

Estudio del rendimiento de un seguidor solar integrado en IoT

Aitor García-Blanco

Dpto. de Ing. Eléctrica, Electrónica y Automática

Universidad de Extremadura

Badajoz - SPAIN

Email: aigarciab@alumnos.unex.es

Carlos J. García-Orellana

Dpto. de Ing. Eléctrica, Electrónica y Automática

Instituto de Computación Científica Avanzada (ICCAEx)

Universidad de Extremadura

Badajoz - SPAIN

Email: cjpgarcia@unex.es

Eugenio Abéngozar-García

Dpto. de Ing. Eléctrica, Electrónica y Automática

Instituto de Computación Científica Avanzada (ICCAEx)

Universidad de Extremadura

Badajoz - SPAIN

Email: euabga04@alumnos.unex.es

Abstract—El Trabajo Fin de Grado (TFG) pretende estudiar la mejora en la producción fotovoltaica que se consigue con un seguidor solar de dos ejes respecto a un panel fijo. Para ello, se diseñará y fabricará un prototipo formado por dos paneles solares pequeños, uno de ellos fijo y otro sobre un seguidor de dos ejes controlados por servos tipo bus. Para estudiar la producción de energía se conectará cada panel a una carga activa, diseñada para este trabajo, y controlada por microcontrolador. Los datos obtenidos se subirán a una plataforma de Internet de las Cosas (IoT).

Index Terms—Seguidor solar, IoT, carga activa, panel fotovoltaico, rendimiento fotovoltaico.

I. OBJETIVO DEL TFG Y PLAN DE TRABAJO

El Trabajo Fin de Grado (TFG) forma parte actualmente de todos los estudios de Grado. En general, es una asignatura más en la que el alumno debe demostrar la adquisición de competencias del título mediante el desarrollo de un trabajo autónomo, pero dirigido. En los estudios del ámbito científico el TFG es algo novedoso y a veces se le da un carácter excesivamente investigador, confundiendo con *Tesinas* posteriores a las antiguas Licenciaturas.

El Trabajo Fin de Grado, del que presentamos sus objetivos, planificación y desarrollo parcial, se enmarca dentro de los estudios del Grado en Física de la Universidad de Extremadura. En el Plan de Estudios del Grado en Física [1] el TFG tiene asignados 6 créditos ECTS y el Plan Docente [2] indica que “*el TFG tiene como objetivo que el estudiante del Grado en Física desarrolle con autonomía los conocimientos y capacidades adquiridos para realizar trabajos relacionados con ese título, demostrando así que ha alcanzado las competencias previstas en su plan de estudios*”. Las competencias del Grado en Física se centran en que el estudiante adquiera una formación de base a la hora de afrontar y resolver problemas, con espíritu crítico y creatividad, relacionados con el ámbito de la Física y las Ciencias, aunque no únicamente.

También se hace énfasis en el dominio de las técnicas y metodologías experimentales. Los estudiantes del Grado en Física cursan dos asignaturas de Electrónica Analógica y Digital de forma obligatoria y pueden cursar una optativa de Dispositivos Semiconductores.

Por tanto, en relación con el TFG planteado, el estudiante tiene conocimientos de Electrónica Analógica y Digital (incluidos microcontroladores y FPGAs), además de conocimientos de Astrofísica (han cursado una asignatura) y de varios métodos experimentales.

A. Objetivos del TFG

El TFG planteado tiene objetivos en dos ámbitos. Por un lado, los objetivos relacionados con las competencias del título y por otro lado, los objetivos concretos del trabajo a realizar.

Objetivos relacionados con las competencias:

El TFG planteado no únicamente aborda el diseño de un sistema Electrónico para una aplicación concreta, sino que principalmente pretende que el alumno pueda poner en práctica las competencias a adquirir con la titulación [1]. En concreto, se pretende que el alumno trabaje las siguientes áreas:

- Se desea fortalecer los conocimientos de Electrónica Analógica y Digital, en particular en microcontroladores y sistemas de prototipado rápido.
- Introducir al alumno en sistemas de comunicación inalámbricos y de “*Internet de las Cosas*” (IoT), tomando como base los conocimientos adquiridos.
- Aplicar las competencias adquiridas en la asignatura de Astrofísica para realizar un seguimiento de la posición solar.
- Desarrollar las competencias generales ligadas a la elaboración y presentación del TFG.

Objetivos del trabajo:

El objetivo principal del TFG es estudiar el rendimiento de un seguidor solar de dos ejes, con respecto a un panel solar en una posición fija, todo ello de forma rigurosa y sistemática.

Para ello, se deben abordar los siguientes objetivos concretos:

- Diseñar y fabricar el sistema mecánico del seguidor, formado por una estructura (realizada con impresión 3D) y por servomotores de tipo bus. Para efectuar el seguimiento se utilizará un sistema basado en microcontrolador utilizando las ecuaciones físicas del seguimiento solar para buscar en todo momento la mejor incidencia de la radiación solar.
- Medir de forma precisa la capacidad de producción de energía de cada uno de los dos paneles solares (del montado sobre el seguidor y del fijo). Para ello, proponemos utilizar una carga activa, controlada por microcontrolador, que busque el punto de máxima potencia de cada panel en cada momento.
- Subir periódicamente la potencia máxima de cada panel a una plataforma de 'Internet de la Cosas' (IoT), facilitando así la captura de datos.

B. Plan de Trabajo

El plan de trabajo inicialmente propuesto divide el desarrollo del TFG en cuatro partes, abordando las dos primeras de forma secuencial y las dos últimas en paralelo entre sí. Dichas partes son las siguientes:

- 1) Desarrollo y test de la carga activa. Sin duda es la parte con más contenido electrónico del TFG, tanto analógico como digital. Se realizará el diseño, el montaje como prototipo y el montaje definitivo, además del testeo correspondiente. También se desarrollará el software para su integración en IoT.
- 2) Diseño y fabricación de la estructura del seguidor. Se diseñará y fabricará mediante impresión 3D la estructura para albergar el seguidor y la placa solar fija. Se desarrollará el software para el guiado según la posición solar.
- 3) Toma de datos. Una vez montado el sistema completo se dejará tomando datos durante varios días, con el fin de obtener resultados estadísticamente significativos.
- 4) Memoria del TFG. Dado que la fase anterior será relativamente desatendida, se comenzará en paralelo con ella la escritura de la memoria final del TFG.

II. DESARROLLO ACTUAL

En esta sección describiremos de forma general el desarrollo actual del TFG, explicando las partes más relevantes del mismo.

A. Descripción global

De forma global el sistema a diseñar y construir pretende estudiar la mejora en el rendimiento obtenido en un panel solar cuando éste está montado en un seguidor solar, con respecto a uno que permanezca fijo, con la orientación más favorable. Para ello, iremos moviendo el seguidor según las ecuaciones del movimiento solar (en función de la posición GPS de nuestro sistema) y en cada paso del movimiento buscaremos la máxima potencia eléctrica que podemos extraer de cada uno de los dos paneles.

Para obtener esta potencia máxima utilizaremos una carga activa controlada por un microcontrolador, que conmutaremos entre los dos paneles. Dicha carga activa la diseñaremos y montaremos como parte del TFG, basándonos en uno de los diseños ya existentes [3], y subirá las medidas obtenidas a una plataforma de IoT. Para buscar la potencia máxima, el microcontrolador irá variando la corriente que demanda la carga activa (*setpoint*), realizando un barrido y medirá la tensión del panel bajo estudio, obteniendo al final del barrido la potencia máxima que se puede extraer del panel en cuestión.

Los paneles solares elegidos para el trabajo son paneles de 13x15 cm. de tamaño, con una potencia de 3 W y V_{OC} de 6.1 V y una I_{SC} de 600 mA, siendo por tanto estos valores los límites de trabajo de nuestra carga activa.

B. Microcontrolador ESP32

El microcontrolador es uno de los elementos fundamentales utilizados en el TFG, ya que se encargará de controlar la carga activa y el movimiento de los servomotores que realizarán seguimiento.

El microcontrolador elegido ESP32 del fabricante Espressif. Se trata de un microcontrolador de 32 bits, con WiFi y bastante potencia. Las especificaciones detalladas las podemos encontrar en [4], siendo las más destacables las siguientes:

- Dispone de 520 KBytes de memoria SRAM y 448 KBytes de ROM.
- Hasta 16 MBytes de memoria Flash externa por SPI, mapeable en la zona de solo lectura.
- La tensión de trabajo se sitúa entre 3.0 y 3.6 V.
- La frecuencia de operación es de hasta 240 MHz.
- Incluye varios periféricos integrados en el chip: contadores, generadores PWM, buses I2C y SPI, etc.
- Dispone de varios ADC de hasta 12 bits y dos salidas DAC de 8 bits.
- Comunicaciones WiFi y Bluetooth.

El microcontrolador en sí, no tiene memoria Flash, por lo que normalmente se distribuye como un módulo que incluye dicha memoria, además del reloj y la antena. En nuestro caso hemos utilizado el módulo montado en una placa de desarrollo.

Para la elección de este microcontrolador se ha tenido en cuenta su conectividad (dispone de WiFi) y sus convertidores ADC y DAC. Sin embargo, a la hora de trabajar con los convertidores nos hemos encontrado con ciertos problemas.

Por un lado, los convertidores ADC (de tipo SAR) tienen un voltaje de referencia de alrededor de 1,1 V (el valor concreto

viene grabado internamente y se puede leer), por lo que incorporan un atenuador programable a la entrada. En nuestro caso, hemos seleccionado una atenuación de 6 dB, lo que nos ofrece un rango efectivo de trabajo para las entradas del ADC de entre 150 mV y 1,75 V [5], lo cual nos obliga en la etapa de adaptación de señal a efectuar un desplazamiento de la señal para entrar en el rango de trabajo del ADC. Además, para mejorar la linealidad hemos bajado la resolución a 11 bits.

Por otro lado, en el DAC tenemos un problema similar. Su rango es aproximadamente desde los 150 mV hasta los 3,2 V, por lo que también tenemos que desplazar la señal, pero ahora hacia abajo, para así poder controlar de forma adecuada la carga activa y poder obtener corrientes suficientemente bajas. En este caso, la linealidad no nos importa tanto.

El desarrollo del software se ha realizado mediante el uso del entorno de desarrollo Arduino [6], que soporta perfectamente el microcontrolador ESP32. Arduino, con su sintaxis basada en el lenguaje C, supone un entorno sencillo y cómodo para el desarrollo de este tipo de aplicaciones de prototipado rápido, a pesar de sus posibles limitaciones.

C. Carga activa

El diseño y montaje de la carga activa es una de las partes fundamentales del trabajo y su desarrollo permite que el estudiante mejore sus competencias en Electrónica Analógica y Digital.

La carga activa cuenta con un MOSFET controlado por un amplificador realimentado mediante muestreo de corriente, formando una fuente de corriente cuyo valor vendrá marcado por una tensión de control. Se utilizará un DAC y un ADC del microcontrolador para controlar la corriente absorbida por la carga activa. Igualmente se medirá la tensión del panel (con otro ADC) para así calcular la potencia disponible en cada momento.

El diseño de cada uno de los bloques se ha realizado utilizando el simulador LTSpice [7], realizando posteriormente la simulación completa para verificar su correcto funcionamiento, incluido el modelo de la placa solar.

El esquema completo de la carga activa lo podemos ver en la Fig.1, en el cual hemos marcado los diferentes bloques funcionales, que describiremos con más detalle a continuación.

Fuente controlada de corriente:

La fuente controlada de corriente es una de las partes centrales de nuestro diseño. Como podemos observar en la Fig. 1 sus elementos fundamentales son el transistor MOSFET Q_1 , la resistencia R_5 y el operacional U_{1A} . El esquema corresponde al habitualmente utilizado para una fuente de corriente controlada por tensión, utilizando para ello un esquema de realimentación de *corriente en serie* [8]. La resistencia R_5 muestrea la corriente y mediante el lazo de realimentación el amplificador operacional U_{1A} controla el MOSFET Q_1 para llevar la corriente al valor de referencia (*setpoint*) fijado por la tensión presente en la entrada no inversora de U_{1A} , según la expresión 1.

$$I_{setpoint} = \frac{V_{setpoint}}{R_5} \quad (1)$$

Si consideramos que la carga activa debe trabajar en el rango de 0 a 700 mA, tenemos que el voltaje de control en la entrada no inversora de U_{1A} debe estar entre 0 y 350 mV.

Respecto a las características de los componentes, debemos destacar que Q_1 debe tener una tensión umbral de alrededor de 2 V (trabajamos con 3.3 V de alimentación), U_{1A} debe ser de tipo *rail-to-rail* y R_5 de una tolerancia del 1%.

Desplazadores y adaptadores de nivel:

Como hemos comentado anteriormente, los problemas con el rango inferior de los ADC y el DAC del ESP32 nos obliga a desplazar nuestras señales para entrar en los rangos de funcionamiento adecuado.

Hemos utilizado para el desplazamiento y la atenuación necesaria el circuito que podemos observar en la Fig. 2. Si analizamos en circuito, la relación entre la salida y la entrada viene dada por la expresión 2.

$$V_{out} = \frac{R_2 R_1}{R_1 R_3 + R_2 R_3 + R_2 R_1} V_{in} + \frac{R_2 R_3 V_{ref}}{R_1 R_3 + R_2 R_3 + R_2 R_1} \quad (2)$$

Si se cumple la condición de que $R_1 \gg R_2$ y que $R_1 \gg R_3$, entonces la expresión 2 se puede aproximar por la expresión 3. En la que podemos ver que el circuito se comporta aproximadamente como un divisor de tensión más un desplazamiento. El signo de este desplazamiento depende del signo de V_{ref} .

$$V_{out} \approx \frac{R_2}{R_3 + R_2} V_{in} + \frac{R_2 R_3 V_{ref}}{R_1 (R_3 + R_2)} \quad (3)$$

Como podemos observar en el esquema global (Fig. 1), hemos utilizado tres circuitos de este tipo para adaptar las señales, dos de ellos con un desplazamiento positivo (para las entradas ADC del microcontrolador) y el otro con un desplazamiento negativo (para la salida DAC), concretamente:

- *Adaptador corriente panel (ADC2):*
 $V_{in} \rightarrow 0 \dots 3,3 \text{ V}$ y $V_{out} \rightarrow 0,3 \dots 1,7 \text{ V}$
- *Adaptador tensión panel (ADC1):*
 $V_{in} \rightarrow 0 \dots 7 \text{ V}$ y $V_{out} \rightarrow 0,3 \dots 1,8 \text{ V}$
- *Adaptador de control (DAC):*
 $V_{in} \rightarrow 0,15 \dots 3,3 \text{ V}$ y $V_{out} \rightarrow 0 \dots 0,35 \text{ V}$

Generador de tensión negativa:

Tal y como hemos expuesto anteriormente, necesitamos una tensión negativa para poder ajustar el desplazamiento de la tensión del DAC. El valor exacto de esta tensión no es muy importante y la corriente que necesitamos es del orden de microamperios. Por ello, hemos decidido generarla utilizando un oscilador, un restaurador [9] y un rectificador de media onda.

Para el oscilador hemos utilizado una salida PWM del propio microcontrolador, consiguiendo una tensión negativa de referencia de unos -2.3 V.

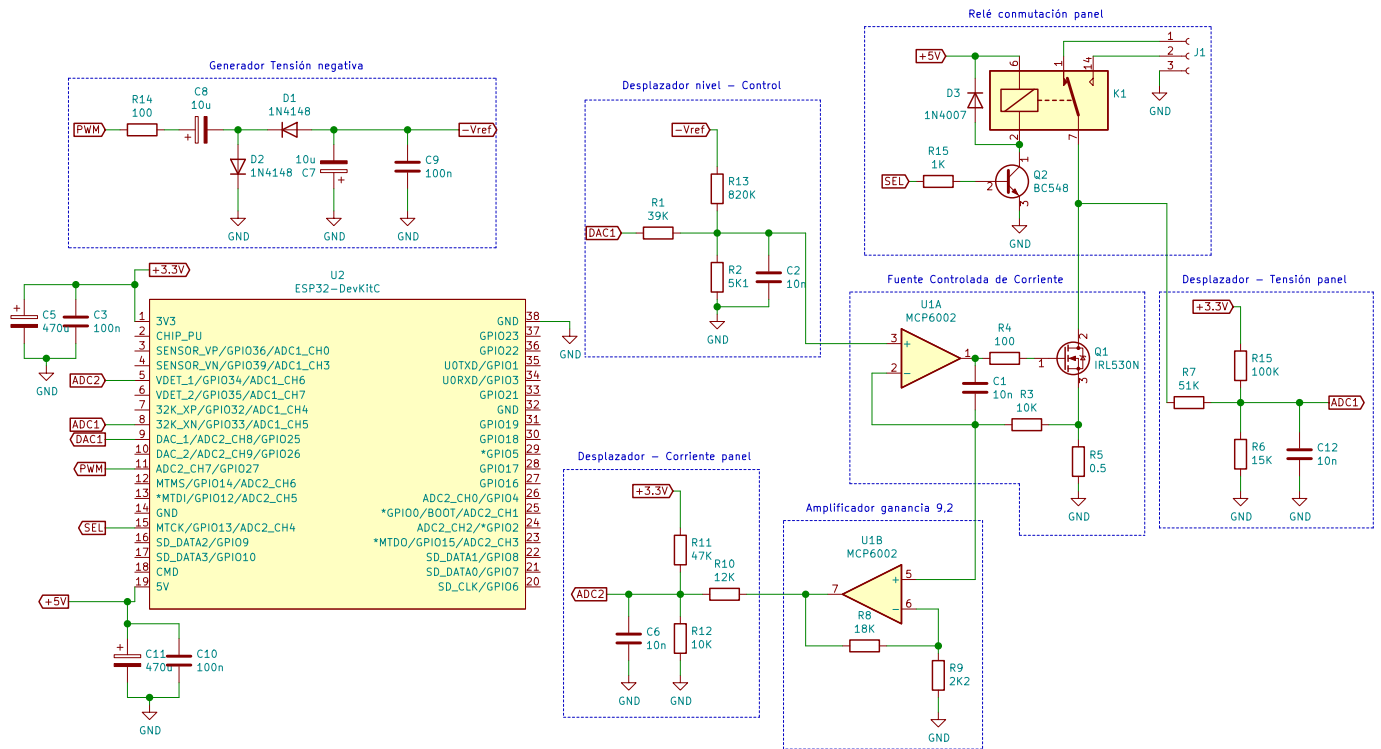


Fig. 1. Esquema global de la carga activa y su control.

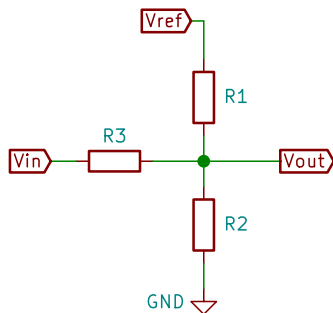


Fig. 2. Esquema correspondiente al circuito utilizado para desplazar y adaptar las señales.

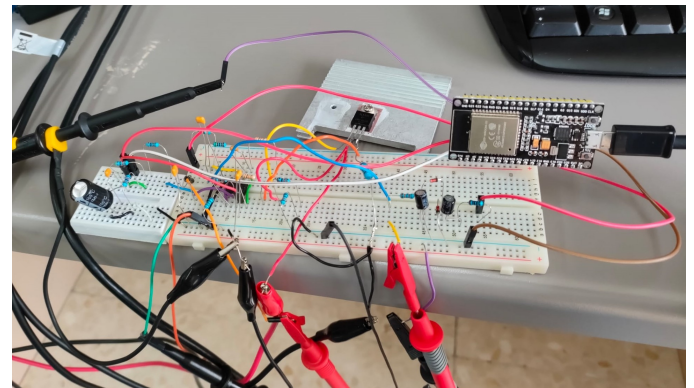


Fig. 3. Montaje de la carga activa en la protoboard.

Selector de placa solar:

Dado que queremos comparar las medidas de dos placas solares (fija y montada en el seguidor), debemos utilizar dos cargas activas, o bien, conmutar una carga activa entre los dos paneles. Hemos elegido esta segunda opción, ya que así limitamos los componentes utilizados y el tiempo necesario para la medida nos permite hacerlo sin problemas.

Para ello hemos utilizado un sencillo relé, activado mediante un transistor, tal y como podemos observar en la Fig. 1.

Software de control:

El software de control de la carga se encarga de regular la salida del DAC para mantener el *setpoint* seleccionado para la corriente. Dicho software incluye un lazo de control PI y un

filtro de mediana para las entradas del ADC, la actuación se realiza directamente sobre el DAC.

Para buscar el punto de máxima potencia el software de control hace un muestreo, por aproximaciones sucesivas, variando el *setpoint* de la corriente.

Una vez encontrado el punto máximo, se repite el proceso para el otro panel solar y los resultados se suben a la plataforma de IoT ThingSpeak [10], que es la que finalmente hemos elegido. La decisión de utilizar esta plataforma es por la sencillez con la que puede ser utilizada desde el entorno Arduino.

En la Fig. 3 podemos observar el montaje inicial en *proto-*

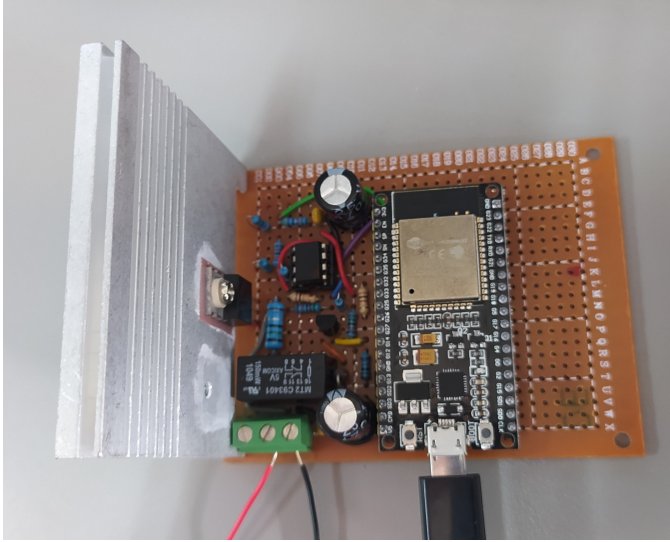


Fig. 4. Montaje de la carga activa en el PCB.

board para el test y ajuste de los componentes y en la Fig. 4 el montaje definitivo utilizando una PCB estándar de puntos.

D. Plataforma del seguidor y placa solares

El desarrollo actual del trabajo se centra ahora en el diseño de las piezas para montar el panel fijo con la inclinación adecuada y en el diseño del seguidor en sí mismo. Para el movimiento del seguidor utilizaremos servomotores de tipo bus, controlados desde el microcontrolador ESP32. En ambos casos

Una vez finalizado el diseño, fabricaremos las piezas diseñadas mediante impresión 3D. Con el fin de evaluar posibles diferencias de fabricación entre los dos paneles solares, realizaremos dos soportes fijos para comparar el rendimiento de las mismos.

III. RESULTADOS ACTUALES Y ESPERADOS

Respecto a los resultados, por un lado, hemos realizado la calibración de las dos entradas ADC del ESP32 respecto a la tensión y corriente en la carga activa. En ambos casos hemos realizado regresiones lineal y cuadráticas, obteniendo mejores resultados con las segundas. Podemos observar en Fig. 5 el ajuste para el caso de la corriente y en Fig. 6 para la tensión de entrada. En ambos casos el coeficiente de correlación es excelente y los datos muestran un error menor del 1% en prácticamente todo el rango, excepto en los extremos, sobre todo para corrientes muy bajas.

Por otro lado, hemos evaluado en laboratorio el funcionamiento de la carga activa variando por programa el *setpoint* de corriente demandada, utilizando una fuente de laboratorio en lugar del panel solar. Estos resultados iniciales son muy satisfactorios, obteniendo una respuesta coherente y rápida de la carga activa a los cambios del *setpoint* de la corriente.

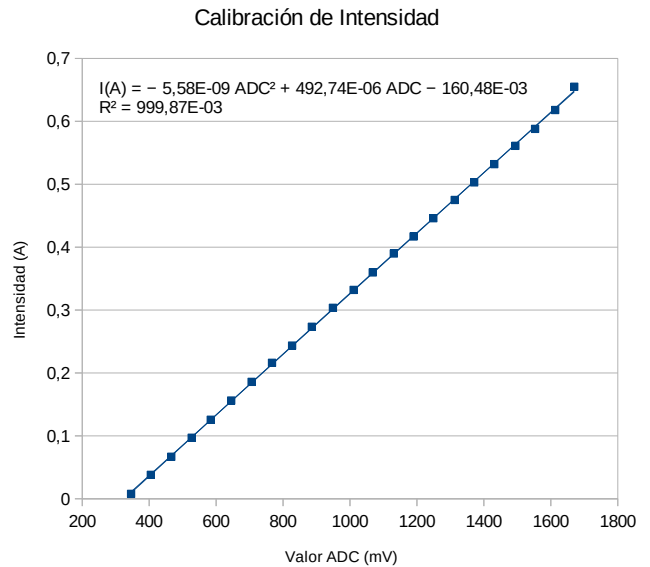


Fig. 5. Resultados de la calibración del ADC del ESP32 utilizado para medir la corriente que circula por la carga.

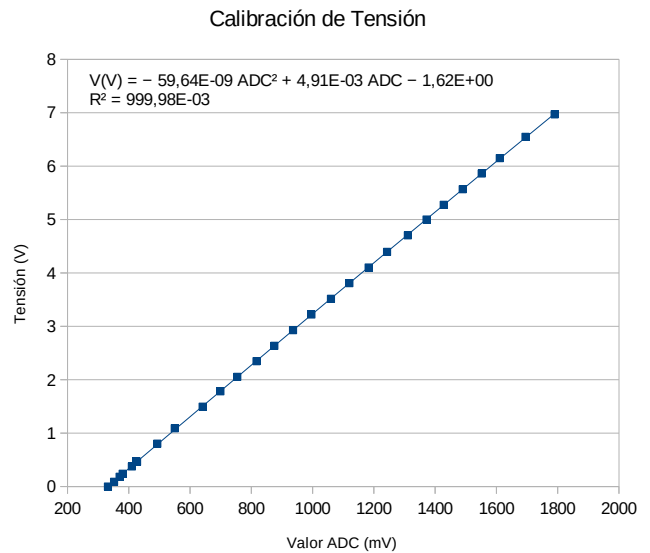


Fig. 6. Resultados de la calibración del ADC del ESP32 utilizado para medir la tensión de entrada a la carga.

En cuanto a los resultados globales del TFG, esperamos que el seguidor solar obtenga una mayor producción de energía que el panel fijo [11]. Aunque algunos autores obtienen resultados contrarios al considerar el consumo de los actuadores, sobre todo en zonas ecuatoriales [12]. De esta forma, podremos establecer el margen de energía disponible para alimentar a los actuadores y su electrónica de control.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido parcialmente financiado por la Junta de Extremadura y FEDER a través de la ayuda a Grupos

de Investigación GR21087.

REFERENCIAS

- [1] Memoria verificada del *Grado en Física*. <https://www.unex.es/organizacion/gobierno/vicerrectorados/vicecal/archivos/ficheros/informacion-titulos/ciencias/plan0140/memoriaplan.pdf>
- [2] Planes de estudio de la *Facultad de Ciencias (UEX)*. <https://www.unex.es/conoce-la-uex/centros/eii/informacion-academica/programas-asignaturas>.
- [3] Hessling, André. Active load with microcontroller - Part 1-6. Andrés Blog, 2016. <https://andrehehssling.de/2016/02/07/project-active-load-with-microcontroller-part-1-requirements/>
- [4] Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet, 2022. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [5] Espressif Systems. ESP32 Analog to Digital Converter. <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32/api-reference/peripherals/adac.html>
- [6] Página web del proyecto *Arduino*. <http://www.arduino.cc>.
- [7] Analog Devices. Simulador LTSpice. <https://www.analog.com/en/design-center/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>
- [8] Hambley, Allan. *Electrónica*, 2 Ed., Prentice-Hall, 2001.
- [9] Sedra, A.S., Smith, K. *Circuitos Microelectrónicos*, 5a Ed. McGraw-Hill, 2006.
- [10] Página web oficial de la plataforma IoT *ThingSpeak*. <http://www.thingspeak.com/>.
- [11] Eke, Rustu y Senturk, Ali. Performance Comparison of a Double-Axis Sun Tracking versus Fixed PV System. *Solar Energy* 86(9): 2665-272, 2012. doi:10.1016/j.solener.2012.06.006.
- [12] Arnold Edward, Tresna Dewi y Rusdianasari. The effectiveness of Solar Tracker Use on Solar Panels to The Output of The Generated Electricity Power, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 347, 2019. doi:10.1088/1755-1315/347/1/012130