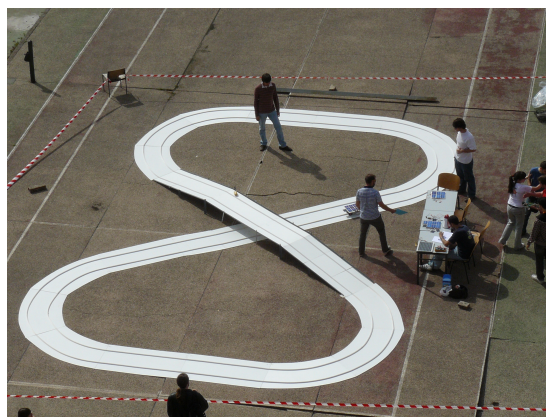


Fig. 1. Fotografía del circuito usado en Solar Cybertech.

Para cumplir con el objetivo fijado para el concurso, completar el circuito en el menor tiempo posible, es necesario obtener la mayor potencia posible del panel. Por ello los participantes deben implementar un algoritmo de control que haga trabajar al convertidor continua-continua en el punto de máxima potencia (MPPT o Maximum Power Point Tracker).

La Fig. 2 muestra el diagrama de bloques del sistema utilizado para la prueba solar de Cybertech.

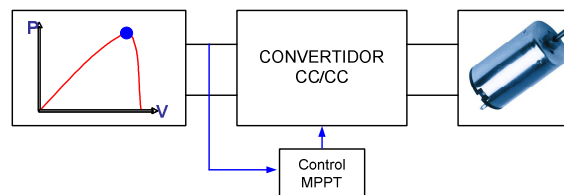


Fig. 2. Diagrama de bloques del sistema.

## II. DOCENCIA

Con la implantación del nuevo plan de estudios, el concurso Cybertech pasó a formar parte de la oferta de asignaturas de libre elección, siendo dos profesores responsables de la asignatura. Como parte de la asignatura se imparten talleres, en los que los equipos participantes aprenden los conocimientos básicos que necesitan para llevar a cabo las pruebas en las que participan, y un ciclo de conferencias que relacionan distintos aspectos de la tecnología con otras áreas sociales, como el arte o la conservación del medio ambiente.

Dentro de la estructura de la asignatura y del concurso, a cada equipo participante se le asigna un tutor, generalmente un estudiante que posee cierta experiencia dado que ha participado como concursante en años anteriores. Este tutor supervisa el trabajo realizado por sus equipos, que por lo general no exceden el número de dos o tres para garantizar una adecuada atención, a la vez que asesora a los equipos en aspectos diversos como el diseño del convertidor, el control del mismo, o el diseño del vehículo participante (Fig 3).

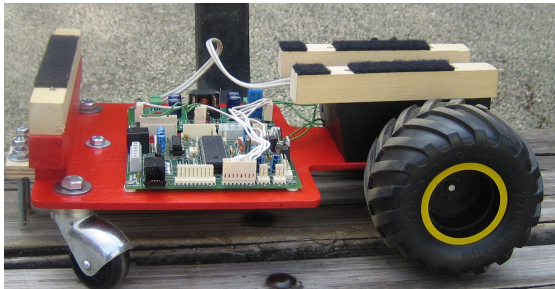


Fig. 3. Vehículo participante: estructura, convertidor y placa de control.

Los equipos están constituidos por entre 3 y 5 estudiantes, con la intención de que el trabajo se reparta entre todos los miembros del mismo, siendo a su vez más fácil para los respectivos tutores el control del trabajo realizado por los distintos estudiantes dentro de un mismo equipo. Los equipos deben aportar una documentación antes de comenzar el concurso con las posibles soluciones que puedan aportar para completar la prueba y orientar a sus tutores en el conocimiento previo que poseen sus respectivos grupos. Como trabajo final se somete a los estudiantes a un examen práctico, que supone además un requisito para participar en el concurso puesto que el mismo consiste en completar una de las partes del circuito final.

Con el formato de la asignatura se pretende, además de fomentar el trabajo en equipo y la competitividad de los estudiantes, que estos entren en contacto con la electrónica, desarrollando una aplicación práctica, construyendo un prototipo y realizando pruebas sobre el mismo.

## III. CONSTRUCCIÓN DE UN COCHE SOLAR

Como ya se ha comentado, cada equipo participante debe construir un vehículo, que de aquí en adelante denominaremos coche solar, que consta de una estructura en la que se fijan los elementos que componen el diagrama de bloques de la Fig. 2. Estos elementos se desarrollan en las siguientes subsecciones.

### A. Paneles Solares

Como fuente de alimentación de los coches se utilizarán paneles solares fotovoltaicos. Éstos aprovechan una fuente renovable de energía, el Sol, con la limitación de que no siempre puede disponerse de ella, ni tampoco obtener la misma intensidad.

Los paneles solares están compuestos de combinaciones de celdas. Dichas celdas tienen el diagrama que se muestra en la figura 4.

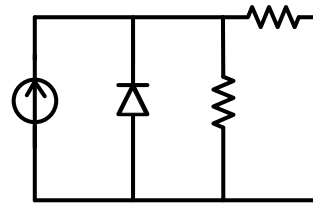


Fig. 4. Esquema eléctrico de una celda solar

Los paneles elegidos tienen una potencia máxima teórica de 10W. El peso es de 2Kg, y sus dimensiones 340x330 (cm). La tensión de circuito abierto es de 21.5V mientras que la corriente de cortocircuito es de 0.62A

Los paneles se han medido, obteniéndose las curvas tensión-corriente y tensión-potencia, que se muestran en la Fig. 5

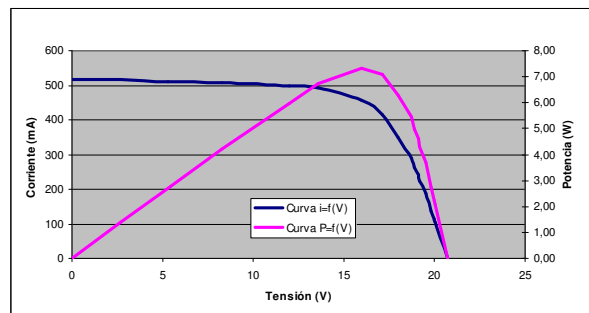


Fig. 5. Curvas medidas del panel solar de 10W

Por otro lado, puede verse en las medidas que, incluso orientando el panel hacia el sol, la potencia ofrecida por éste no supera el 80% de su especificación en el punto de máxima potencia, por lo que el diseño del sistema debe maximizar el rendimiento y minimizar el peso de manera que la potencia generada sea suficiente para que el coche complete el circuito lo más rápido posible.

### B. Convertidor CC/CC

Para gestionar correctamente la energía y obtener la mayor cantidad de potencia posible, se utilizará un convertidor continua-continua controlado por modulación de ancho de pulso.

Dado que la tensión que se obtenga de los paneles puede tomar valores mayores y menores que la nominal del motor, dependiendo de la elección del mismo, se consideró utilizar la topología flyback para la implementación del convertidor cc/cc, ya que es capaz de elevar y reducir tensión.

Para la edición 2007, se proporcionó el diseño del convertidor y una PCB, Fig. 6, para su implementación física, así como un tutorial para su montaje.

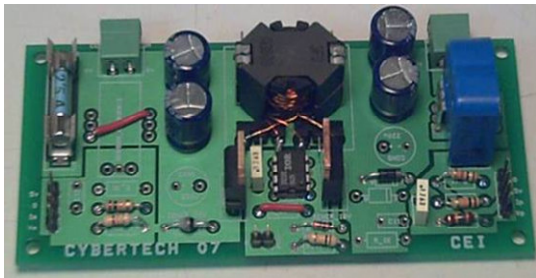


Fig. 6. Placa de circuito impreso del convertidor Flyback usado en la edición de Solar Cybertech del año 2007.

### C. Control del convertidor

El control del convertidor cc/cc será un elemento imprescindible del sistema por dos motivos principales:

- Búsqueda del punto de máxima potencia del panel
- Adecuación de la energía desde los paneles solares al motor de cc del coche.

El control implementado será digital, con un PIC18F442, utilizándose para su implementación una placa de control proporcionada por la organización de Cybertech.

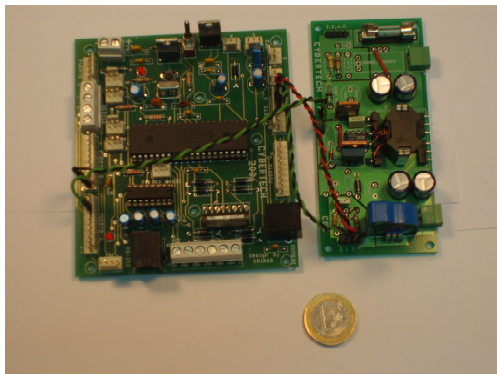


Fig. 7. Placa de control (izqda.) y convertidor Flyback (dcha.) usados en la edición de Solar Cybertech del año 2007.

Para realizar el control del convertidor, en este caso la búsqueda del punto de máxima potencia del panel (MPPT), necesitamos medir dos parámetros, la tensión y la corriente a la entrada para lo cual se usará un divisor resistivo y un sensor de corriente comercial.

El algoritmo consiste en irse moviendo a incrementos pequeños por la curva de potencia del panel teniendo en cuenta las dos zonas de la misma, la zona estable (a la derecha del punto de máxima potencia) y la inestable (a la izquierda del punto de máxima potencia) e ir comparando la potencia del nuevo punto con la del anterior y decidir en función de si es mayor o menor hacia donde moverse en la curva.

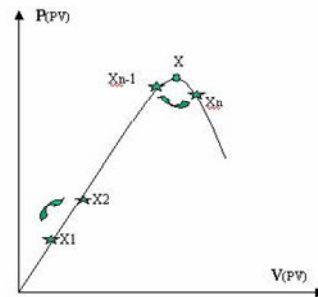


Fig. 8. Curva V-P de un panel solar. Explicación del algoritmo de MPPT

En el punto de trabajo en que se esté, se guardará el valor de tensión y potencia. Se hará una variación del ciclo de trabajo y se comparará la nueva potencia con la anterior, teniendo en cuenta si la tensión ha aumentado o disminuido. Si ha aumentado la potencia y estamos en la parte derecha de la curva (de  $X_n$  a  $X_{n-1}$  en la figura), aumentaremos el ciclo de trabajo. Si, por el contrario, estamos en la parte izquierda de la curva (de  $X_1$  a  $X_2$ ), disminuirémos el ciclo de trabajo. Para conocer en que parte de la curva estamos, para poder determinar el signo de ese incremento de ciclo de trabajo, guardaremos el valor de tensión correspondiente a la potencia, ya que sin este dato el ciclo de trabajo se acabaría saturando a uno y la potencia obtenida del panel sería nula.

La señal PWM proveniente de la placa de control se aplicará a un driver, el cual adecuará el valor de tensión para poder gobernar correctamente el MOSFET del convertidor.

### D. Motor de CC

El motor de corriente continua es un elemento fundamental del sistema, que recibirá la potencia regulada del convertidor cc/cc transmitiéndola a las ruedas del vehículo a través de una reductora. Dicho elemento disminuye la velocidad de giro nominal (3000rpm) del motor de continua, aumentando el par que proporciona el motor y permitiendo al coche subir el tramo con pendiente del circuito.

No hay límite en el número de motores a utilizar, siendo decisión de cada equipo el número y tipo de motor a utilizar, así como su disposición y conexión.

En la primera edición del concurso, en el año 2007, se inscribieron 14 equipos (unas 70 personas), de los cuales todos fueron capaces de dar una vuelta al circuito. Dos equipos consiguieron realizar la vuelta completa cruzando la zona de sombra. Otro equipo implementó un sistema de orientación del panel solar para obtener la máxima potencia posible del mismo en cualquier posición del circuito, obteniendo el premio a la innovación tecnológica que entrega la organización.

## V. SOLAR CYBERTECH 2008

Para la edición de Solar Cybertech 2008, que tuvo lugar a finales del mes de Abril, se han realizado algunas modificaciones en el concurso, con el objetivo de potenciar el aprendizaje y la motivación de los alumnos.

En lugar de proporcionar un único tipo de panel, en esta edición se han ofrecido distintas alternativas, que proveen diferentes potencias y tienen diferentes tamaños (mm x mm) y pesos (g):

1. 10W/ 340x330/ 2000
2. 5W/ 270x270/ 800
3. 1.38W/ 75x116/ <10
4. 1.38W/ 75x64/ <10
5. 770mW/ 75x46/ <10
6. 550mW/ 75x116/ <10
7. 220mW/ 35x30/ 100
8. 100mW/ 67x35/ 50

Las alternativas de 3 a 6 son celdas individuales, que los equipos combinan, dentro de las restricciones, para obtener la configuración elegida de potencia y tensión. Por otro lado, las opciones 1 y 2, de 10W y 5W respectivamente, son soluciones comerciales completas, con varias celdas interconectadas y con un cristal de protección incorporado. Tienen la ventaja de ser más robustos pero el sistema de protección de las celdas incrementa su peso. Las opciones 7 y 8 son soluciones completas de bajo peso, pero la potencia que proporcionan es reducida.

Teniendo en cuenta estas características, será necesario tener unas restricciones en la selección de los paneles:

- El tamaño máximo será de 330x340 (mm).
- Solo pueden combinarse las celdas solares, es decir, los grupos 3-6 y 1-2.
- La potencia máxima de una combinación será de 10W.

En los grupos del 3 al 6 es necesario poner varios paneles en serie ya que la tensión de circuito abierto (cercana a la tensión del punto de trabajo buscado) es de

0.55V, demasiado baja para el buen funcionamiento del sistema.

Dado que cada tipo de panel solar presenta unas características en tensión diferentes, la tensión del punto de máxima potencia variará de unos a otros. Esta tensión será, en la mayoría de los casos, diferente a la nominal de trabajo del convertidor.

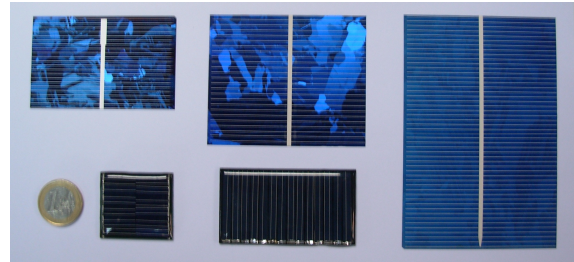


Fig. 9. Diferentes tipos de paneles solares utilizados en Solar Cybertech 2008.

Las nuevas configuraciones de paneles tienen diferentes tensiones de trabajo, luego existe la necesidad de considerar varias topologías para el convertidor cc/cc:

- Topología elevadora
- Topología reductora
- Topología flyback

La topología flyback es la más versátil de las tres, ya que funciona para cualquier configuración de paneles y cualquier motor. La topología reductora se utiliza cuando la menor tensión del panel sea mayor que la tensión de trabajo del motor. La topología elevadora se usa en el caso inverso.

También se ha añadido la tarea de diseñar el convertidor. Para ello se incluyó un taller adicional y se creó una guía de diseño para simplificar esta tarea [1].

La plataforma para la implementación del control ha sido otro aspecto en el que se han introducido mejoras. La placa usada en la edición 2007, al estar diseñada para incluir otras funcionalidades, tiene un alto consumo de potencia, superior a 1W. Otro inconveniente es el elevado número de componentes, que dificulta su análisis ante un fallo en la misma.

Para la segunda edición del concurso, se ha cambiado la placa de control por Arduino, una plataforma de hardware abierta, que proporciona una mayor simplicidad respecto a la placa anteriormente comentada, así como un menor consumo. En este aspecto se ha reducido a aproximadamente 200mW, frente a más de 1W en el caso de la placa del PIC. El procesador en este caso es un ATmega 168. Se ha utilizado la versión USB, ya que mediante la conexión al ordenador con ese conector proporcionamos la alimentación y podemos programarlo sencillamente.



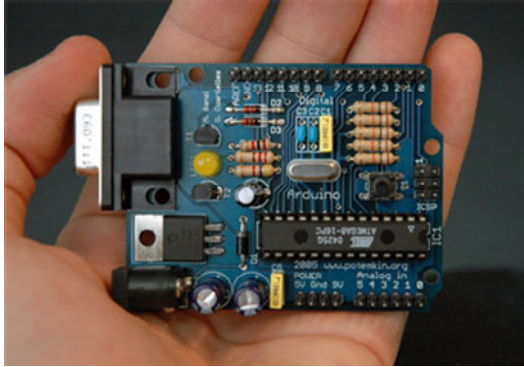


Fig. 10. Placa de control (Arduino) utilizada en la edición de Solar Cybertech del año 2008.

Aunque Arduino es una plataforma abierta, y los usuarios comparten los programas creados, se encontró que no existía uno que generase una señal PWM de la frecuencia deseada (100kHz) y con capacidad de modular el ancho de pulso. Por lo tanto se desarrolló esa herramienta originalmente, adjuntándose el código en la Fig. 11.

En la segunda edición se inscribieron 10 equipos (unos 50 alumnos), de los cuales todos fueron capaces de dar una vuelta al circuito. Cuatro equipos consiguieron realizar la vuelta completa cruzando la zona de sombra. El premio a la innovación tecnológica se entregó en esta ocasión a un equipo que implementó un sistema de embrague accionado por un servo-motor, utilizando un sensor de luz (LDR).

Toda la información del concurso Cybertech se encuentra recogida en la página web:

<http://www.disam.upm.es/cybertech/>

## VI. EXPERIENCIA DOCENTE

La experiencia obtenida durante el concurso Solar Cybertech ha sido muy positiva, ya que los alumnos han estado muy motivados e implicados en el concurso. Además del tiempo dedicado al mismo, los alumnos han mostrado un interés especial en poder adquirir un panel solar para perfeccionar el coche solar en sus ratos de ocio.

Este concurso se ha constituido como una asignatura, sirviendo a los alumnos como introducción a la electrónica, desarrollando una aplicación de tipo práctico. Adicionalmente, han adquirido conocimientos acerca de energía solar, fuentes conmutadas y sobre la programación y aplicación de microprocesadores. En definitiva, se han tenido que enfrentar con todos los problemas que pueden aparecer al poner en funcionamiento algo real (desde el algoritmo de control hasta el ajuste de los tornillos de las guías).

Los grupos de alumnos estaban, en su mayoría, integrados por alumnos de la especialidad electrónica y

automática y otras afines. Era frecuente encontrar equipos con personas de diferentes especialidades que, de forma natural, se reparten las tareas del vehículo. También esta experiencia ha servido como atractivo para alumnos de los primeros cursos a la hora de elegir especialidad.

```
#include "wProgram.h"
#include "pwmfast.h"

#ifndef cb1
#define cb1(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) &= ~_BV(bit))
#endif
#ifndef sb1
#define sb1(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))
#endif

pwmFast::pwmFast(int pin)
{
    pinMode(pin, OUTPUT);
    _pin = pin;
}

void pwmFast::configurar()
{
    sbi(TCCR1A, COM1A1);
    sbi(TCCR1A, WGM11);
    cb1(TCCR1A, COM1A0);
    cb1(TCCR1A, WGM10);

    sbi(TCCR1B, WGM13);
    sbi(TCCR1B, WGM12);
    cb1(TCCR1B, CS12);
    cb1(TCCR1B, CS11);
    sbi(TCCR1B, CS10);
    cb1(TCCR1B, ICN1);
}

void pwmFast::writePeriod(int T)
{
    sreg = SREG;
    // Disable interrupts
    cli();
    ICR1 = T;
    SREG = sreg;
    // Enable interrupts
    sei();
}

void pwmFast::writeDuty(int d)
{
    sreg = SREG;
    // Disable interrupts
    cli();
    OCR1A = d;
    SREG = sreg;
    // Enable interrupts
    sei();
}
```

Fig. 11. Librería desarrollada para Arduino para obtener una señal PWM de alta frecuencia

## AGRADECIMIENTOS

### Tutores de Solar Cybertech 2007:

- María Santos Sánchez
- Eduardo Morales Cas
- Roberto Gutierrez González
- Iván Arianes Ortiz

### Tutores de Solar Cybertech 2008:

- Alejandro Rodríguez Anguita
- Pilar Montero Morales
- Beatriz Tato Eirín
- Pablo López Cenamor

## REFERENCIAS

[1] Tutoriales generados para los alumnos participantes en el concurso:

[http://www.upmdie.upm.es/Cybertech\\_08/solar.html](http://www.upmdie.upm.es/Cybertech_08/solar.html)

[2] Manual Arduino: <http://www.arduino.cc/>

[3] Datasheet ATmega168.