

Universidad Tecnológica Nacional
Facultad Regional Villa María
Ingeniería Electrónica

Controlador de Carga Solar MPPT

Autor/es:

Guerini, Gonzalo Iván

Tutor: Ing. en Electrónica Fabián Marcelo Sensini

Director: Ing. en Electrónica José Luis Catalano

Co-Director: Esp. Ing. Electricista-Electrónico Héctor Diego Ferrari

Fecha de Defensa: 29/07/2022





Dedicatorias

A mi familia, que siempre me apoyaron y acompañaron durante estos años, a mis amigos y compañeros de curso que estuvieron presentes para disfrutar momentos de alegría y pasar los de mayor dificultad, a mis profesores que me han formado con compromiso y dedicación.

A todos los que me han ayudado directa o indirectamente y se alegran por haber llegado a esta instancia.



Agradecimientos

A todos los que brindaron su apoyo y conocimiento para llevar adelante la realización de este proyecto.



Resumen

En este trabajo se realiza un controlador de carga solar de baterías que busque situar el punto de máxima potencia (MPPT) de un panel solar. Para lograr esto, el sistema cuenta con un convertidor CC-CC del tipo reductor (buck converter), que es comandado por un microcontrolador ATmega.

El microcontrolador recibe información de tensión y corriente de: entrada (panel solar), carga de batería, y salida de carga conectada. Con ello decide si debe aumentar o reducir el ciclo PWM que controla al convertidor, como así también controlar la carga de batería y/o desconexión de la salida para protección.

La información obtenida por los sensores es enviada, a través de internet, a un servidor web, creado para tal fin, para realizar un seguimiento de la misma desde cualquier dispositivo (PC, Smartphone, Tablet, etc). La conexión hacia el servidor se realiza a través de la red Wi-Fi, presente hoy en día en la mayoría de domicilios.

Palabras Claves: *Cargador Solar, Punto de Máxima Potencia, Convertidor CC-CC reductor, Wi-Fi*

Abstract

In this work, a solar battery charge controller is made that seeks to locate the maximum power point (MPPT) of a solar panel. To achieve this, the system has a step-down type DC-DC converter, which is commanded by an ATmega microcontroller.

The microcontroller receives voltage and current information from: input (solar panel), battery charge, and connected load output. With this, it decides if it should increase or reduce the PWM cycle that controls the converter, as well as control the battery charge and/or disconnection of the output for protection.

The information obtained by the sensors is sent, through the internet, to a web server, created for this purpose, to track it from any device (PC, Smartphone, Tablet, etc). The connection to the server is made through the Wi-Fi network, present today in most homes.

Keywords: *Solar Charger, Maximum Power Point, Step-Down Converter, Wi-Fi*



ÍNDICE

Título	Página
Dedicatorias	3
Agradecimientos	4
Resumen.....	5
Abstract	5
Introducción	8
Análisis del problema	8
Análisis de sistemas existentes.....	8
Descripción de las actividades del proyecto.....	8
Objetivos	9
Objetivos generales	9
Objetivos particulares	9
Diseño del Proyecto	9
Revisión de requerimientos y parámetros de operación	9
Panel solar y punto de máxima potencia	9
Convertidor CC-CC reductor síncrono	11
Algoritmo MPPT.....	16
Ciclo de carga de batería	19
Control de salida	21
Control y periféricos.....	21
Selección de componentes y dispositivos.....	22
Microcontrolador.....	22
Selección de mosfets	22
Controlador de mosfets	23
Fabricación del inductor	24
Control del sistema.....	26
Comunicación inalámbrica Wi-Fi.....	27
Reloj de tiempo real (RTC)	29
Display LCD y Encoder	29
Alimentación	30
Diagrama en bloques del dispositivo.....	30
Diagrama de flujo	31
Evaluación Final del Sistema	34
Primeras pruebas.....	34
Preparación del prototipo con materiales finales.....	35



Montaje y ensayo real del prototipo	38
Análisis del sistema en campo	46
Conclusiones	49
Anexo I	50
Bibliografía	54



Introducción

Análisis del problema

Hace pocos años que las energías renovables están empezando a tener mayor relevancia. La energía solar es una de las que mayor protagonismo está tomando, la cual se debe aprovechar de la mejor manera posible. Una de las formas de aprovechar la energía solar es a través de la conversión fotovoltaica de la radiación solar a energía eléctrica a través de celdas fotovoltaicas.

El funcionamiento de las celdas fotovoltaicas depende de las condiciones presentes del ambiente, principalmente de la temperatura y la radiación solar que absorbe.

Se pretende aprovechar al máximo la transformación de la energía solar en energía eléctrica, por lo que se implementa una técnica que lo permita. El comportamiento de un panel solar no es lineal, por tal motivo se realiza lo que se conoce como seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT, Maximum Power Point Tracking).

El comportamiento no lineal provoca que, para situarse en el punto de máxima potencia, los valores de tensión y corriente no se mantengan constantes, a menos que los factores externos, como la radiación solar, se mantengan siempre bajo la misma condición. Si quisiéramos cargar una batería debemos colocar una etapa de conversión que permita mantener una tensión de salida constante para la carga de la batería y, a su vez, el punto de máxima potencia.

Análisis de sistemas existentes

En la actualidad existen controladores de carga solar MPPT, pero raramente se puede encontrar en el mercado alguno que presente conexión a internet mediante Wi-Fi. Esto permitiría analizar todos los parámetros y proceso de carga/descarga de la batería.

Descripción de las actividades del proyecto

Este proyecto consiste en el diseño e implementación de un sistema inteligente para la gestión y carga de baterías a través de un panel solar.

Monitoreando los valores de tensión y corriente es posible gestionar la carga de la batería de la forma más eficiente posible. Además de gestionar una carga correcta de la batería, cuenta con protecciones de seguridad tales como evitar sobrecarga o una descarga excesiva de la batería, aumentando así su vida útil. Todos los parámetros para la carga y protecciones pueden ser configurados por el usuario.

El sistema cuenta con un registro de datos de todos los parámetros requeridos para analizar tanto el estado de la batería como de consumos. Estos datos son enviados a un servidor web a través de internet mediante conexión inalámbrica Wi-Fi, los cuales luego son accesibles a través de una página web creada específicamente para esta aplicación.



Objetivos

Objetivos generales

Diseñar e implementar un sistema inteligente para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT) del panel solar y regulación de carga de la batería, con la posibilidad de acceder a datos históricos para ver su comportamiento.

Objetivos particulares

Para cumplir con los objetivos generales, se plantean los siguientes objetivos particulares:

- Investigar sobre el comportamiento de los paneles solares;
- Calcular y diseñar un convertidor CC-CC tipo reductor (buck converter) con su controlador;
- Diseñar sistemas de control para habilitar conexiones de potencia;
- Diseñar circuito impreso integrando módulos necesarios para la comunicación y medición de tensión y corriente;
- Realizar el código que contenga la lógica de: “*Perturb and Observe*” para el seguimiento de punto de máxima potencia, controles de seguridad tanto para la carga como la descarga de la batería, ajustes de parámetros y comunicación wifi.

Diseño del Proyecto

Revisión de requerimientos y parámetros de operación

Inicialmente se plantea el comportamiento de los paneles solares en cuanto a su radiación y conexión, para luego determinar el dimensionamiento del convertidor CC-CC reductor a diseñar.

Seguidamente se investiga sobre la curva de carga de una batería y, finalmente, se determinan los controles y periféricos requeridos.

Panel solar y punto de máxima potencia

Las celdas fotovoltaicas tienen curvas características V-I que definen el comportamiento de las mismas ante diferentes condiciones de operación. La potencia de una celda solar está dada por el producto de la corriente y el voltaje de la misma. El punto de máxima potencia (MPP, Maximum Power Point) es el producto del voltaje en el punto máximo (V_{MPP}) y corriente en el punto máximo (I_{MPP}) para los cuales la potencia extraída del arreglo fotovoltaico es máxima (P_{MPP}). El punto de máxima potencia varía continuamente, ya que depende de factores como la temperatura de la celda solar y de las condiciones de irradiancia.

La Figura 1 muestra las curvas características de una celda fotovoltaica. En la curva de potencia (Figura 1.b), se observa, la existencia de un máximo denominado máximo punto de potencia (MPP) al cual le corresponden valores de corriente en el punto de máxima potencia I_{MPP} y de voltaje en el punto de máxima potencia V_{MPP} , dicho punto es único para cada celda solar y varía conforme cambia la irradiancia solar como se muestra en la Figura 2. Esta variación plantea la necesidad de realizar un

algoritmo capaz de modificar el voltaje del panel solar de manera tal que la energía aprovechada sea la máxima.

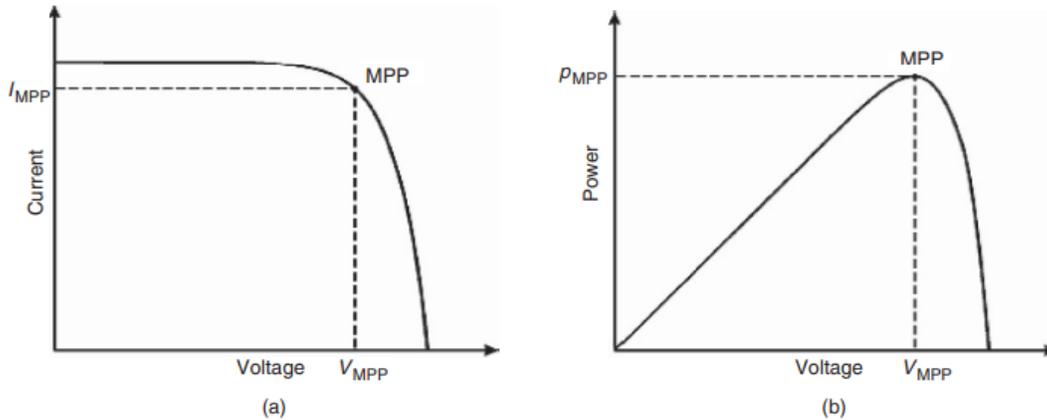


Figura 1 - (a) Curva I-V de un panel solar; (b) Curva P-V de un panel solar. [1]

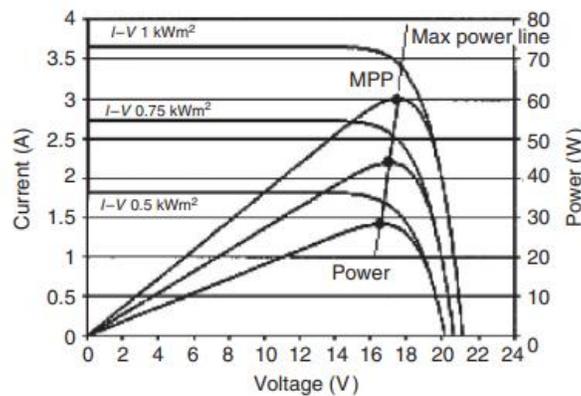


Figura 2 – Variación de la curva de un panel solar por irradiancia. [1]

La curva característica del panel solar se puede encontrar en su hoja de especificaciones, la cual además brinda otros parámetros importantes como:

- Corriente de cortocircuito (I_{SC}), es aquella que se produce a tensión cero.
- Tensión de circuito abierto (V_{OC}), es aquella que se mide cuando no hay carga conectada y es la máxima tensión que puede dar el panel.
- Potencia pico (P_p), es la potencia eléctrica máxima que puede suministrar un panel y es determinado por el punto de la curva I-V.

Se sabe que la potencia es $P = V * I$. Suponiendo un panel solar de 12V, el punto de máxima potencia se encuentra en algún lugar entre 12V y 21V, dependiendo de qué carga esté conectada y qué tan brillante sea la luz del sol.

Ahora, dado el caso de que la carga conectada al panel fuera de forma directa una batería, ésta será la que marcará la tensión a la que trabajará el panel. El punto de trabajo del panel, en la curva característica, donde coincide la tensión de la batería raramente corresponde a un MPP, por lo tanto, no estamos aprovechando al máximo la capacidad del panel.



Para optimizar la transferencia entre el panel y la batería se debe introducir una etapa de adaptación, que para este caso será un convertidor CC-CC reductor.

Convertidor CC-CC reductor síncrono

Los convertidores CC-CC tiene como principal objetivo transformar una tensión de entrada continua, generalmente no regulada, en una tensión de salida también de corriente continua, con un valor distinto y regulado.

Estos convertidores son dispositivos electrónicos formado por uno o más conmutadores (transistores y diodos) y elementos almacenadores de energía (capacitores y bobinas).

La regulación de este nivel de voltaje se logra forzando a que se almacene la suficiente energía en la bobina o capacitor y después, a otro tiempo, se haga descargar esa misma energía acumulada en la salida. Esto se hace una y otra vez.

Según la aplicación, los convertidores CC-CC pueden ser reductores, elevadores o elevadores/reductores. A continuación, se analizará el convertidor reductor que es el que se utiliza en el proyecto.

Se denominan reductores a aquellos convertidores CC-CC cuya tensión de salida es siempre inferior a la de entrada.

En la Figura 3 se muestra la versión más simple del convertidor reductor. Los elementos básicos son un transistor, una bobina, un diodo y un capacitor. Para comprender el funcionamiento se supone al transistor como un interruptor ideal S_1 , un voltaje de entrada V_s y una carga resistiva pura R . Además:

- El circuito opera en régimen permanente.
- La corriente de la bobina es permanente (siempre positiva).
- El valor del capacitor es muy grande y la tensión de salida se mantiene constante.
- El periodo de conmutación es T ; el interruptor estará cerrado un tiempo DT y estará abierto el resto del tiempo, $(1 - D)T$.

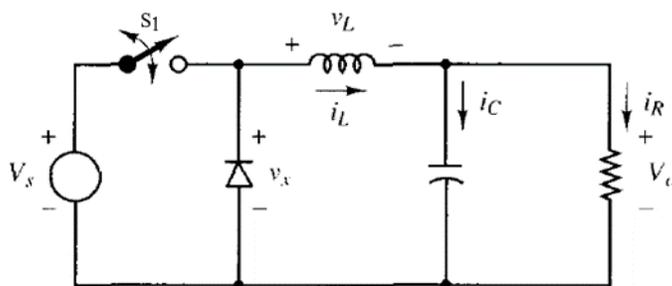


Figura 3 - Convertidor CC-CC reductor. [2]

El convertidor consta de dos estados que se alternarán sucesivamente.

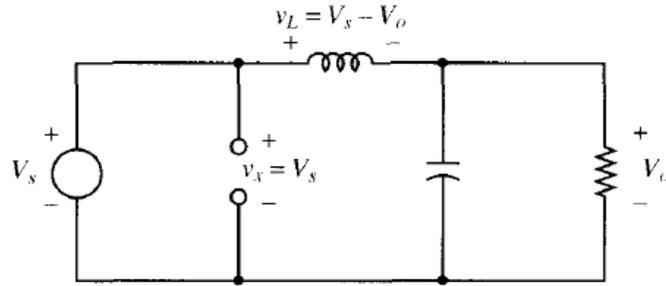


Figura 4 - Circuito equivalente cuando el interruptor está cerrado. [2]

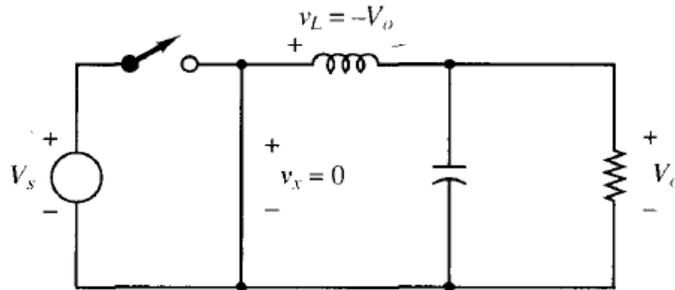


Figura 5 - Circuito equivalente cuando el interruptor está abierto. [2]

Cuando S_1 se encuentra conduciendo (“estado ON”) por un tiempo $t_{on} = DT$, Figura 4, el diodo se encuentra en polarización inversa y la corriente va desde la fuente de entrada hasta el capacitor, cargando a su paso la bobina. Esto resulta en un voltaje positivo a través del inductor y causa un aumento lineal en la corriente del inductor i_L (Figura 6.b).

$$v_L = V_s - V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{Ec. 1})$$

La variación de la corriente se calcula como:

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{DT} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (\text{Ec. 2})$$

$$(\Delta i_L)_{on} = \left(\frac{V_s - V_o}{L} \right) DT \quad (\text{Ec. 3})$$

Luego, cuando el interruptor S_1 se abre (Figura 5) un tiempo $t_{off} = (1 - D)T$, la corriente i_L continúa fluyendo debido al almacenamiento de energía inductiva. Esta corriente ahora fluye a través del diodo y la tensión en la bobina es:

$$v_L = -V_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{Ec. 4})$$

La corriente de la bobina disminuye linealmente, como se muestra en la Figura 6.b, cuando el

interruptor está abierto.

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = -\frac{V_o}{L} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$(\Delta i_L)_{off} = -\left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T \quad (\text{Ec. 6})$$

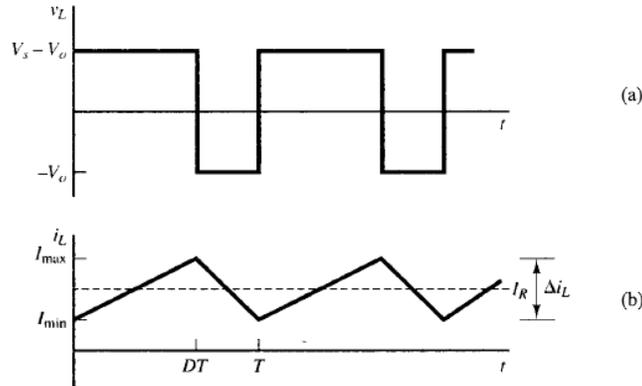


Figura 6 - Formas de onda del convertidor reductor. (a) Tensión en la bobina; (b) Corriente de la bobina. [2]

En la operación de estado permanente la variación neta de la corriente de la bobina en un periodo será cero. Para ello se debe cumplir:

$$(\Delta i_L)_{on} + (\Delta i_L)_{off} = 0 \quad (\text{Ec. 7})$$

Reemplazando con las ecuaciones Ec. 3 y Ec. 6:

$$\left(\frac{V_s - V_o}{L}\right)DT - \left(\frac{V_o}{L}\right)(1-D)T = 0 \quad (\text{Ec. 8})$$

Despejando V_o :

$$V_o = V_s D \quad (\text{Ec. 9})$$

donde D es la relación de trabajo.

Por esta razón, se puede decir que la salida de voltaje varía en forma lineal con la relación de trabajo del interruptor para un voltaje de entrada dado (Ec. 9). No depende de ningún otro parámetro del circuito.

De la ecuación Ec. 5, estableciendo un valor de ripple de corriente Δi_L , se puede obtener el valor de la inductancia L :

$$L = (V_s - V_o) \frac{DT}{\Delta i_L} = \frac{V_o (V_s - V_o)}{V_{in} \Delta i_L f_s} \quad (\text{Ec. 10})$$

Si V_s variase entre un valor mínimo $V_{s(\min)}$ y otro máximo $V_{s(\max)}$, se tomará el $V_{s(\max)}$.

Una vez que la energía del inductor ha caído por debajo de un cierto umbral, el capacitor se convierte en la principal fuente de corriente, asegurando que en la carga aún se suministre corriente hasta que comience el siguiente ciclo de conmutación.

Anteriormente se ha supuesto que el capacitor era muy grande para que la tensión de salida fuese constante. En la práctica esto no será posible.

El capacitor se cargará mientras la corriente en el mismo sea positiva. Aplicando la definición de capacidad:

$$Q = C V_o \quad (\text{Ec. 11})$$

$$\Delta Q = C \Delta V_o \quad (\text{Ec. 12})$$

La variación de carga ΔQ es el área mostrada en la Figura 7.

$$\Delta Q = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{2} \right) \left(\frac{\Delta i_L}{2} \right) = \frac{T \Delta i_L}{8} \quad (\text{Ec. 13})$$

A partir de la Ec. 12 y Ec. 13, se puede calcular el valor de capacidad del capacitor:

$$C = \frac{T \Delta i_L}{8 \Delta V_o} = \frac{\Delta i_L}{8 \Delta V_o f_s} \quad (\text{Ec. 14})$$

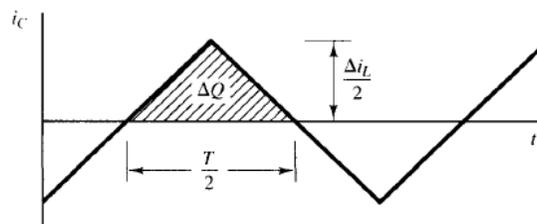


Figura 7 - Corriente en el capacitor. [2]

Ahora que se ha explicado el concepto básico de un convertidor reductor, se puede cubrir el diseño síncrono. El diseño síncrono (Figura 8) simplemente reemplaza el diodo con un segundo transistor para eliminar las pérdidas incurridas por la caída de voltaje directo a través del diodo, lo que hace que el circuito sea más eficiente. Esto es un poco más complejo de implementar, ya que el segundo transistor debe sincronizarse cuidadosamente con el primero. Es esencial asegurarse de que ambos nunca estén encendidos al mismo tiempo, o la corriente tendrá una ruta directa a tierra, causando efectivamente un cortocircuito. La conmutación debe estar efectivamente desfasada 180 grados, con un período de retardo corto entre cada transición que se denomina tiempo muerto.

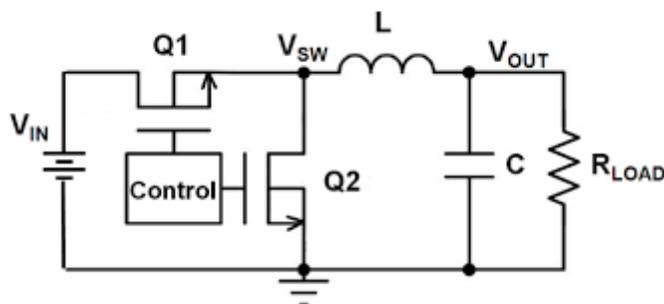


Figura 8 - Convertidor reductor síncrono

Con lo visto anteriormente es posible calcular el convertidor reductor CC-CC necesario para el proyecto.

Se estableció que el dispositivo debe soportar un panel solar de 12V de hasta 50W. Teniendo en cuenta esto, el convertidor deberá cumplir las siguientes especificaciones:

- Voltaje de entrada máximo: $V_{IN(max)} = 24V$
- Voltaje nominal de salida: $V_{OUT} = 12V$
- Corriente máxima de salida: $I_{OUT(max)} = 5A$
- Se asume el funcionamiento en modo continuo (CCM)

La frecuencia de conmutación, para el control de los interruptores, es inversamente proporcional al tamaño del inductor y el capacitor, y directamente proporcional a las pérdidas de conmutación en los transistores mosfet a utilizar. Por lo tanto, a mayor frecuencia, menor tamaño del inductor y condensador, pero mayores pérdidas de conmutación. Por lo tanto, se necesita un compromiso mutuo entre el costo de los componentes y la eficiencia para seleccionar la frecuencia de conmutación adecuada.

Con estas consideraciones, se escoge una frecuencia de 50kHz.

Se determina el ciclo de trabajo (D) de acuerdo a las especificaciones. El voltaje de entrada máximo conduce a la corriente máxima de conmutación.

$$D = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{12}{24} = 0.5 \quad (\text{Ec. 15})$$

El valor del inductor se determina a partir de la Ec. 10, donde una buena estimación para el ripple de corriente ΔI_L es del 20% de la corriente a manejar.

$$\Delta I_L = 0.2 I_{OUT(max)} \quad (\text{Ec. 16})$$

$$L_{MIN} = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} * \frac{(V_{IN} - V_{OUT})}{0.2 * I_{OUT(max)} * f_s} \quad (\text{Ec. 17})$$



$$L_{MIN} = \frac{12 [V]}{24 [V]} * \frac{(24 [V] - 12 [V])}{0.2 * 5 [A] * 50.10^3 [Hz]} = 120 \mu H \quad (\text{Ec. 18})$$

El valor del inductor debe ser $L \geq 120 \mu H$.

La corriente máxima a través del inductor determina la clasificación de corriente de saturación requerida del inductor:

$$I_{PEAK} = I_{OUT(max)} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (\text{Ec. 19})$$

$$I_{PEAK} = 5 [A] + \frac{0.2 * 5 [A]}{2} = 5.5 [A] \quad (\text{Ec. 20})$$

Para el cálculo del capacitor se establece un ripple de tensión de 30 [mV] y se calcula su valor a partir de la Ec. 14.

$$\Delta V_{OUT} = 30.10^{-3} [V] \quad (\text{Ec. 21})$$

$$C = \frac{T \Delta I_L}{8 \Delta V_o} = \frac{\Delta I_L}{8 \Delta V_o f_s} \quad (\text{Ec. 22})$$

$$C = \frac{0.2 * 5 [A]}{8 * 30.10^{-3} [V] * 50.10^3 [Hz]} = 83.33 \mu F \quad (\text{Ec. 23})$$

El capacitor elegido deberá ser de una capacidad $C \geq 83.33 \mu F$ y en lo posible con baja ESR (resistencia serie equivalente).

En el caso de los mosfets, tienen que parecerse a un conmutador ideal, es decir, tener una conmutación rápida y de baja resistencia.

El panel solar suele tener una tensión en circuito abierto (V_{OC}) entre 21V y 24V. La corriente a manejar será de máximo 5A.

El transistor de control (lado alto, $Q1$ en Figura 8) debe presentar una tensión $V_{DSS} > V_{OC}$ y una corriente $I_{D(max)} > I_{PEAK}$.

El transistor “rectificador” (que está en lugar del diodo en el convertidor síncrono, $Q2$ en Figura 8), debe cumplir con $V_{DSS} > V_{OC}$ y $I_{D(max)} > I_{OUT} (1 - D)$.

Algoritmo MPPT

Existen diversos métodos para llevar a cabo el seguimiento del punto de máxima potencia de un panel solar. El método utilizado en este controlador, dado a su sencillez y fácil aplicación, es el Perturb & Observe (perturbar y observar).

Este método se basa en el cálculo de la potencia de salida fotovoltaica y el cambio de potencia $P(k)$ mediante el muestreo de la corriente $I(k)$ y el voltaje $V(k)$ del panel fotovoltaico. El controlador opera incrementando o disminuyendo periódicamente el voltaje del panel solar. Si una perturbación dada conduce a un aumento en la potencia de salida del PV, entonces la perturbación subsiguiente se genera en la misma dirección. Por el contrario, si una perturbación dada conduce a una disminución en la potencia de salida del PV, entonces la perturbación subsiguiente se genera en dirección opuesta.

Estas perturbaciones se logran variando el ciclo de trabajo del convertidor CC-CC, repitiendo el proceso hasta alcanzar el punto de máxima potencia.

A continuación, se describen los cuatro casos posibles que pueden encontrarse, donde ΔP y ΔV representan las variaciones, en el tiempo, de potencia y tensión respectivamente, entre una muestra actual y una anterior.

- $\Delta P > 0$ y $\Delta V > 0$: En este caso el sistema de control disminuye el ciclo de trabajo con el fin de continuar aumentando la tensión de salida del panel hasta alcanzar el punto MPP.

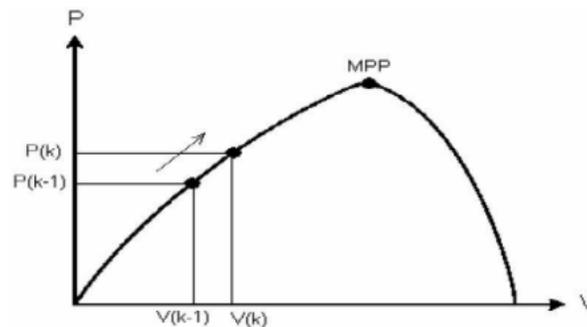


Figura 9 – Representación gráfica del caso $\Delta P > 0$ y $\Delta V > 0$

- $\Delta P > 0$ y $\Delta V < 0$: En este caso el sistema de control aumenta el ciclo de trabajo con el fin de continuar disminuyendo la tensión de salida del panel hasta alcanzar el punto MPP.

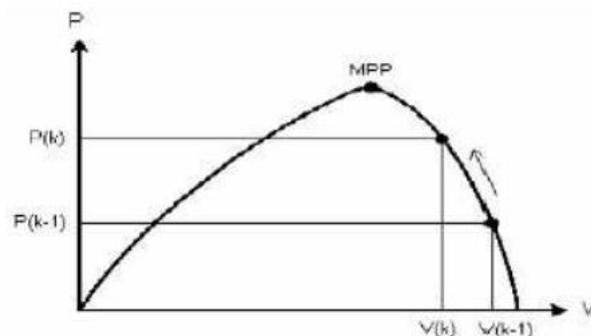


Figura 10 - Representación gráfica del caso $\Delta P > 0$ y $\Delta V < 0$

- $\Delta P < 0$ y $\Delta V < 0$: En este caso el sistema de control disminuye el ciclo de trabajo con el fin de aumentar la tensión de salida del panel hasta alcanzar el punto MPP.

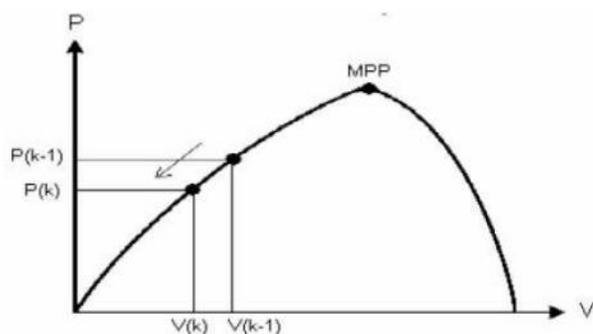


Figura 11 - Representación gráfica del caso $\Delta P < 0$ y $\Delta V < 0$

- $\Delta P < 0$ y $\Delta V > 0$: En este caso el sistema de control aumenta el ciclo de trabajo con el fin de disminuir la tensión de salida del panel hasta alcanzar el punto MPP.

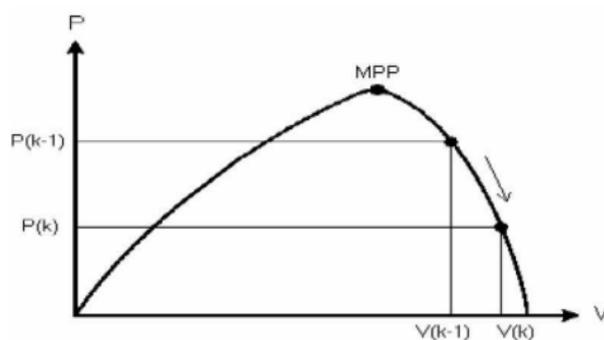


Figura 12 - Representación gráfica del caso $\Delta P < 0$ y $\Delta V > 0$

Teniendo en cuenta las situaciones planteadas anteriormente se realiza el algoritmo que tiene como fin aumentar o disminuir el valor del ciclo de trabajo del convertor, de acuerdo a las muestras de tensión y corriente realizadas. En la Figura 13 se puede ver el diagrama de flujo de este algoritmo.

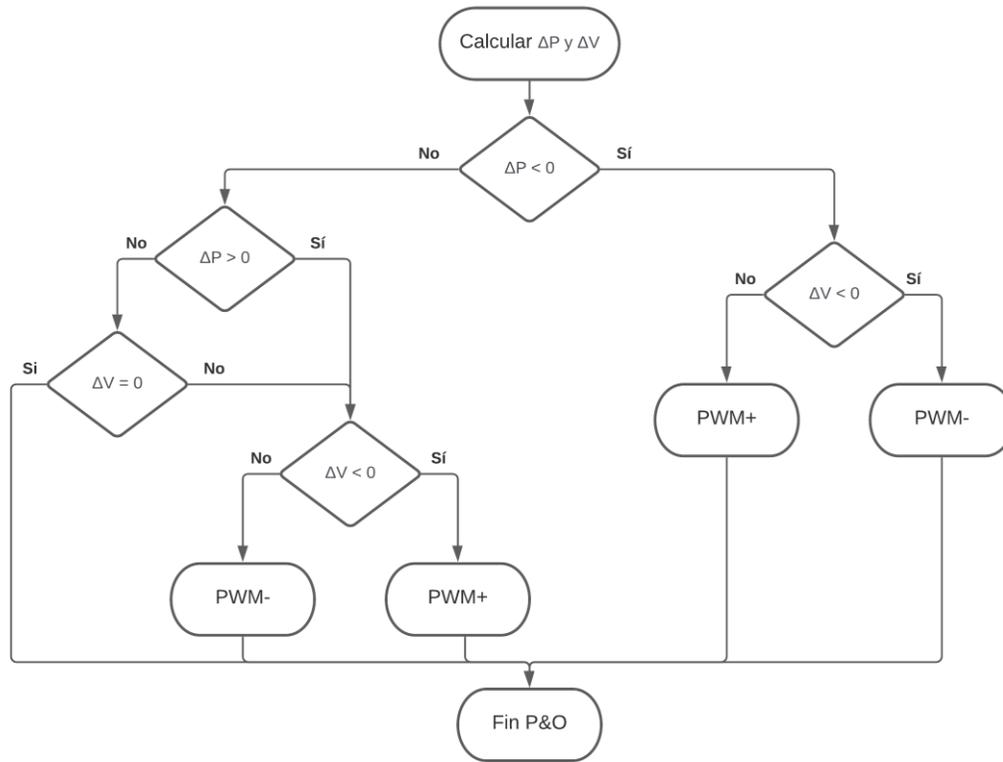


Figura 13 - Diagrama de flujo del algoritmo MPPT "Perturb & Observe"

Ciclo de carga de batería

En las baterías existe un método, o varios similares, con el que se restituye la carga de forma segura y correcta. Para ello, se controla el voltaje que se aplica a la batería y la corriente que se suministra.

Se presentan varios modos de carga o etapas en un ciclo de carga de una batería, lo cual ayuda a que la batería tenga una vida útil mayor. En general, se utiliza el ciclo de carga de tres etapas y es el que se presenta a continuación.

En la Figura 14 se observan las tres etapas del ciclo de carga, donde en cada una se presentan tensiones y corrientes distintas.

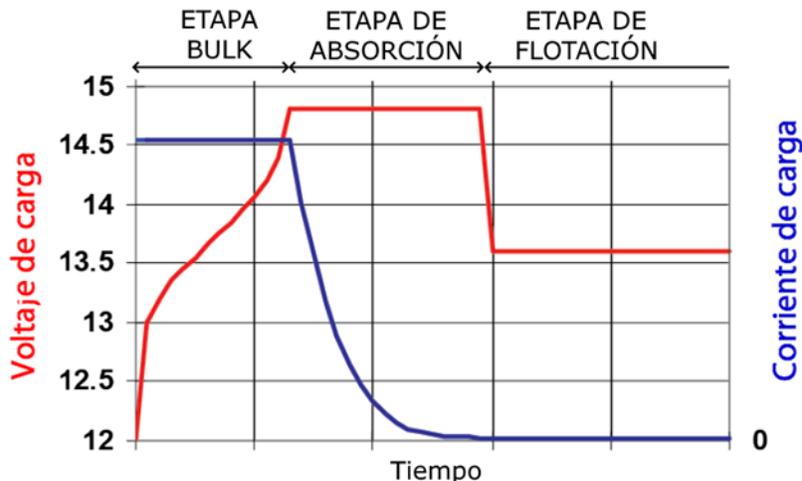


Figura 14 - Curva de carga de batería en 3 etapas

La primera etapa es llamada fase “bulk”, donde el voltaje de la batería comienza a incrementarse y se carga a una corriente constante tan alta como recomiende el fabricante de la batería. Este límite de corriente es conveniente que se mantenga siempre por debajo del 20% de la capacidad nominal de la batería. Por ejemplo, para una batería de 10 [A/h] el límite de corriente máximo sería de 2 [A].

La primera fase de carga finaliza cuando el voltaje de la batería llega al “Voltaje de Absorción” (valor típico entre 14.2 [V] y 15 [V]).

La segunda etapa es la fase de “absorción”. En este momento la batería se encuentra en un 80% de carga. El cargador debe mantener el voltaje constante mientras la batería sigue “absorbiendo” carga y la corriente irá disminuyendo lentamente.

La transición entre la etapa de “absorción” y la siguiente (fase de “flotación”) se determina por tiempo o hasta que la corriente disminuya de cierto valor (entre 1% y 5% del valor de capacidad de la batería).

La tercera etapa es la fase de “flotación”, donde la batería ya se encuentra al 100% de su capacidad y se utiliza para mantener la batería cargada. Esto se hace con un voltaje constante menor al “Voltaje de Absorción” (entre 12.9 [V] y 14 [V]).

Una consideración importante, aunque no imprescindible, es compensar la carga de la batería por temperatura. Esto ayuda a garantizar que la batería no se sobrecargue ni se descargue. Todas las reacciones químicas se ven afectadas por la temperatura. La carga de la batería es una reacción electroquímica, por lo que también se ve afectada por la temperatura. Específicamente, las baterías frías requieren un voltaje de carga más alto para empujar la corriente hacia las placas de la batería y el electrolito, y las baterías más calientes requieren un voltaje de carga más bajo para eliminar el daño potencial a las celdas.

La fórmula de compensación de temperatura más utilizada es: $-0,005 [V]$ por grado centígrado ($^{\circ}C$) por celda de 2 [V]. La temperatura de referencia típica para la mayoría de los cargadores es de $25^{\circ}C$ dado que generalmente las baterías exhiben su combinación óptima de almacenamiento de



energía a esta temperatura.

Por lo tanto, para una batería de 12 [V] (6 celdas de 2 [V]) la ecuación de corrección es:

$$-0.005 [V] * 6 * (T_{bateria} [^{\circ}C] - 25 [^{\circ}C]) \quad (\text{Ec. 24})$$

Control de salida

La salida del controlador de carga está protegida ante sobrecorriente, la cual es configurable desde el display LCD. También, es desconectada por tensión baja de batería, para evitar que esta última se descargue de forma profunda. La descarga profunda podría dañar la batería.

Además de poder encender y apagar de forma manual, la salida posee control automático por horario (configurable) y por anochecer (detectable por tensión del panel solar).

Control y periféricos

El encargado de controlar el convertidor reductor CC-CC es un microcontrolador. El microcontrolador debe enviar la señal de control PWM encargada de encender y apagar los mosfet del convertidor. Para poder determinar el ancho de pulso de la señal PWM se requieren parámetros de tensión y corriente, tanto del panel solar como de la batería.

El sistema también permite la interconexión entre el panel solar, batería y salida, de tal manera de poder interrumpir o permitir el flujo de corriente entre ellos. Además, cuenta con un sensor de temperatura para la batería con la finalidad de controlar su carga.

Finalmente, se complementa todo con un display LCD, para visualizar los datos, y una conexión WiFi para registrar datos hacia un servidor. Los datos enviados al servidor pueden ser vistos en tiempo real y, además, utilizarse para realizar un análisis posterior.



Selección de componentes y dispositivos

Microcontrolador

El microcontrolador utilizado es un ATmega 328P de la familia de Microchip, Figura 14. Este nos ofrece hasta 5 entradas analógicas, salidas/entradas digitales, comunicación I2C y serial.

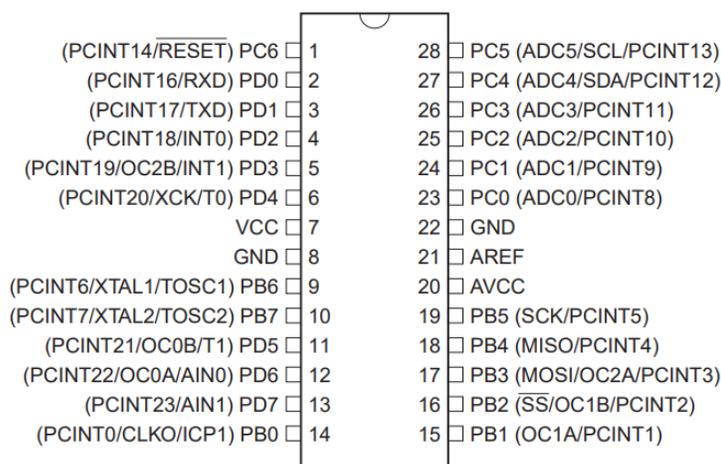


Figura 15 - Microcontrolador ATmega328P

Selección de mosfets

Anteriormente se determinaron los valores de inductor y capacitor requeridos en el convertidor reductor. Falta definir el modelo de mosfets que cumpla con los requisitos, de los cuales algunos ya fueron mencionados. Algunos parámetros básicos para seleccionar el mosfet correcto son:

- Voltaje V_{DS} : debe ser superior al 20% o más que el voltaje nominal, en este caso $V_{DSS} > V_{OC}$.
- Corriente I_D : debe ser superior al 20% o más que la corriente nominal, en este caso $I_{D(max)} > I_{PEAK}$, para el mosfet superior, e $I_{D(max)} > I_{OUT} (1 - D)$, para el mosfet inferior.
- Resistencia de encendido ($R_{DS(on)}$): menor valor posible.
- Pérdida de conducción: depende de $R_{DS(on)}$ y del ciclo de trabajo.
- Pérdida de conmutación: ocurre durante la fase de transición. Depende principalmente de la frecuencia de conmutación, el voltaje y la corriente.

En ambos casos, por costo y disponibilidad, se definió utilizar el mosfet IRFZ46N, que es capaz de manejar una tensión de hasta 55[V] y una corriente de 53 [A]. Además, presenta una $R_{DS(on)} = 16.5 m\Omega$.

Las pérdidas de potencia de los MOSFET del lado alto (Q1) y del lado bajo (Q2) son una combinación de pérdidas de conducción y de conmutación. Las pérdidas de conducción son el resultado de las pérdidas I^2R dentro del MOSFET cuando está completamente encendido, y las pérdidas de conmutación son el resultado de las transiciones del MOSFET desde sus estados de encendido y apagado.

Perdida de conducción:

$$P_{ON} = I_{ON}^2 * R_{DS(on)} * D \quad (\text{Ec. 25})$$

$$P_{ON} = (5 [A])^2 * 16,5 \cdot 10^{-3} [\Omega] * 0,9 = 0.37 [W] \quad (\text{Ec. 26})$$

Perdidas de conmutación:

$$P_{SW} = 0.5 * V_{MAX} * I_{MAX} * (t_r - t_f) * f_s \quad (\text{Ec. 27})$$

$$P_{SW} = 0.5 * 24 [V] * 5 [A] * (76 \cdot 10^{-9} [s] - 57 \cdot 10^{-9} [s]) * 50 \cdot 10^3 [Hz] = 0.057 [W] \quad (\text{Ec. 28})$$

Sumando las pérdidas de conducción y conmutación se puede determinar si nos encontramos dentro de los márgenes permitidos de la temperatura de operación de la juntura.

$$P_{tot} = P_{ON} + P_{SW} = 0.427 [W] \quad (\text{Ec. 29})$$

$$R_{\theta JA} = 62 \text{ } ^\circ\text{C/W} \quad (\text{Ec. 30})$$

$$T_{jmax} = P_{tot} * R_{\theta JA} + T_{ambiente} \quad (\text{Ec. 31})$$

$$T_{jmax} = 0.427 [W] * 62 [^\circ\text{C/W}] + 25^\circ\text{C} = 51.5 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (\text{Ec. 32})$$

Controlador de mosfets

El control de encendido de los mosfets del convertidor se realiza con el integrado IR2104. Este acepta una entrada de control PWM del microcontrolador y produce una salida adecuada para las puertas de los transistores de alta potencia. En la Figura 16 se muestra el circuito implementado con este IC y el convertidor reductor.

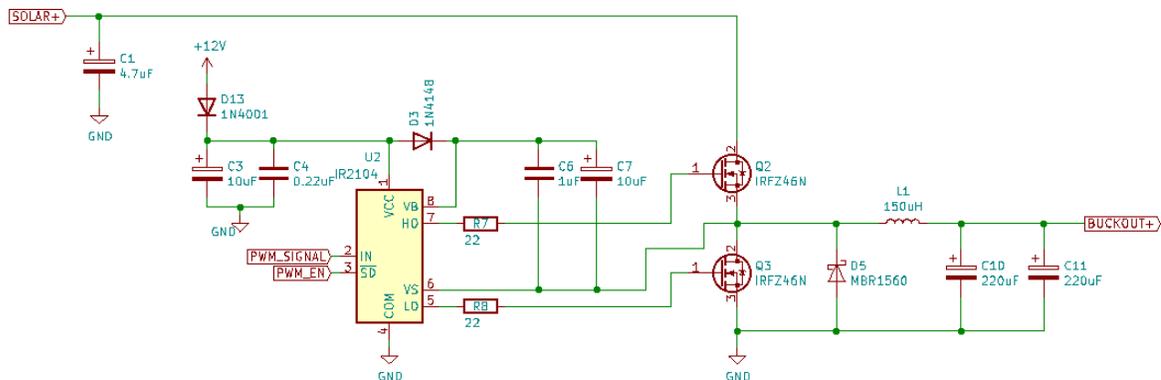


Figura 16 - Convertidor reductor CC-CC con controlador IR2104

Fabricación del inductor

El inductor se realizó a partir de un núcleo toroidal obtenido de una fuente de alimentación de PC que no se encontraba en funcionamiento. El primer paso para llegar al valor deseado fue determinar los parámetros del inductor, para esto se obtuvieron las medidas de este y, con ayuda de un catálogo (ver Anexo I), se determinó que el factor de inductancia es $A_L = 7200 [nH/N^2] \pm 25\%$.

Conocido el factor de inductancia es posible determinar la cantidad de vueltas para obtener el valor de inductancia requerido siguiendo la ecuación Ec. 33.

$$A_L = \frac{L [nH]}{N^2} \quad (\text{Ec. 33})$$

El valor de inductancia mínimo requerido (obtenido anteriormente) es de $120 \mu H = 120000 nH$, por lo tanto, despejando la cantidad de vueltas N requerida.

$$N = \sqrt{\frac{L [nH]}{A_L}} = \sqrt{\frac{120000}{7200}} = 4.08 \quad (\text{Ec. 34})$$

Para tener un mayor margen con respecto a la inductancia mínima requerida, se realizaron siete (7) vueltas de un alambre de cobre de 18 AWG (1,024 mm de diámetro), lo cual nos da una inductancia aproximada de $352.8 [\mu H]$ (Ec. 35).

$$L [nH] = A_L * N^2 = 7200 * 7^2 = 352800 [nH] = 352.8 [\mu H] \quad (\text{Ec. 35})$$

Para poder comprobar este valor, dado que no se disponía de un inductómetro, se realizó un circuito de prueba basado en un oscilador LC. Un oscilador LC se basa en un condensador y una bobina conectados en paralelo. Dependiendo de los valores de estos componentes, al aplicarle un pulso de tensión al circuito LC, este oscilará a una frecuencia determinada, llamada frecuencia de resonancia.

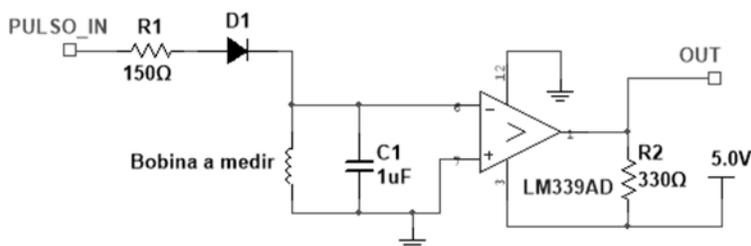


Figura 17 - Circuito para medir bobina

Con ayuda de un ArduinoNano y un comparador LM339, se aplica un pulso al circuito LC, lo que hará que resuene, y se mide la frecuencia (se mide el tiempo con el Arduino). Luego, dado que el valor del capacitor es conocido y la frecuencia fue medida, con la Ec. 36 se puede obtener el valor de inductancia.

$$f_R = \frac{1}{2\pi * \sqrt{LC}} \quad (\text{Ec. 36})$$

En la Fig. 18 se muestra la frecuencia medida y, sabiendo el valor de capacidad (1 [uF]), se calculó el valor de inductancia. El valor resultante es cercano al obtenido con los parámetros del núcleo de ferrita, la diferencia puede estar dada por la tolerancia en el valor del factor de inductancia.

$$L = \frac{1}{(2\pi)^2 * f^2 * C} = \frac{1}{(2\pi)^2 * 9090.91^2 * 1.10^{-6}} = 306.5 [\mu H] \quad (\text{Ec. 37})$$

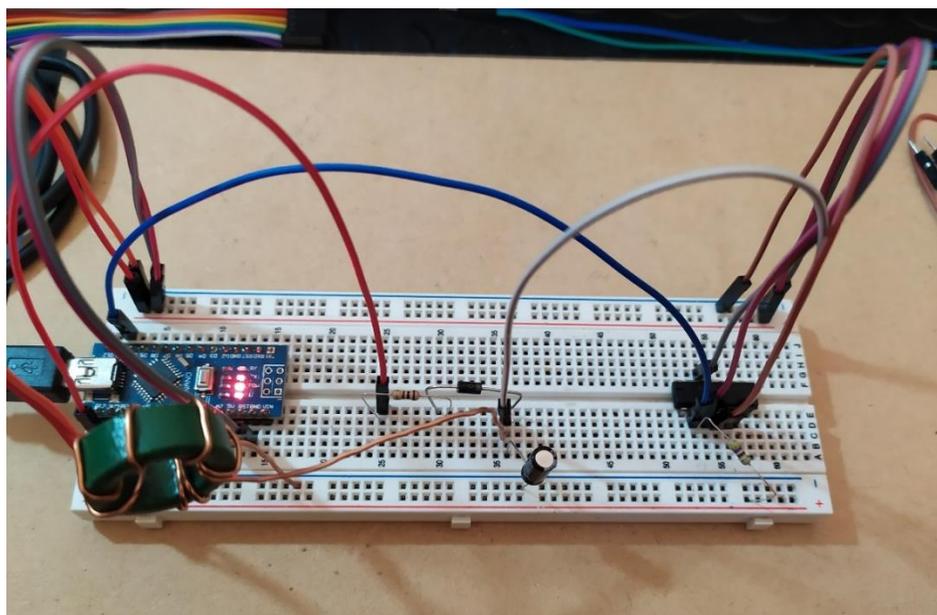


Figura 18 - Circuito de medición montado

```
frecuencia Hz:9090.91   inductancia uH:306.50
```

Figura 19 - Salida serial del Arduino

Control del sistema

Para llevar a cabo el control del cargador, se obtienen datos de tensión y corriente tanto del panel solar como de la batería.

La medida de tensión se obtiene mediante un divisor resistivo para adecuar dichas tensiones a medir a niveles aptos para el ADC del microcontrolador. En la Figura 20 se muestra el circuito utilizado, donde la tensión de salida se calcula de acuerdo a la Ec. 38. El capacitor permite el filtrado de ruidos.

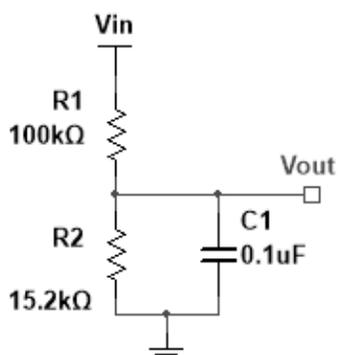


Figura 20 - Divisor resistivo

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right) \quad (\text{Ec. 38})$$

La medida de corriente se realiza por medio de un módulo, que lleva incorporado el integrado ACS712. Este integrado posee un sensor de efecto Hall que, a través del campo magnético generado por la corriente circulante, da una tensión proporcional a la corriente que circula.

La ventaja de este tipo de sensores es que no presenta una caída de tensión en el circuito para realizar la medición.

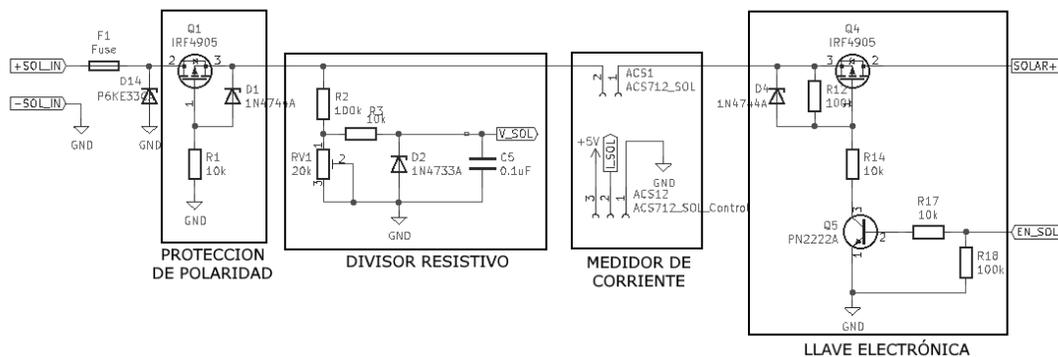


Figura 21 - Parte del circuito de control

En la Figura 21 se observa el divisor resistivo, con una protección de sobretensión y capacitor para



filtrar ruidos, y la ubicación del módulo para medir corriente. Además, se muestra una protección contra inversión de polaridad, que tiene la ventaja de no presentar la caída de tensión de un diodo, y una “llave electrónica” para conectar/desconectar las conexiones externas entre sí.

El sensor de temperatura utilizado para medir la temperatura de la batería es el “LM35”. Su rango de medición abarca desde $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ y presenta el dato como una salida de tensión lineal, cada grado Celsius equivale a 10 mV.

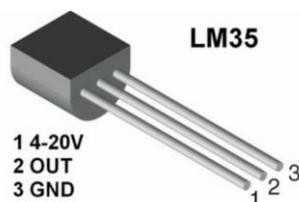


Figura 22 - Sensor de temperatura "LM35"

Hasta aquí son necesarias seis (6) entradas analógicas (tensión de panel, corriente de panel, tensión de batería, corriente de batería, corriente de salida, sensor de temperatura) para la toma de diferentes parámetros y solo se disponen de cuatros (4) libres, ya que las otras (2) dos, que se comparten con las entradas ADC, se utilizan para la comunicación I2C con el display LCD. Por lo tanto, se incorpora un módulo de entradas ADC “ADS1115” que se comunica por I2C.

El “ADS1115” presenta la ventaja de que posee una mayor resolución (16 bits, donde uno de los bits establece el signo) que el microcontrolador, e incorpora una tensión fija de referencia programable (a utilizar, 6.144V).

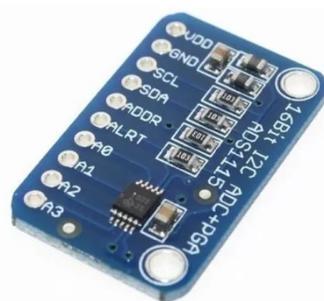


Figura 23 - Módulo ADC "ADS1115"

Comunicación inalámbrica Wi-Fi

A través de un módulo de conexión WiFi ESP-01 se envían datos a un servidor para realizar un posterior análisis del sistema y visualizar datos en tiempo real de forma remota.

Este módulo se comunica a través del puerto serie con el microcontrolador ATmega y, además, presenta una programación propia con lo que crea una interfaz capaz de configurar la conexión a una red inalámbrica que se desee.

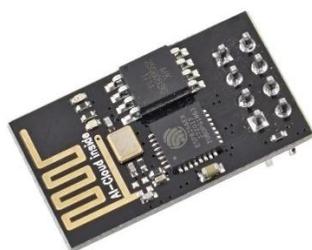


Figura 24 - Modulo Wi-Fi "ESP-01"

Los datos, guardados en una base de datos del servidor, son presentados en una página web desarrollada para tal fin. Esta web se realizó en combinación de lenguaje PHP y HTML.

La web se presenta en la Figura 25 y es accesible a través del siguiente enlace: <https://cargadorsolar.zalodev.com.ar/>. En ella se presentan datos en tiempo real e históricos de voltajes y corrientes, tanto del panel solar como de la batería y la salida. Además, a través de gráficos (Figura 26) se muestran valores de energía acumulados y consumidos.

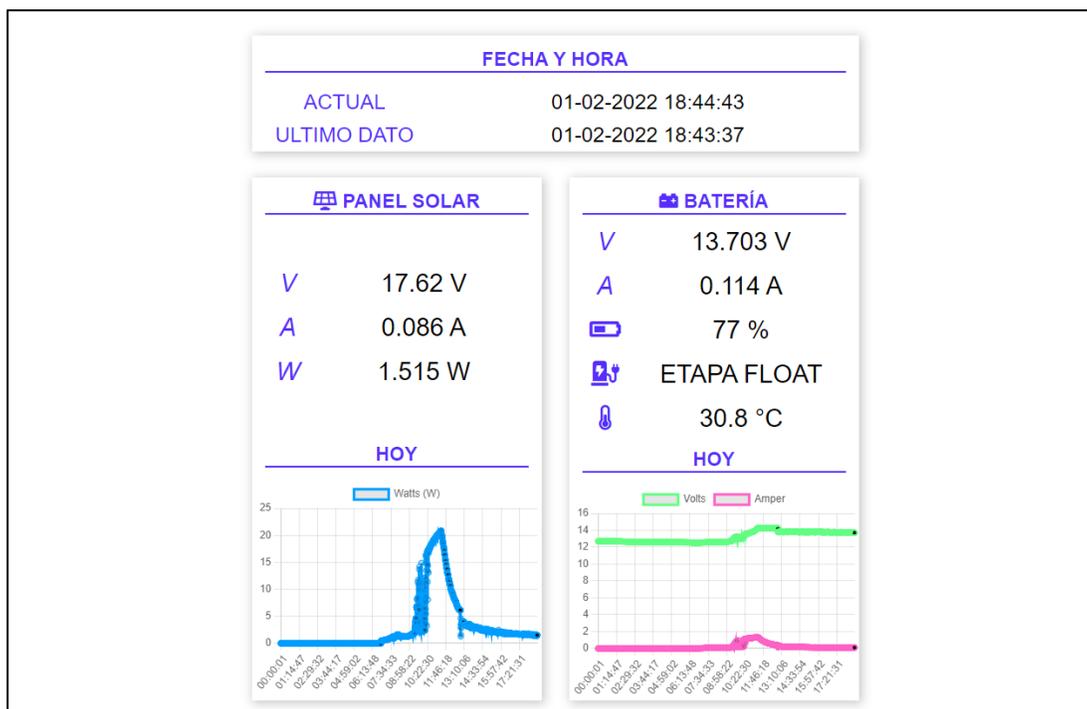


Figura 25 - Presentación de datos en página web

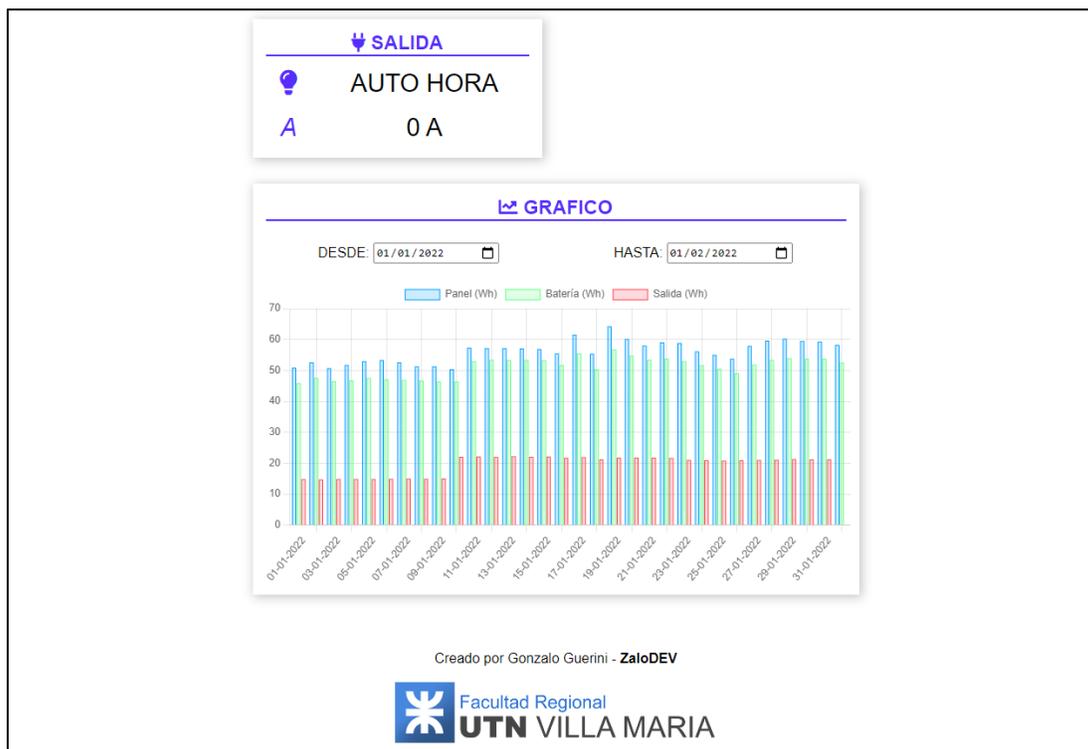


Figura 26 - Presentación de datos en página web (gráfico)

Reloj de tiempo real (RTC)

Se utiliza el módulo de reloj de tiempo real (RTC) DS3231 para tener la hora y fecha en el sistema. Esto permite enviar los datos de log con una identificación de tiempo precisa. Además, con sus datos brindados, permite realizar el encendido y apagado de la salida de manera automática por horario.

Display LCD y Encoder

Todos los parámetros medidos y estado del controlador se presentan en un display LCD de 20x4 caracteres. Además, se pueden configurar valores de tensión, corriente y otras funciones a través de un encoder rotativo con botón.



Figura 27 - Display LCD de 20x4 caracteres

Alimentación

La alimentación del microcontrolador y resto de periféricos se realiza directamente desde la batería. Para ello se reduce la tensión de la batería a 5V con un convertidor reductor CC-CC comercial de baja potencia y tamaño reducido (Figura 28).



Figura 28 - Modulo Step Down

Para alimentar el “ESP-01”, dado que trabaja a 3.3V, se reduce la tensión de 5V a 3.3V con el regulador “LM1117 3.3”.

Diagrama en bloques del dispositivo

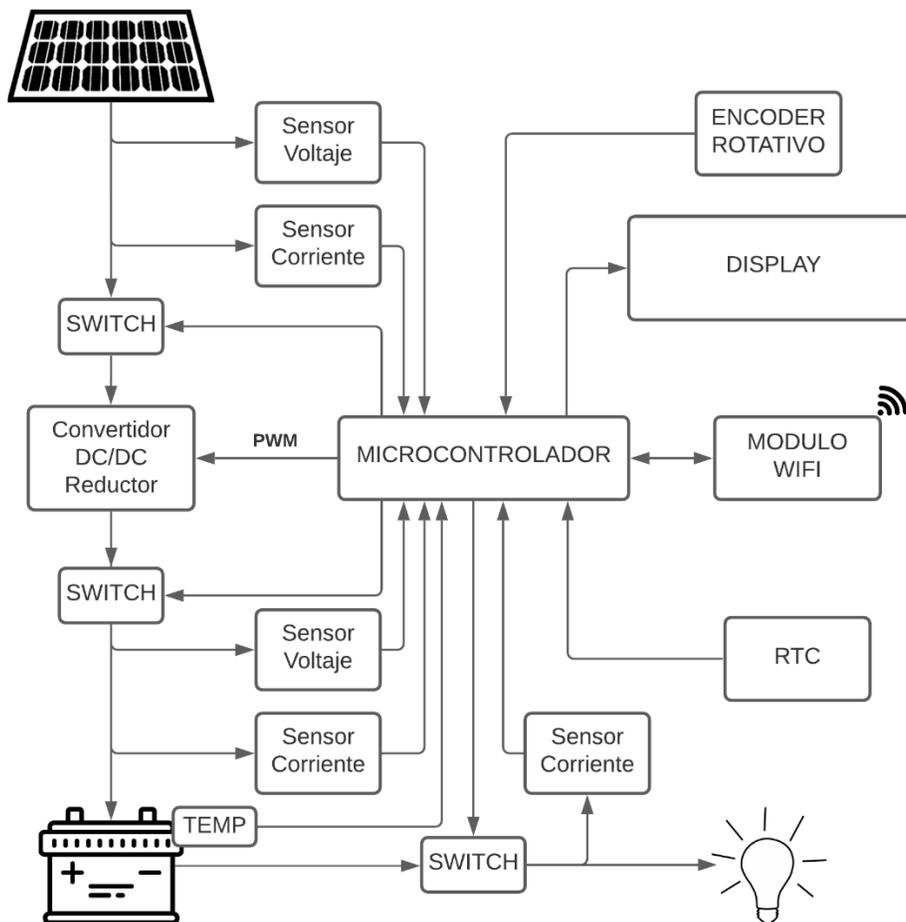


Figura 29 - Diagrama en bloques del controlador de carga



Comenzado por el panel solar, este suministra energía para la carga de la batería. Se obtienen valores de tensión y corriente para comandar el convertidor Buck, tratando de situar al panel en su punto MPPT (siempre y cuando el ciclo de carga de batería lo permita).

Por la salida del convertidor, hacia la batería, también se mide tensión y corriente para llevar su ciclo de carga de forma controlada. Estos ciclos principales, gestionados por el microcontrolador, son tres: una fase de corriente constante (fase “Bulk”) seguida por dos fases con voltaje constante (“Absorción” y “Flotación”), los cuales se explicaron con anterioridad.

El microcontrolador se encarga de permitir el paso de corriente desde el panel hacia la batería, pasando por el convertidor, a través de “llaves electrónicas” (reconocidos como “SWITCH” en la Figura 29) comandando transistores mosfet. También se controla la temperatura de la batería para compensar la carga de la misma.

Conectado a la batería también se encuentra una carga de salida, como una lámpara, en la que se lleva a cabo un control de corriente como protección. Con esto, en caso de ser necesario, se puede desactivar la carga conectada por medio de un switch (“llave electrónica”).

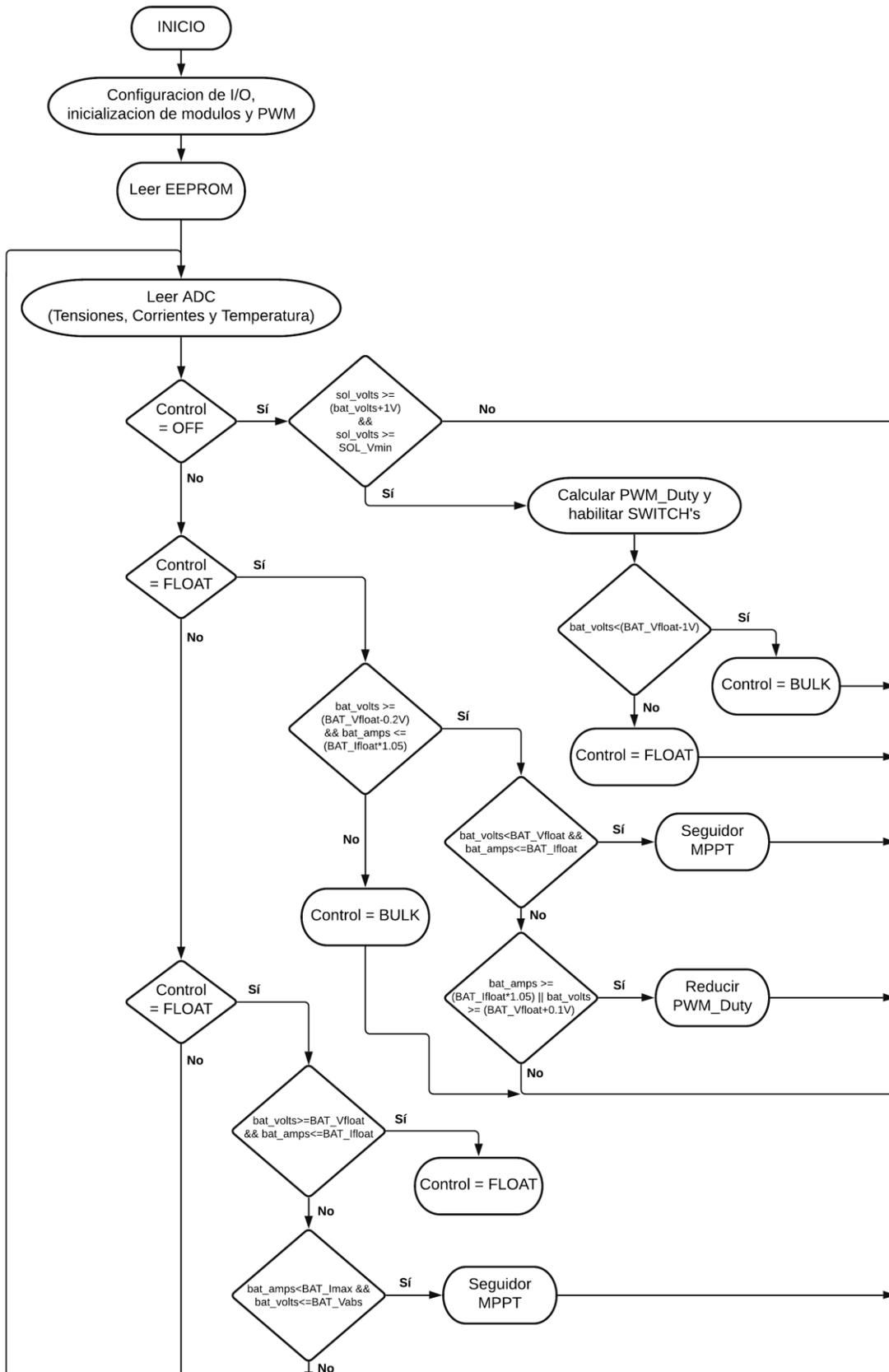
Todo el sistema de control es alimentado por la batería.

Por el lado del usuario, existe un panel de operación para setear distintas configuraciones como niveles de carga (tensión y corriente para llevar a cabo el ciclo), niveles de protección (corriente de desconexión de la salida) y automatización de conexión de la salida (encender en cierto horario o cuando es de noche).

Para la presentación de la información, se tiene un display LCD que muestra en tiempo real tensiones, corrientes y estado de la salida. Además, periódicamente se envía esta información a un servidor web.

Diagrama de flujo

En la Figura 30 se puede observar el diagrama de flujo del sistema. El diagrama de flujo del “Seguidor MPPT” se vio anteriormente (Figura 12).



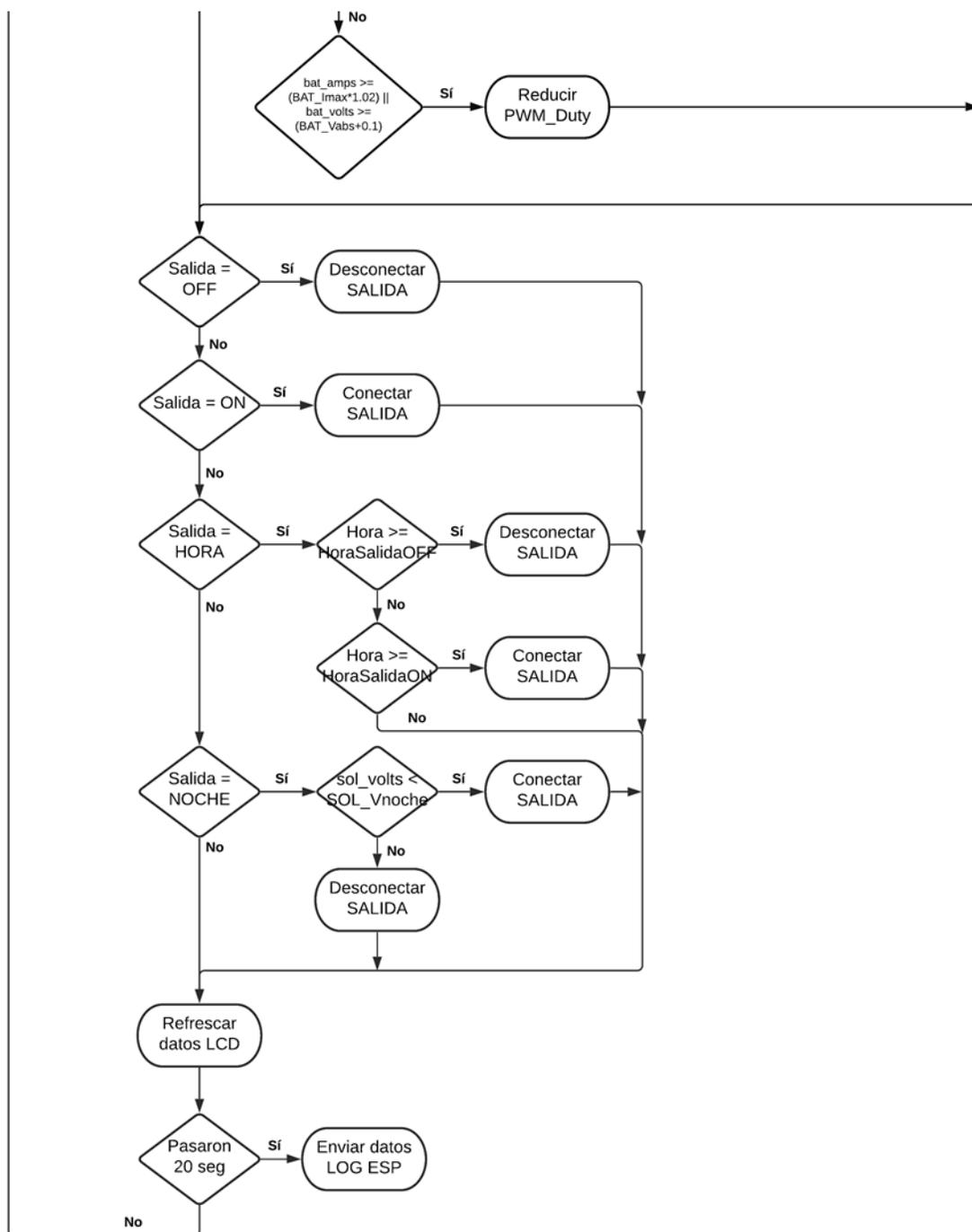


Figura 30 - Diagrama de flujo del controlador



Evaluación Final del Sistema

Primeras pruebas

Inicialmente se realizaron pruebas sobre una placa experimental. Se comenzó con la prueba del convertidor reductor CC-CC, comprobando la modulación PWM de control en un osciloscopio de mano y que la tensión de salida sea la correcta.

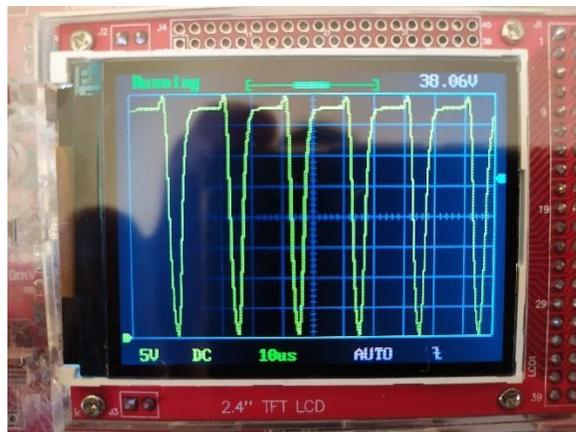


Figura 31 - Salida PWM de control

Luego se fueron añadiendo mosfet de “llave”, para permitir el paso de corriente entre el panel y la batería, medidores de corriente, medidores de tensión y display LCD para visualizar datos.

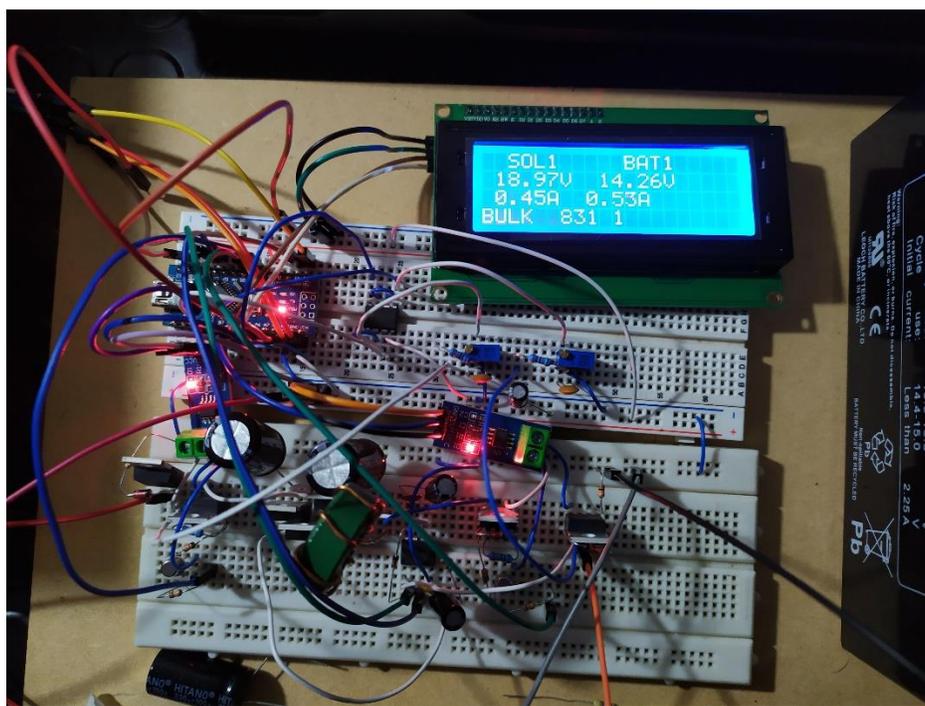


Figura 32 - Pruebas en placa experimental

Preparación del prototipo con materiales finales

Para el diseño del PCB final del dispositivo se utilizó la herramienta gratuita “Kicad”. En esta etapa se trató de lograr una placa de dimensiones aceptables y buena ubicación de los componentes por zonas.

El diseño se desarrolló en doble capa para evitar la colocación de puentes con cables y la totalidad de los componentes se colocó en la capa superior. En la Figura 33 y Figura 34 se observa el diseño del PCB, lado superior e inferior respectivamente. La Figura 35 muestra una vista superior en 3D del modelo montado.

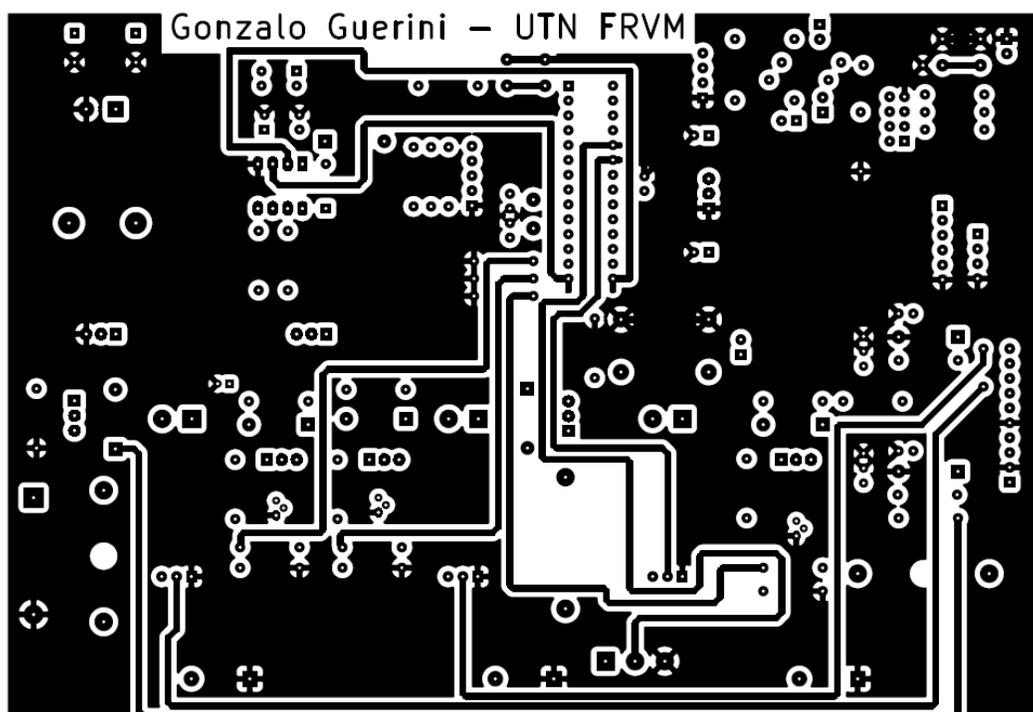


Figura 33 - Diseño de PCB, cara superior

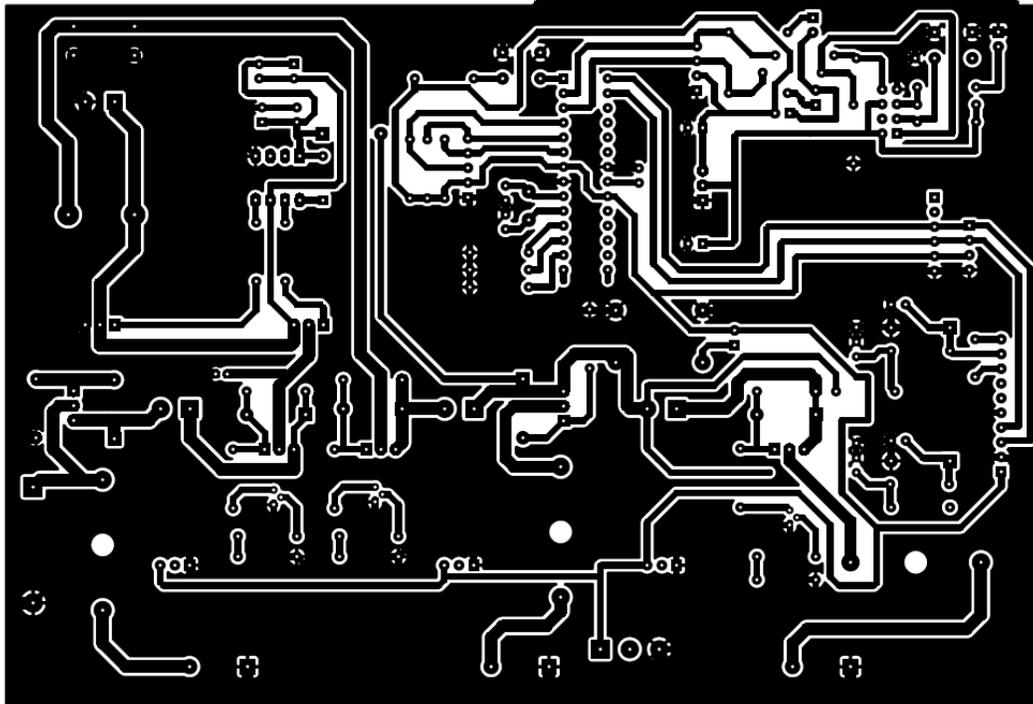


Figura 34 - Diseño de PCB, cara inferior

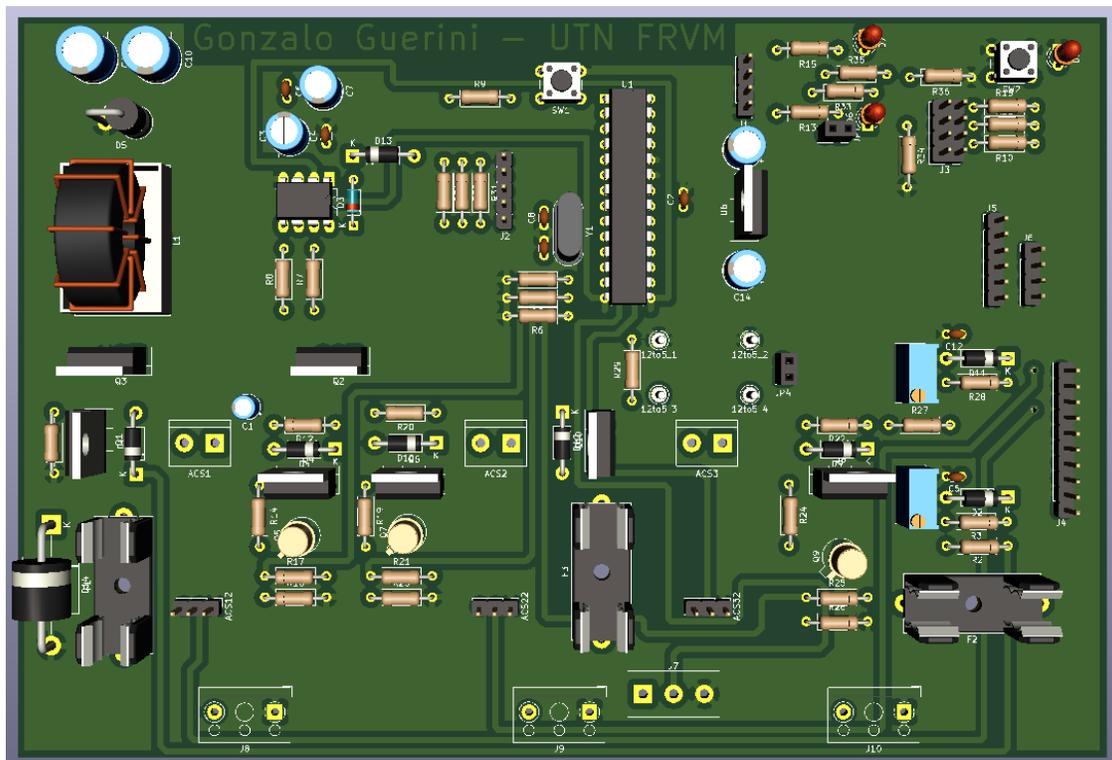


Figura 35 - Vista superior en 3D de la placa

La placa se realizó en una placa de material epoxi FR4 doble faz utilizando el método de planchado.

El método de planchado consiste en transferir la impresión del circuito, realizada en tóner en una hoja de papel fotográfico o papel de transferencia, a la placa epoxi utilizando una plancha aplicando calor. Una vez transferido el tóner a la placa, se la pasa por una solución de cloruro férrico para eliminar las zonas de cobre no deseadas y así formar las pistas.

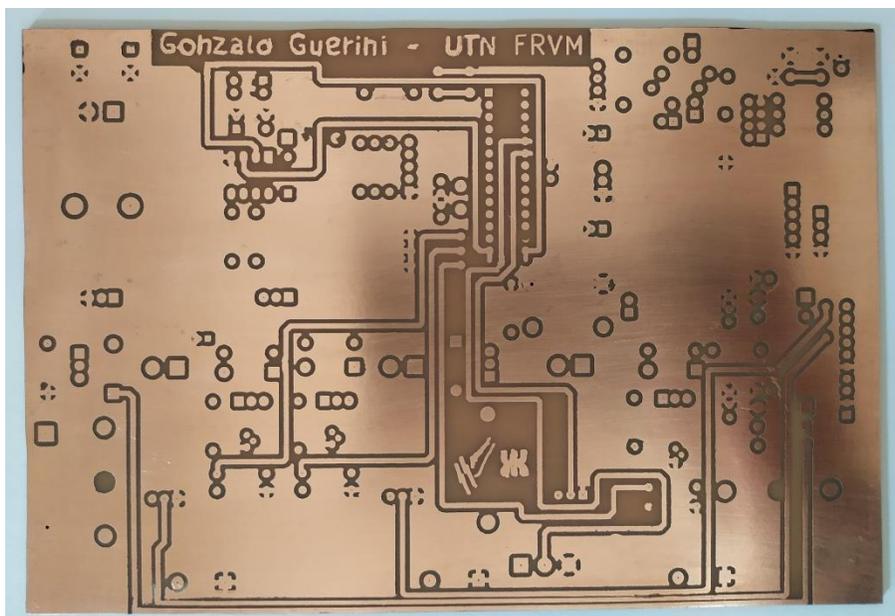


Figura 36 - Placa PCB realizada (cara superior)

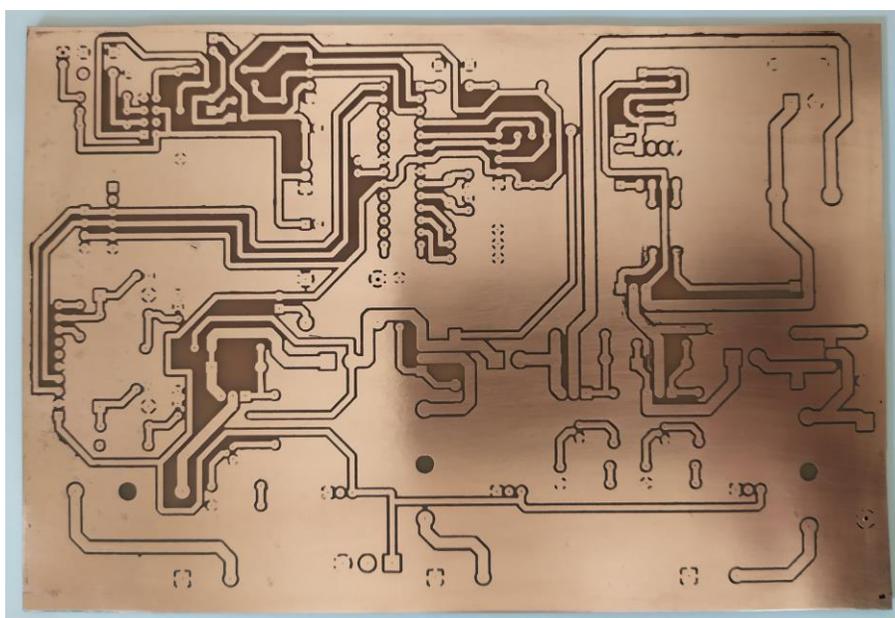


Figura 37 - Placa PCB realizada (cara inferior)

Montaje y ensayo real del prototipo

Una vez pasado el PCB por la solución de cloruro férrico se realizaron las perforaciones y montaje de componentes principales, como lo es el microcontrolador. Se realizó una primera programación para comprobar el correcto funcionamiento del mismo.

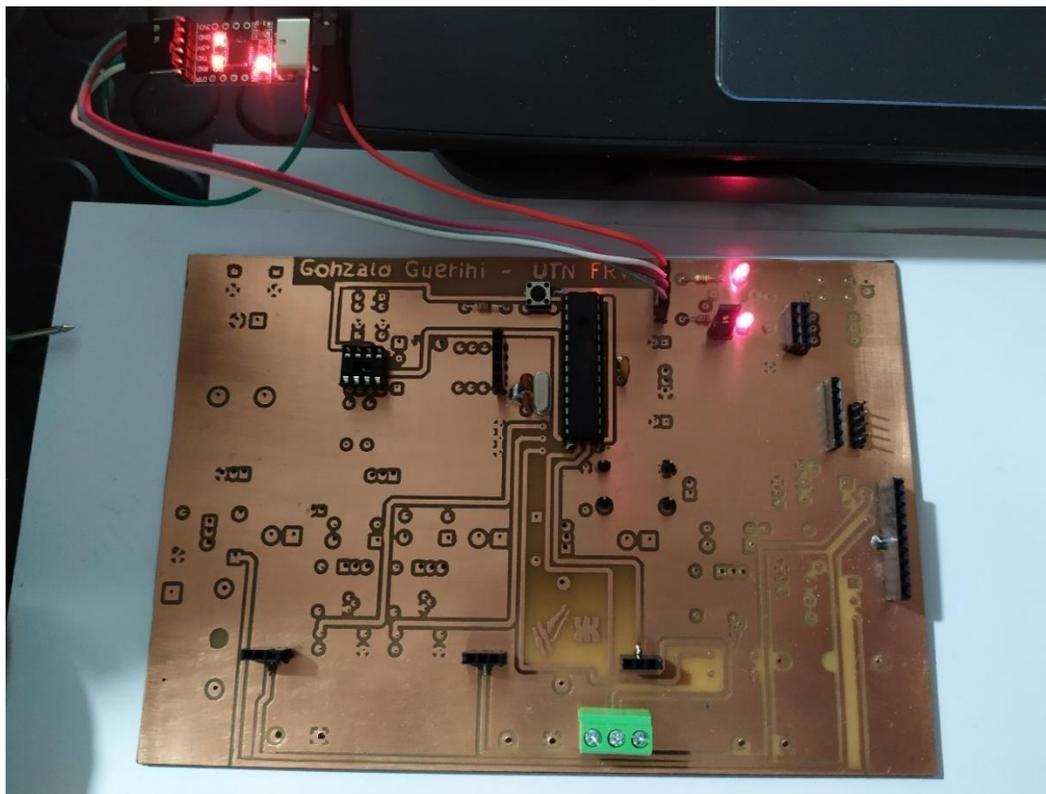


Figura 38 - Programa para testear funcionamiento de microcontrolador

Seguidamente se montaron los componentes requeridos para reducir los niveles de tensión de la batería a 5 [V] y 3.3 [V] para alimentar todo lo referido al control.

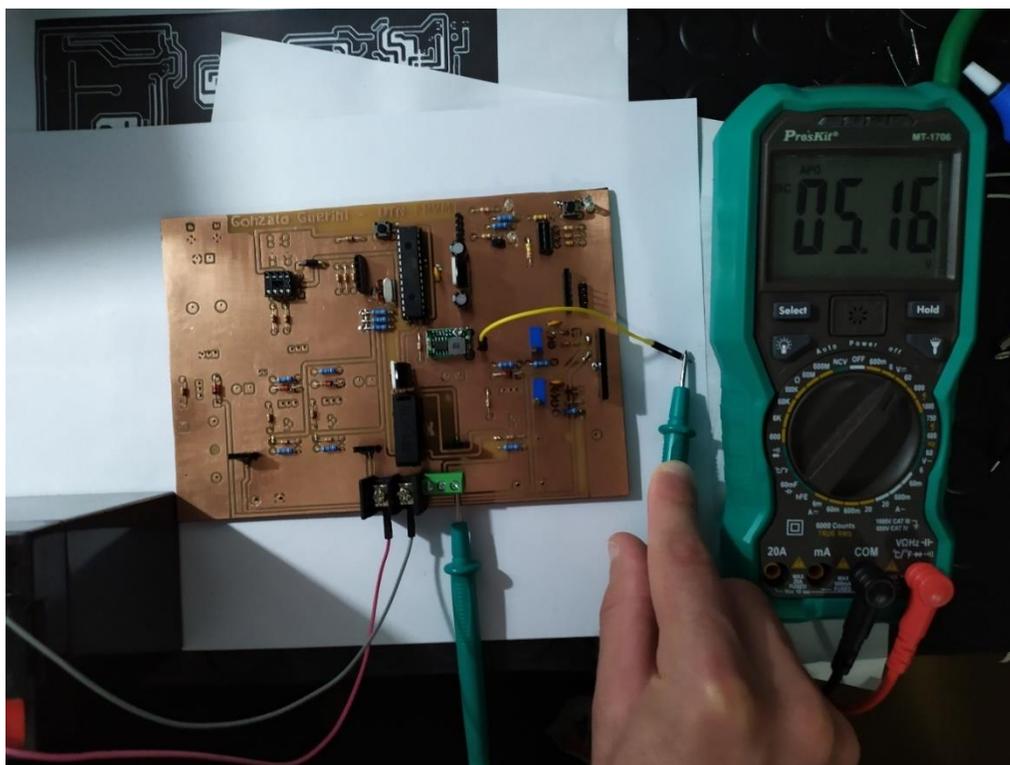


Figura 39 - Comprobación de tensión en fuente de 5V

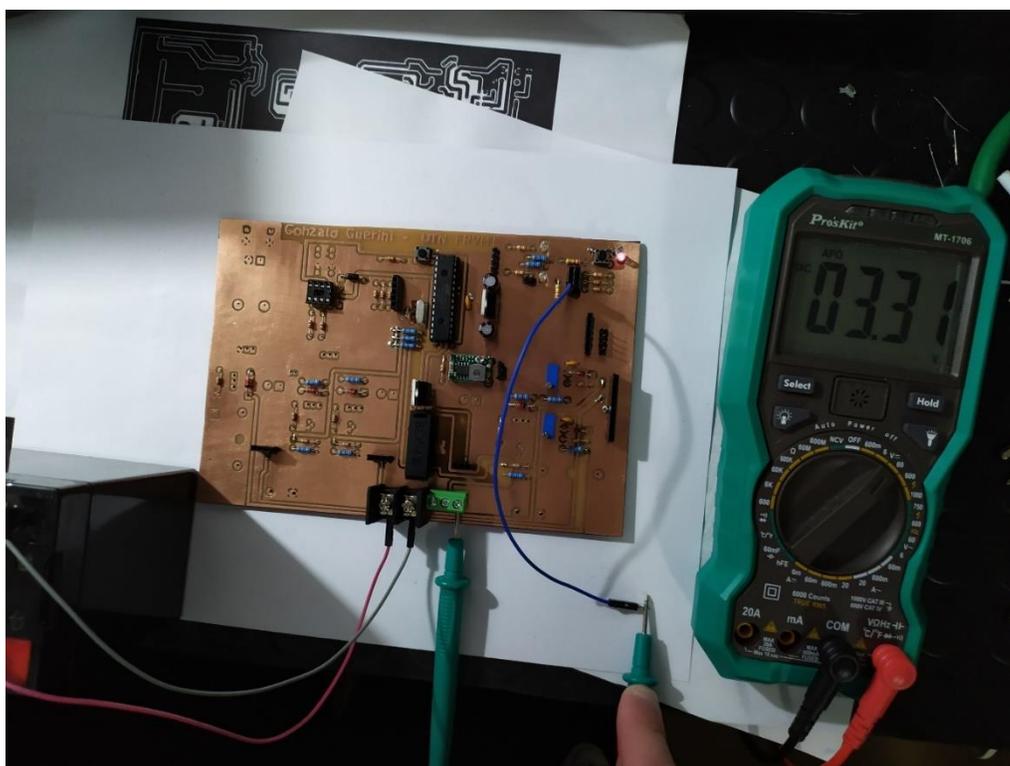


Figura 40 - Comprobación de tensión en fuente 3.3V

En la Figura 41 se muestra la placa, del lado superior, con la mayoría de componentes soldados. Se puede apreciar, en la Figura 42, que las pistas de potencia fueron reforzadas con estaño para soportar mejor la corriente de diseño.

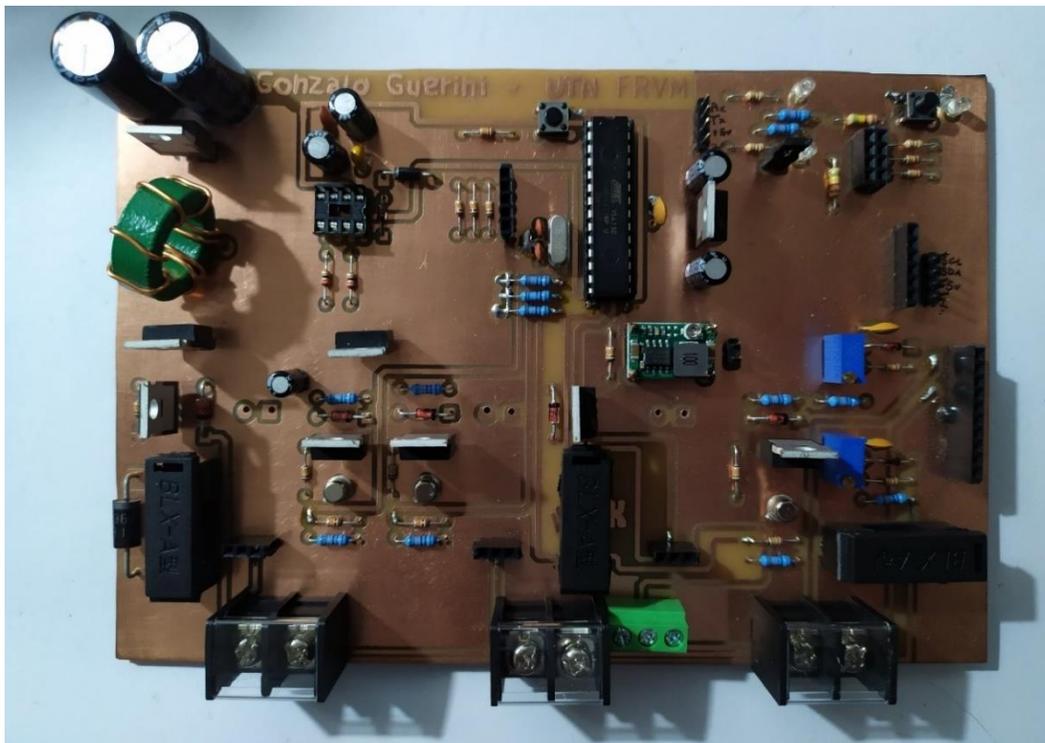


Figura 41 - Componentes colocados en la placa

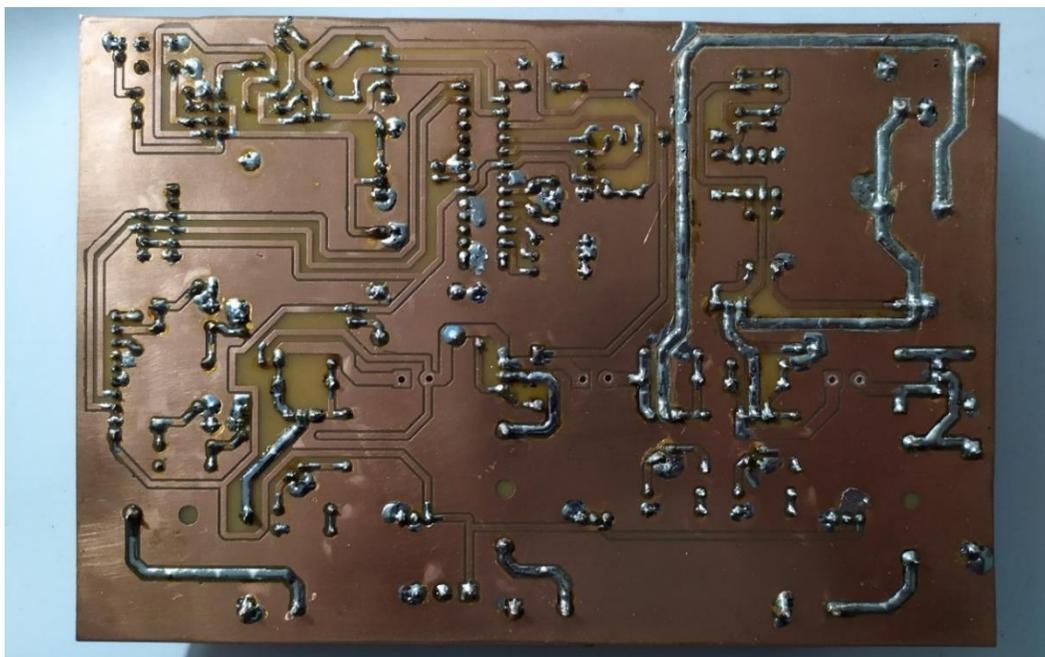


Figura 42 - Lado inferior de placa con componentes colocados

Finalmente se añaden los componentes externos (display LCD, encoder rotativo y sensor de temperatura, Figura 43).

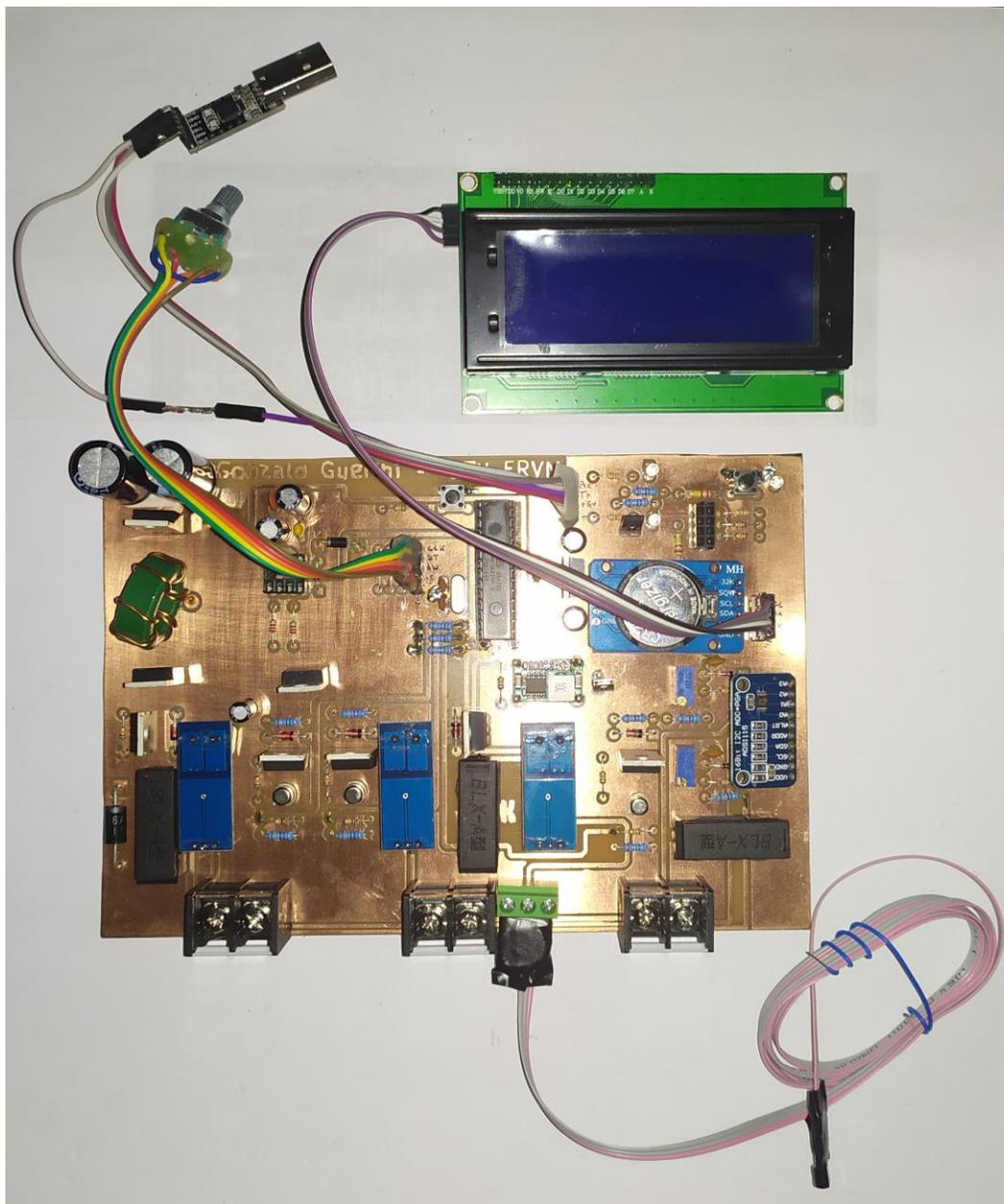


Figura 43 - Montaje final sin gabinete

Se realiza una prueba del sistema antes de proceder a su acabado final, Figura 44.

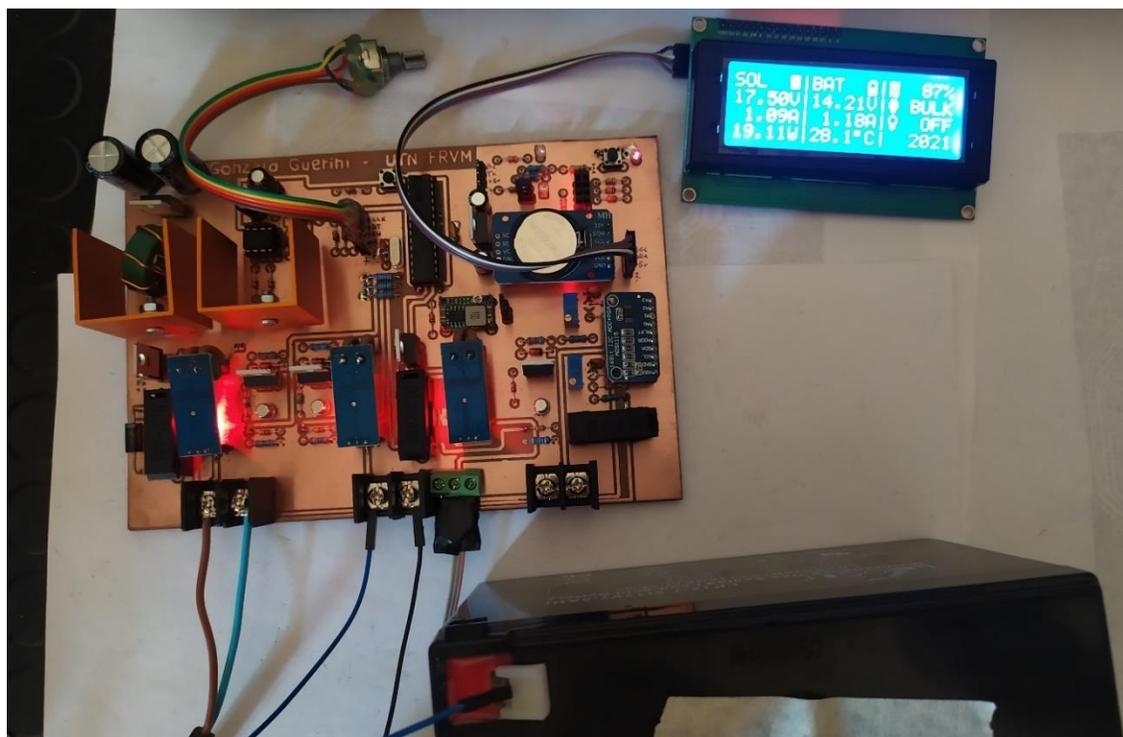


Figura 44 - Prueba del controlador de carga MPPT

Para el acabado final del controlador se diseñó y fabricó un gabinete a medida por medio de una impresora 3D. En la Figura 45 se muestra el diseño en 3D realizado en la herramienta gratuita vía web de TinkerCad.

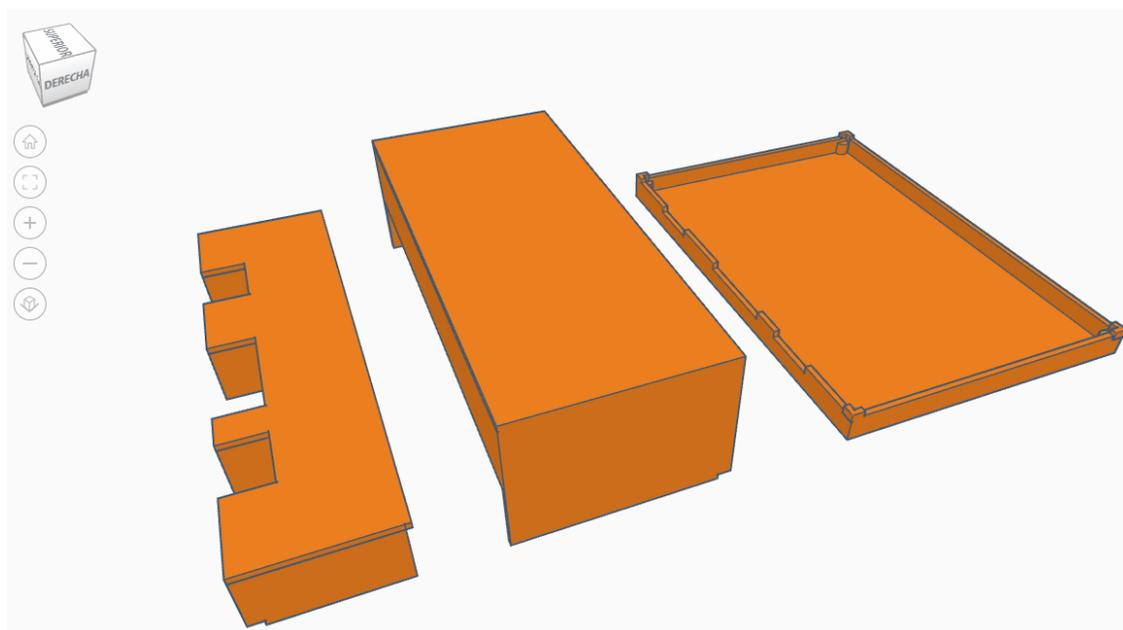


Figura 45 - Diseño de gabinete en 3D

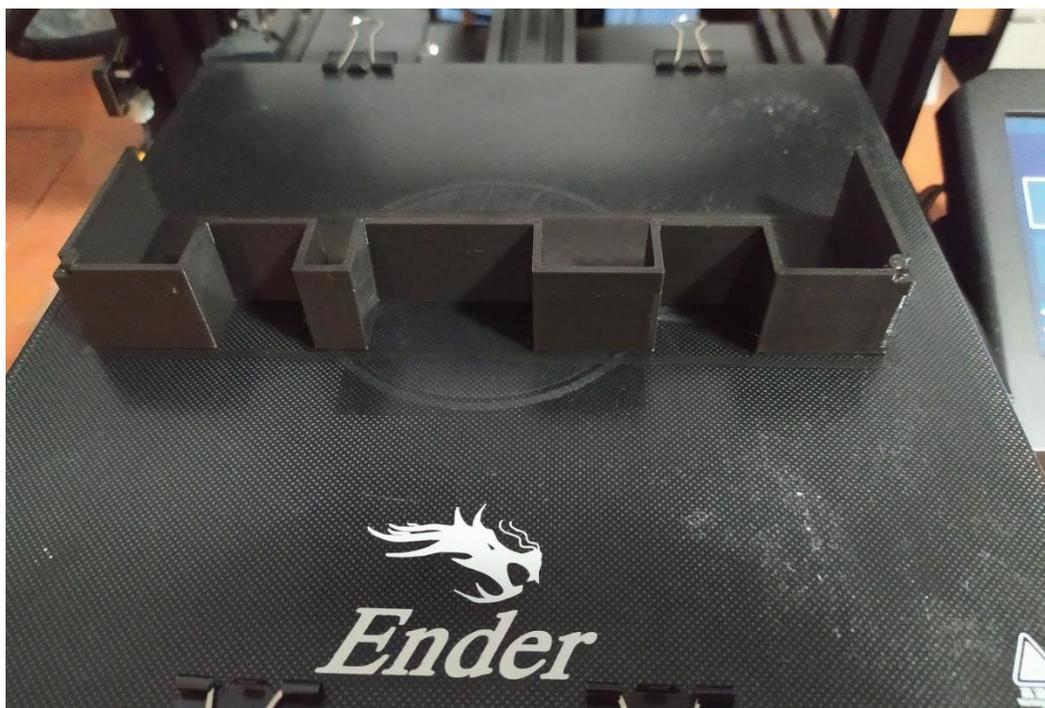


Figura 46 - Impresión en 3D de parte del gabinete



Figura 47 - Piezas del gabinete impresas en 3D finalizadas



Como se observa, el gabinete presenta dos piezas, una inferior donde se monta la PCB y otra superior donde se encuentra montado el display LCD y el encoder rotativo. En las Figura 48 y Figura 49 se observa el controlador montado en el gabinete.

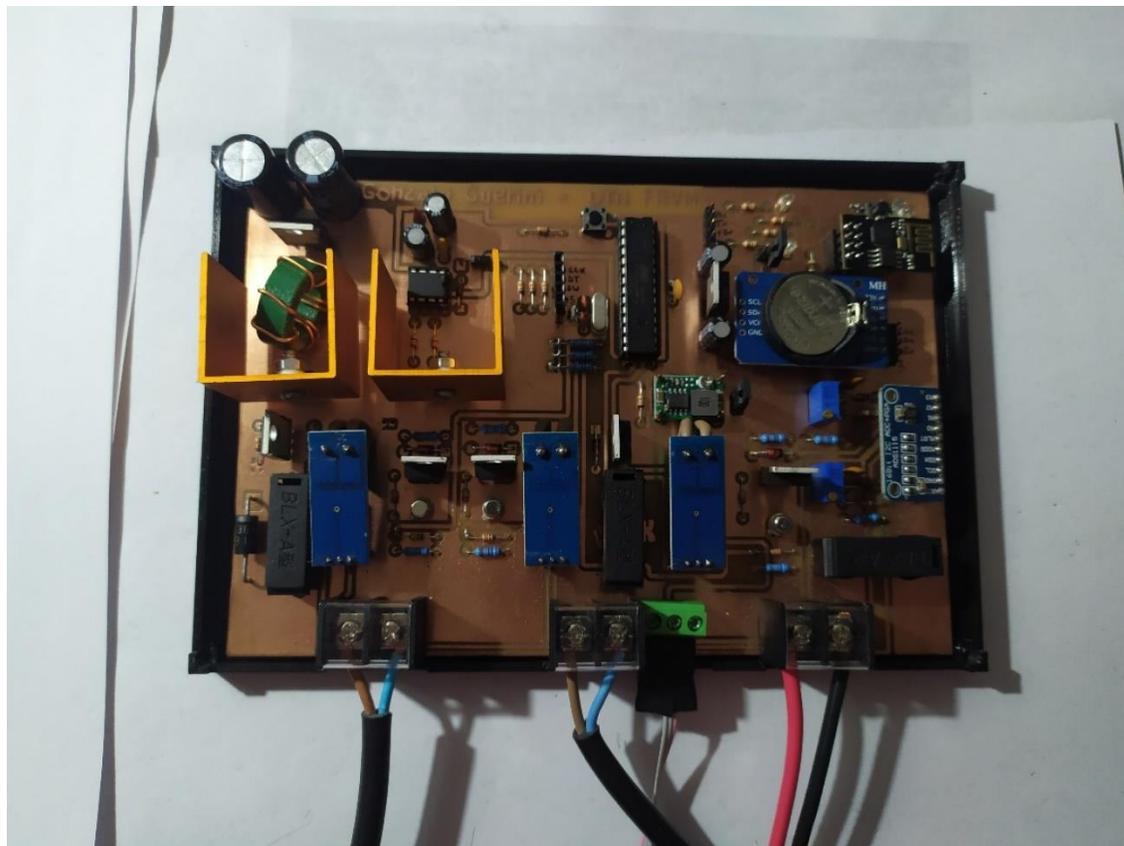


Figura 48 - Placa montada en parte inferior del gabinete



Figura 49 - Montaje final en gabinete

Una vez que el montaje del sistema está finalizado, se procedió a realizar la instalación del mismo para realizar primeros ensayos y un posterior análisis. Para ello se colocó el panel solar sobre un techo y el controlador dentro de una habitación. En la Figura 50 se muestra la ubicación del panel solar, mientras que en la Figura 51 el controlador en ensayo y puliendo detalles de programación.



Figura 50 - Ubicación del panel solar en prueba

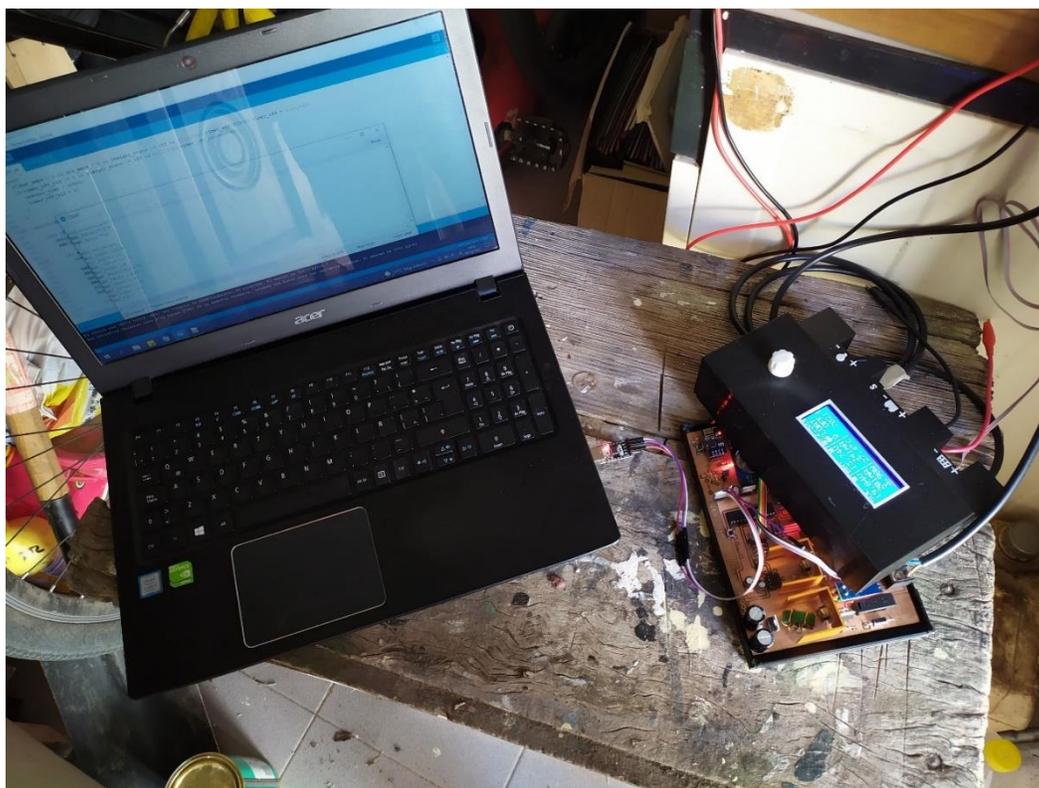


Figura 51 - Primeros ensayos en campo

Análisis del sistema en campo

El controlador permaneció en funcionamiento por más de un mes en la ubicación de ensayo y en este tiempo solo se varió la carga conectada a la salida y el tiempo en que la salida era activada.

A través del sitio web es posible determinar la energía producida por el panel solar, almacenada y utilizada. En la Figura 52 se muestran los últimos 30 días de generación y consumo.

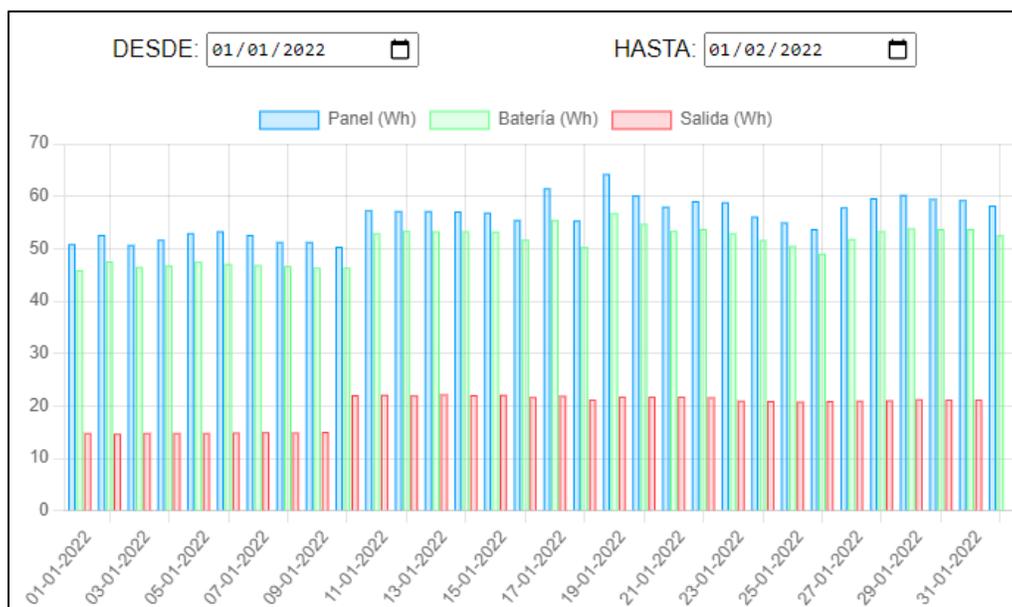


Figura 52 - Muestra gráfica de energía

Si se selecciona un único día, se puede ver el “minuto a minuto” del estado de voltajes y corrientes (Figura 53). Aquí se puede apreciar como la generación es mayor en las horas pico de sol y que, a pesar de estar en una hora de sol pleno, la generación se reduce, o mejor dicho se limita, debido a que la batería alcanza el voltaje de carga configurado.

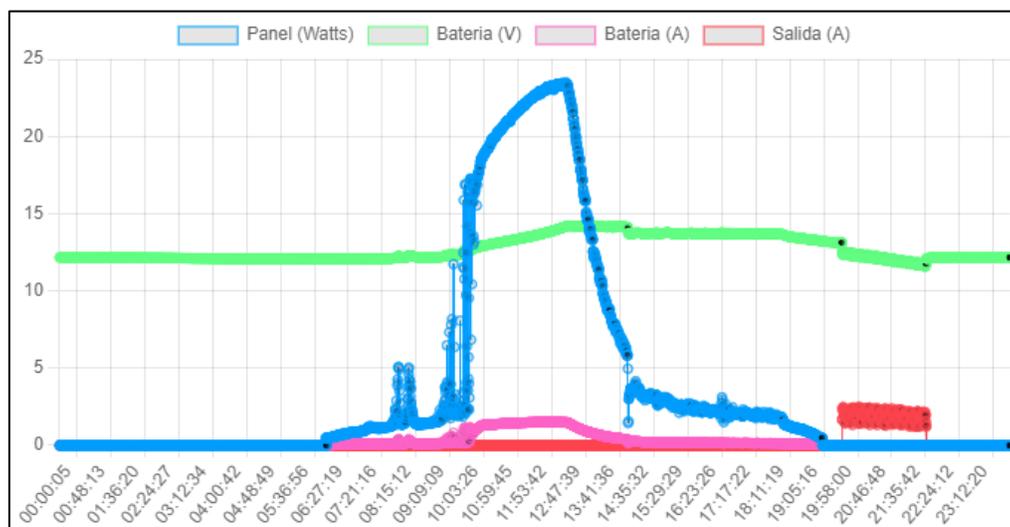


Figura 53 - Día completo de funcionamiento

Analizando la energía recibida por el panel y la absorbida por la batería, se puede establecer una aproximación en el rendimiento del convertidor. Para esto, se realizó el rendimiento de cada uno de los días mostrados (Ec. 39) en la Figura 52 y se obtuvo un promedio del mismo, el cual demostró que el rendimiento del cargador solar es de aproximadamente un 91% (ver Tabla I).

$$\eta = \frac{W_{PANEL}}{W_{BATERIA}} \quad (\text{Ec. 39})$$



Fecha	W Panel (Wh)	W Batería (Wh)	Rendimiento
01/01/2022	50,9	45,9	90%
02/01/2022	52,6	47,6	91%
03/01/2022	50,7	46,6	92%
04/01/2022	51,7	46,8	91%
05/01/2022	52,9	47,5	90%
06/01/2022	53,3	47,1	88%
07/01/2022	52,6	46,9	89%
08/01/2022	51,3	46,6	91%
09/01/2022	51,3	46,4	90%
10/01/2022	50,4	46,4	92%
11/01/2022	57,3	53,0	92%
12/01/2022	57,2	53,4	93%
13/01/2022	57,2	53,3	93%
14/01/2022	57,1	53,3	93%
15/01/2022	56,9	53,2	94%
16/01/2022	55,5	51,7	93%
17/01/2022	61,5	55,5	90%
18/01/2022	55,4	50,3	91%
19/01/2022	64,3	56,8	88%
20/01/2022	60,1	54,7	91%
21/01/2022	58,0	53,4	92%
22/01/2022	59,1	53,7	91%
23/01/2022	58,8	53,0	90%
24/01/2022	56,1	51,6	92%
25/01/2022	55,0	50,5	92%
26/01/2022	53,7	49,1	91%
27/01/2022	57,9	52,0	90%
28/01/2022	59,7	53,3	89%
29/01/2022	60,3	53,9	89%
30/01/2022	59,5	53,8	90%
31/01/2022	59,3	53,8	91%
RENDIMIENTO PROMEDIO →			91%

Tabla I - Rendimiento diario y promedio en un mes



Conclusiones

Como conclusión se puede decir que el trabajo cumple con las expectativas planteadas. Se logró un dispositivo capaz de cargar una batería con un panel solar y aprovechar toda la energía que este puede brindar utilizando el algoritmo “Perturb and Observe” para hallar el punto de máxima potencia.

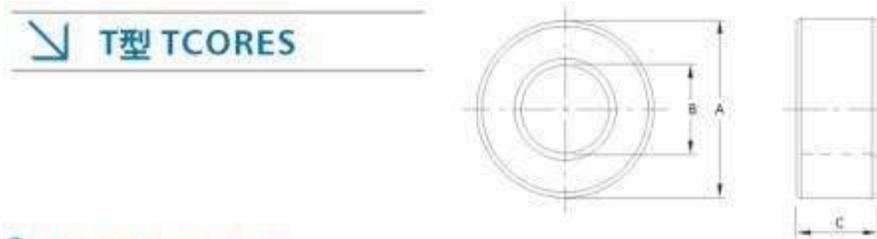
Se alcanzaron los objetivos planteados al inicio del desarrollo, obteniendo un dispositivo estable y funcional. La decisión de utilizar un servidor web propio, para los datos de logueo, fue acertada debido a que los servicios gratuitos limitan la cantidad de datos a enviar y hubiese sido un limitante para el análisis posterior de los mismos.

Habiendo finalizado, se proponen muchas posibilidades de mejoras para lograr un mejor controlador. Algunas de estas mejoras son:

- Uso de un medio de almacenamiento interno para guardar datos cuando no se tiene conexión a internet por medio de WiFi.
- Uso de conexión GSM/GPRS.
- Poder realizar el control y configuración del controlador desde la página web.
- Mejoras en el diseño y componentes para reducir el tamaño
- Ampliar capacidad para manejo de varios paneles solares y/o paneles solares de mayor potencia y voltaje nominal.
- Ampliar a uso de baterías de 24V.
- Agregado de salidas de tensiones fijas, por ejemplo, un conector de carga USB.



Anexo I



T Cores Dimensions 尺寸

规格型号 TYPE	尺寸(Dimensions) (Unit : mm)			有效参数 Effective Parameter				Wt (G/set)
	A	B	C	C _i (mm)	Le(mm)	Ae(mm ²)	Ve(mm ³)	
T25/15/10	25.00±0.50	15.00±0.50	10.00±0.30	1.23	60.2	48.9	2944	15
T25/15/12	25.00±0.50	15.00±0.50	12.00±0.30	1.03	60.2	58.5	3520	18
T15/15/13	25.00±0.50	15.00±0.50	13.00±0.30	0.946	60.1	63.6	3830	19.6
T25/15/15	25.00±0.50	15.00±0.50	15.00±0.50	0.82	60.1	73.4	4410	22.6
T18/19/12	28.00±0.50	19.00±0.40	12.00±0.30	1.35	72	53.3	3840	19.2
T29/19/15	29.00±0.60	19.00±0.40	15.00±0.50	0.99	73.2	73.9	5409	27
T31/16/13	31.00±0.60	19.00±0.40	13.00±0.50	0.987	75.4	76.5	5770	29.5
T31/19/15	31.00±0.60	19.00±0.40	15.00±0.50	0.86	75.5	88.2	6660	34
T36/23/15	36.00±0.6	23.00±0.50	15.00±0.40	0.94	90.0	95.6	8590	42
T38/22/14	38.00±1.00	22.00±0.80	14.00±0.50	0.82	89.7	109.3	9802	50
T38/22/15	38.00±1.00	22.00±0.80	15.00±0.50	0.766	89.7	117	10500	52
T39/19/13	38.60±0.90	19.80±0.70	12.50±0.50	0.753	85.2	113	9650	49
T47/27/13	47.00±1.10	27.00±0.80	13.00±0.50	0.87	110.5	126.7	14002	72

Electrical Characteristics 电气特性

规格型号 TYPE	AL-Value(nH/N)±25%					Pc max(W)	
	YF5K	YF7K	YF10K	YF15K	YFP4/YFP4A	100kHz, 200mT, 100°C	
T25/15/10	5100	7100	10200	15000	2200	1.50	1.2
T25/15/12	6100	8600	12300	18000	2700	1.76	1.4
T15/15/13	6640	9300	13200	19900	3000	1.92	1.54
T25/15/15	7700	10700	15300	22700	3500	2.21	1.77
T18/19/12	4650	6510	9300	13700	2100	1.92	1.536
T29/19/15	6340	8900	12700	19000	2800	2.70	2.16
T31/16/13	6400	8910	12700	19000	2900	2.90	2.31
T31/19/15	7300	10300	14700	22000	3200	3.40	2.72
T36/23/15	6720	9400	13200	20000	3000	4.30	3.44
T38/22/14	7650	10700	15300	22900	3400	4.90	3.9
T38/22/15	8200	11500	16300	24300	3700	5.30	4.20
T39/19/13	8340	11700	16600	25000	3800	4.83	3.86
T47/27/13	7300	10100	14400	21000	3200	7.00	5.60



YUFENG

T型 TCORES

○ T Cores Dimensions 尺寸

规格型号 TYPE	尺寸(Dimensions) (Unit : mm)			有效参数 Effective Parameter				Wt (G/set)
	A	B	C	C ₁ (mm)	Le(mm)	Ae(mm ²)	Ve(mm ³)	
T6/3/2	6.00±0.40	3.00±0.3	3.00±0.3	3.21	13.0	4.00	46.5	0.26
T6/3/3	6.00±0.40	3.00±0.3	3.00±0.30	3.02	13.1	4.3	57	0.3
T8/4/2	6.00±0.40	3.00±0.3	2.00±0.30	2.87	16.8	6.78	109	0.68
T8/4/4	8.00±0.30	4.00±0.3	4.00±0.30	2.27	17.4	7.68	133	0.72
T9/5/3	9.10±0.30	5.10±0.2	3.00±0.20	3.62	21.1	5.84	123	0.61
T9/5/4	9.10±0.30	5.10±0.2	4.00±0.20	2.34	20.6	7.84	167	0.87
T9/5/5	9.10±0.30	5.10±0.2	5.00±0.20	2.14	20.8	9.7	202	1.0
T10/6/4	10.00±0.50	6.00±0.4	4.00±0.40	3.07	24.1	7.63	188	0.98
T10/6/5	10.00±0.50	6.00±0.4	5.00±0.40	2.51	24.1	9.59	230	1.2
T10/6/6	10.00±0.5	6.00±0.4	6.00±0.40	2.32	24.2	10.30	270	1.28
T12/6/4	12.00±0.30	6.00±0.3	4.00±0.25	2.27	26.1	11.5	301	1.5
T12.7/7.9/5	12.00±0.30	6.00±0.3	5.00±0.30	2.17	29.8	16.1	496	0.25
T12.7/7.9/6.35	12.70±0.25	7.92±0.25	6.80±0.30	2.08	31.2	15	466	2.3

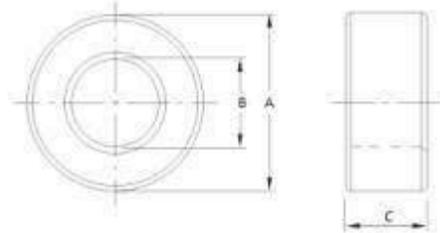
○ Electrical Characteristics 电气特性

规格型号 TYPE	AL-Value(nH/N ²)±25%					Pc max(W)	
	YF5K	YF7K	YF10K	YF15K	YFP4/YFP4A	100kHz, 200mT, 100°C	
T6/3/2	2720	3800	5430	8100	1250		
T6/3/3	2100	2900	4200	6200	1000		
T8/4/2							
T8/4/4	2770	4150	5550	8000	1350		
T9/5/3	1740	2430	3470	5200	800		
T9/5/4							
T9/5/5	2550	4000	5700	8500	1300	0.10	0.08
T10/6/4	2050	2870	4100	6100	940	0.094	0.076
T10/6/5	2800	3500	5100	7600	1100	0.12	0.096
T10/6/6							
T12/6/4	2750	3850	5500	8200	1200	0.15	0.12
T12.7/7.9/5							
T12.7/7.9/6.35	3020	4180	6020	8700	1300	0.24	0.19

mdcoil.en.alibaba.com



T型 TCORES



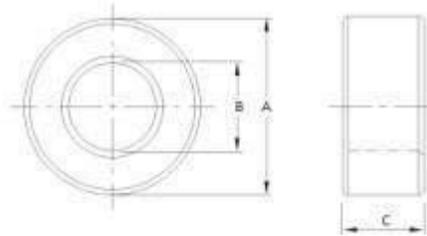
T Cores Dimensions 尺寸

规格型号 TYPE	尺寸(Dimensions) (Unit : mm)			有效参数 Effective Parameter				Wt (G/set)
	A	B	C	C _e (mm)	Le(mm)	Ae(mm ²)	Ve(mm ³)	
T14/8/7	14.00±0.40	8.00±0.3	7.00±.30	1.62	32.8	20.3	665	3.5
T14/9/5	14.00±0.40	12.00±0.2	5.00±0.30	2.89	35	12.1	423	2
T16/12/8	16.00±0.20	9.00±0.3	8.00±.20	2.77	43.4	15.7	680	3.4
T16/9/7	16.00±0.30	9.50±0.4	7.00±.30	1.56	37.2	23.8	964	4.2
T16/9.6/8	16.00±0.30	9.60±0.30	8.00±0.30	1.54	38.5	25.1	96.4	4.6
T18/8/5	18.00±0.50	8.00±0.40	5.00±0.40	1.56	36.7	23.5	864	4.9
TT18/10/7	18.00±0.50	10.00±0.40	7.00±0.30	1.53	41.5	27.2	1130	6.0
T18/10/10	18.00±0.50	10.00±0.40	10.00±0.40	1.07	41.5	38.9	1610	8.6
T18/12/8	18.00±0.50	12.00±0.40	8.00±0.30	1.94	45.8	23.7	1090	5.2
T20/10/10	20.00±0.40	10.00±0.30	10.0±0.30	0.91	43.5	48.0	2090	11
T22/14/6.35	22.00±0.40	14.00±0.40	6.35±0.30	2.19	54.6	25	1360	7.0
T22/14/8	22.00±0.40	14.00±0.40	8.00±0.30	1.74	54.6	31.5	1720	8.8
T22/14/10	22.00±0.40	14.00±0.40	10.00±0.30	1.39	54.7	39.3	2150	11

Electrical Characteristics 电气特性

规格型号 TYPE	AL-Value(nH/N ²)±25%					Pc max(W)	
	YF5K	YF7K	YF10K	YF15K	YFP4/YFP4A	100kHz, 200mT, 100℃	
T14/8/7	3900	5500	7800	11700	1700	0.27	0.34
T14/9/5	2170	3060	4340	6400	960	0.16	0.21
T16/12/8	2270	3200	4540	6700	1010	0.272	0.34
T16/9/7	4030	5640	8060	12080	1850	0.39	0.48
T16/9.6/8	4050	5600	8100	12000	1800	0.48	0.384
T18/8/5	4400	5700	8100	12000	1800	0.44	0.352
TT18/10/7	4100	5750	8200	12300	1880	0.57	0.46
T18/10/10	5880	8200	11000	16000	2600	0.80	0.64
T18/12/8	3240	4540	6470	9700	1490	0.55	0.44
T20/10/10	6930	9700	13800	20700	3170	1.05	0.84
T22/14/6.35	2900	4000	5700	8600	1320	0.68	0.55
T22/14/8	3600	5100	7200	10800	1660	0.86	0.69
T22/14/10	4300	6300	9000	13500	2000	1.10	0.88

∇ T型TCORES



○ T Cores Dimensions 尺寸

规格型号 TYPE	尺寸(Dimensions) (Unit : mm)			有效参数 Effective Parameter				Wt (G/set)
	A	B	C	C _e (mm)	L _e (mm)	A _e (mm)	W _e (mm ²)	
T47/27/15	47.00±1.10	27.00±0.80	15.00±0.50	0.755	110	11146	16100	83
T50/25/15	50.00±1.10	25.00±0.80	15.00±0.60	0.604	109	180	19600	100
T50/30/19	50.00±1.10	30.00±0.80	19.00±.60	0.65	120.4	186	22378	110
T58/32/18	58.30±1.10	32.00±0.80	18.00±0.60	0.58	134	230	30700	155
T58/41/18	58.20±1.10	41.00±0.90	17.5±0.70	1.02	153	149	22700	114
T60/40/25	60.00±1.10	40.00±0.80	25.00±0.50	0.62	153	247	37700	190
T63/38/25	63.00±1.30	38.00±0.80	25.00±0.50	0.497	152	306	46500	230
T68/44/15	68.00±1.50	44.00±1.00	15.00±0.50	0.96	170.5	177.2	30209	152
T73.5/39/12.5	73.50±1.50	39.00±1.00	12.5±0.50	0.793	165	209	34500	173
TT87/54/14	87.00±1.35	41.00±0.90	13.40±0.45	1.0	214	214	45800	230
T124/60/40	122.50±2.50	40.00±.80	40.00±2.50	0.226	289	1280	370000	1580

○ Electrical Characteristics 电气特性

规格型号 TYPE	AL-Value(nH/N ²)±25%					Pc max(W) 100kHz, 200mT, 100℃	
	YF5K	YF7K	YF10K	YF15K	YFP4/YFP4A		
T47/27/15	8320	11600	16600	24500	3800	8.10	6.50
T50/25/15	14000	19500	27000	41000	6400	9.80	8.0
T50/30/19	9700	13500	19300	28500	4200	11.20	9.00
T58/32/18	10700	15000	21400	32110	4600	15.35	12.28
T58/41/18	6200	8620	12300	18000	2600	11.40	9.10
T60/40/25	10140	14200	20200	30000	4400	18.85	15.08
T63/38/25	12640	17690	25200	37500	5500	23.30	18.60
T68/44/15	6500	9100	13000	19000	2900	15.10	12.1
T73.5/39/12.5	7920	11000	15700	23400	3400	17.30	13.80
TT87/54/14	6280	8800	12500	18400	2600	22.90	18.40
T124/60/40					12800	7.4*	



Bibliografía

- [1] Muhammad H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, Butterworth-Heinemann, 2011.
- [2] Daniel W. Hart, *Electrónica de Potencia*, Prentice Hall, 2001.
- [3] Martin P. Marietta, B. Samaniego, F. Guinjoan, G. Velasco, R. Piqué, H. Valderrama Blavi, *Integración de un algoritmo de gestión de una batería de Pb-ácido en una estrategia de control óptimo para microredes*.
- [4] Ruiz C. Luis J., Beristáin J. José A., Sosa T. Ian M. y Hernández L. Jesús H., *Estudio del Algoritmo de Seguimiento de Punto de Máxima Potencia Perturbar y Observar*, RIEE&C, REVISTA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y COMPUTACIÓN, Vol. 8 No. 1, DICIEMBRE 2010.
- [5] <https://www.sparkfun.com/datasheets/Components/SMD/ATMega328.pdf> – Ultimo acceso 26/01/2022
- [6] <http://www.sidei.cl/pdfs/Carga%20de%20Baterias.pdf> – Ultimo acceso 25/01/2022
- [7] <https://electroimpulso.com.ar/ENERGIASOLAR/BAT.pdf> – Ultimo acceso 25/01/2022
- [8] http://origin-faq.pro-face.com/resources/sites/PROFACE/content/live/FAQS/229000/FA229659/en_US/SP3.1%20Goodnight%20Battery%20Temp%20Comp.pdf – Ultimo acceso 25/01/2022
- [9] ON Semiconductor, *AND9135/D "LC Selection Guide for the DC-DC Synchronous Buck Converter"*.
- [10] Texas Instrument, *Application Report "Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage (Rev. B)"*.
- [11] <http://www.irf.com/product-info/datasheets/data/ir2104.pdf> – Ultimo acceso 28/10/2021